



ΟΔΥΣΣΕΥΣ

NAMA

ΕΜΠ

ΔΕΥΑΚ

ΑΕΙΦΟΡΙΚΗ

MDS



Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης 2000-2006
Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα

ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕ
ΣΥΖΕΥΞΗ ΜΕ ΕΞΕΛΙΓΜΕΝΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

ΟΔΥΣΣΕΥΣ

Τεύχος 4α

Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης
υδρολογικών-υδρογεωλογικών διεργασιών
λεκάνης απορροής «ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ»

Αθήνα
Δεκέμβριος
2006

Α. Ενστρατιάδης, Α. Κουκουβίνος, Ε. Ρόζος, Α. Τέγος, Ι. Ναλμπάντης

Συνεργαζόμενοι φορείς



NAMA Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε.



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδατικών Πόρων
Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων



Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης και Αποχέτευσης
Καρδίτσας

ΑΕΙΦΟΡΙΚΗ

Αειφορική Δωδεκανήσου Α.Ε.

MDS

Άδωνις Κοντός και ΣΙΑ Ε.Ε. (Marathon Data Systems)

Ενότητα Εργασίας 3

**Ανάπτυξη δέσμης μαθηματικών μοντέλων για την
ανάλυση και προσομοίωση των συνιστωσών
διαχείρισης των υδατικών πόρων**

Τεύχος 4α

**Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης
υδρολογικών-υδρογεωλογικών διεργασιών λεκάνης
απορροής «ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ»**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο του τεύχους είναι η ανάπτυξη του υπολογιστικού συστήματος ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, που αναπαριστά τις υδρολογικές και υδρογεωλογικές διεργασίες καθώς και τις πρακτικές διαχείρισης των υδατικών πόρων μιας λεκάνης απορροής. Μετά μια συνοπτική παρουσίαση των γνωστότερων υδρολογικών μοντέλων και τη γενικότερη τοποθέτηση του προβλήματος, περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο της προσέγγισης, που περιλαμβάνει τη συνδυαστική λειτουργία τριών επιμέρους μοντέλων: (α) ενός εννοιολογικού μοντέλου συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας, με διαφορετικές παραμέτρους για κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης, που εκτιμά τον μετασχηματισμό της βροχόπτωσης σε εξατμοδιαπνοή, επιφανειακή απορροή και κατείσδυση, (β) ενός πολυκυτταρικού μοντέλου υπόγειων νερών, που εκτιμά τη χωρική διακύμανση της στάθμης του υδροφορέα, τη βασική ροή (απορροή πηγών) και τις υπόγειες διαφυγές, και (γ) ενός μοντέλου κατανομής των υδατικών πόρων, που για δεδομένες υδρολογικές εισροές στο υδρογραφικό δίκτυο, δεδομένα χαρακτηριστικά των τεχνικών έργων (υδραγωγεία, γεωτρήσεις) και δεδομένους στόχους και περιορισμούς εκτιμά τις απολήψεις και το υδατικό ισοζύγιο σε όλα τα σημεία ελέγχου του υδροσυστήματος, επιλέγοντας την οικονομικά βέλτιστη διαχείριση. Η χωρική ανάλυση προϋποθέτει μια ημικατανεμημένη σχηματοποίηση της λεκάνης και του υποκειμένου της υδροφορέα, και μια αδρομερή περιγραφή των τεχνικών έργων, που επιτυγχάνονται με τη χρήση συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας. Το χρονικό βήμα προσομοίωσης είναι μηναίο ή ημερήσιο. Στην τελευταία περίπτωση, παρέχεται η δυνατότητα ενσωμάτωσης ενός σχήματος διόδευσης, που βασίζεται στην καταξιωμένη μέθοδο Muskingum-Cunge. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου, με τη χρήση στατιστικών και εμπειρικών μέτρων καλής προσαρμογής και εξελικτικών αλγορίθμων για μονοκριτηριακή και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Τέλος, παρουσιάζεται η εφαρμογή του μοντέλου στην περιοχή της Δυτικής Θεσσαλίας.

ABSTRACT

The subject of the report is the development of the software system HYDROGEIOS, which represents the hydrological and hydrogeological processes as well as the water resource management practices of a river basin. After a short review of the most recognized hydrological models and a general overview of the problem, we describe the theoretical background of the approach, comprising the combined operation of three models: (a) a conceptual soil moisture accounting model, with different parameters for each hydrological response unit, which estimates the transformation of precipitation to evapotranspiration, surface runoff and percolation; (b) a multicell groundwater model, which estimates the spatial distribution of the water table, the baseflow (spring runoff) and the underground losses; and (c) a water resources allocation model, which for given hydrological inflows along the river network, given characteristics of technical facilities (aqueducts, wells) and given targets and constraints, estimates the abstractions and the water balance at all hydrosystem control points, selecting the economical optimal management. The spatial analysis assumes a semi-distributed schematisation of the basin and its underlying

aquifer, and also a rough description of the technical works, all employed via the use of geographical information systems. The time step of simulation is monthly or daily; in the last case, a routing model is optionally incorporated, based on the well-known Muskingum-Cunge method. Specific emphasis is given to the estimation of model parameters, by using statistical and empirical goodness-of-fit measures and evolutionary algorithms for single- and multi-objective optimisation. Finally, we present an application of the model to the Western Thessaly area.

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Εισαγωγή | 4 |
| 1.1 | Αντικείμενο του τεύχους - Ιστορικό..... | 4 |
| 1.2 | Διάρθρωση του τεύχους..... | 6 |
| 2 | Επισκόπηση υδρολογικών μοντέλων | 7 |
| 2.1 | Γενικά..... | 7 |
| 2.2 | Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων..... | 7 |
| 2.2.1 | Πεδίο εφαρμογής..... | 7 |
| 2.2.2 | Μαθηματική δομή..... | 8 |
| 2.2.3 | Χρονική διακριτότητα..... | 9 |
| 2.3 | Το πρόβλημα της βαθμονόμησης..... | 10 |
| 2.4 | Αδιαμέριστα μοντέλα..... | 11 |
| 2.4.1 | Το μοντέλο Thornthwaite..... | 11 |
| 2.4.2 | Το μοντέλο SACRAMENTO..... | 12 |
| 2.5 | Ημικατανεμημένα μοντέλα..... | 14 |
| 2.5.1 | Γενικά..... | 14 |
| 2.5.2 | Το μοντέλο HEC-HMS..... | 14 |
| 2.6 | Κατανεμημένα σχήματα φυσικής βάσης..... | 15 |
| 2.6.1 | Γενικά..... | 15 |
| 2.6.2 | Το μοντέλο MIKE SHE..... | 16 |
| 2.6.3 | Το μοντέλο SWAT..... | 18 |
| 2.7 | Μοντέλα υπόγειων νερών..... | 19 |
| 3 | Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ | 21 |
| 3.1 | Γενικά..... | 21 |
| 3.2 | Θεμελιώδεις απαιτήσεις..... | 21 |
| 3.3 | Συνιστώσες και δεδομένα εισόδου..... | 22 |
| 3.4 | Σχηματοποίηση επιφανειακού συστήματος..... | 23 |
| 3.4.1 | Υδρογραφικό δίκτυο..... | 23 |
| 3.4.2 | Μονάδες υδρολογικής απόκρισης..... | 24 |
| 3.5 | Προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών εδάφους..... | 25 |
| 3.5.1 | Δομή μοντέλου εδαφικής υγρασίας..... | 25 |
| 3.5.2 | Υπολογιστική διαδικασία..... | 26 |
| 3.5.3 | Παράμετροι μοντέλου..... | 28 |
| 3.5.4 | Υπολογισμός εισροών στο υδρογραφικό δίκτυο..... | 29 |
| 3.6 | Μοντέλο υπόγειας υδρολογίας..... | 30 |
| 3.6.1 | Σχηματοποίηση υδροφορέα..... | 30 |
| 3.6.2 | Συνιστώσες φόρτισης υπόγειων δεξαμενών..... | 31 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.6.3 | Λειτουργία δεξαμενών | 32 |
| 3.6.4 | Χρονικό βήμα υπολογισμών | 33 |
| 3.6.5 | Ρητό σχήμα επίλυσης | 34 |
| 3.6.6 | Πεπλεγμένο σχήμα επίλυσης | 35 |
| 3.7 | Μοντέλο κατανομής υδατικών πόρων | 36 |
| 3.7.1 | Τοποθέτηση του προβλήματος | 36 |
| 3.7.2 | Σχηματοποίηση υδροσυστήματος | 37 |
| 3.7.3 | Δικτυακή διατύπωση προβλήματος | 37 |
| 3.8 | Ολοκλήρωση των μοντέλων στη διαδικασία προσομοίωσης | 40 |
| 3.9 | Μοντέλο διόδευσης ροών στο υδρογραφικό δίκτυο | 41 |
| 3.9.1 | Εισαγωγή | 41 |
| 3.9.2 | Περιγραφή του μοντέλου | 42 |
| 3.9.3 | Επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου | 42 |
| 3.9.4 | Εκτίμηση παραμέτρων | 43 |
| 3.9.5 | Υπολογισμός χρονικού και χωρικού βήματος προσομοίωσης | 44 |
| 3.9.6 | Επιμερισμός παροχών από το χρονικό βήμα των δεδομένων στο χρονικό βήμα προσομοίωσης | 45 |
| 3.9.7 | Πορεία υπολογισμών του μοντέλου | 46 |
| 3.9.8 | Δεδομένα μοντέλου | 47 |
| 4 | Γεωγραφικά δεδομένα και επεξεργασίες | 49 |
| 4.1 | Γεωγραφικά δεδομένα | 49 |
| 4.1.1 | Πρωτογενή γεωγραφικά δεδομένα | 49 |
| 4.1.2 | Παραγόμενα γεωγραφικά δεδομένα | 50 |
| 4.2 | Ονοματολογία | 51 |
| 4.3 | Γεωγραφικές επεξεργασίες | 51 |
| 4.3.1 | Διεύθυνση ροής - Συγκέντρωση νερού | 52 |
| 4.3.2 | Τμήματα υδρογραφικού δικτύου | 52 |
| 4.3.3 | Κόμβοι υδρογραφικού δικτύου | 52 |
| 4.3.4 | Έξοδοι υπολεκανών απορροής | 53 |
| 4.3.5 | Συντεταγμένες σημείων εξόδου υπολεκανών απορροής | 53 |
| 4.3.6 | Υπολεκάνες απορροής | 54 |
| 4.3.7 | Λεκάνη απορροής | 54 |
| 4.3.8 | Τμήματα υδρογραφικού δικτύου και υπολεκάνες απορροής | 54 |
| 4.3.9 | Μονάδες υδρολογικής απόκρισης | 55 |
| 4.3.10 | Υπολεκάνες απορροής και μονάδες υδρολογικής απόκρισης | 55 |
| 4.3.11 | Ακμές κυττάρων υδροφορέα | 56 |
| 4.3.12 | Αποστάσεις κέντρων βάρους κυττάρων υδροφορέα | 56 |
| 4.3.13 | Τμήματα αρδευτικού δικτύου | 56 |
| 4.3.14 | Κόμβοι αρδευτικού δικτύου | 56 |
| 4.3.15 | Ένωση υπολεκάνης απορροής, ΜΥΑ και κύτταρου υδροφορέα | 56 |
| 4.3.16 | Τομή κύτταρου υδροφορέα και τμημάτων υδρογραφικού δικτύου | 57 |
| 4.3.17 | Τομή γεώτρησης, κύτταρου υδροφορέα και υπολεκάνης απορροής | 57 |
| 4.3.18 | Τομή πηγής, κύτταρου υδροφορέα και υπολεκάνης απορροής | 58 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | Εκτίμηση παραμέτρων | 59 |
| 5.1 | Τοποθέτηση του προβλήματος | 59 |
| 5.2 | Κριτήρια καλής προσαρμογής | 60 |
| 5.2.1 | Αποτελεσματικότητα | 60 |
| 5.2.2 | Μεροληψία | 61 |
| 5.2.3 | Σφάλμα αναπαραγωγής μηδενικής ροής | 62 |
| 5.2.4 | Σφάλμα αναπαραγωγής τάσης | 62 |
| 5.3 | Εργαλεία βελτιστοποίησης | 63 |
| 5.3.1 | Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βαθμονόμησης | 63 |
| 5.3.2 | Ο εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου | 64 |
| 5.3.3 | Συνοπτική θεωρία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης | 67 |
| 5.3.4 | Ο πολυκριτηριακός εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου | 68 |
| 5.4 | Κατευθυντήριες αρχές εφαρμογής του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ | 69 |
| 5.4.1 | Η σχέση σχηματοποίησης, παραμετροποίησης και βαθμονόμησης | 69 |
| 5.4.2 | Καθορισμός ορίων παραμέτρων | 70 |
| 5.4.3 | Η έννοια της ημιαυτόματης βαθμονόμησης | 70 |
| 6 | Εφαρμογή στο υδροσύστημα Δυτικής Θεσσαλίας | 72 |
| 6.1 | Περιοχή μελέτης | 72 |
| 6.1.1 | Οριοθέτηση υδροσυστήματος | 72 |
| 6.1.2 | Συνοπτική περιγραφή της περιοχής μελέτης | 72 |
| 6.2 | Δεδομένα και επεξεργασίες | 74 |
| 6.2.1 | Γεωγραφικά δεδομένα | 74 |
| 6.2.2 | Υδρολογικά δεδομένα | 74 |
| 6.2.3 | Υδρογεωλογικά δεδομένα | 76 |
| 6.2.4 | Διαχειριστικά δεδομένα | 76 |
| 6.3 | Σχηματοποίηση υδροσυστήματος | 77 |
| 6.3.1 | Γενικές αρχές | 77 |
| 6.3.2 | Υδρογραφικό δίκτυο - Υπολεκάνες | 77 |
| 6.3.3 | Μονάδες υδρολογικής απόκρισης | 78 |
| 6.3.4 | Υδροφορέας - Πηγές | 79 |
| 6.3.5 | Σχήμα διαχείρισης υδατικών πόρων | 81 |
| 6.4 | Εκτίμηση παραμέτρων μοντέλου | 83 |
| 6.4.1 | Παράμετροι και δεδομένα ελέγχου | 83 |
| 6.4.2 | Διαμόρφωση στοχικής συνάρτησης | 84 |
| 6.4.3 | Περιγραφή της διαδικασίας βαθμονόμησης | 84 |
| 6.4.4 | Βελτιστοποιημένες παράμετροι | 85 |
| 6.4.5 | Βελτιστοποιημένες χρονοσειρές απόκρισης | 86 |
| 6.5 | Υδρολογική διερεύνηση βέλτιστης λύσης | 92 |
| 6.5.1 | Υδατικό ισοζύγιο υδροσυστήματος | 92 |
| 6.5.2 | Διαχειριστικά συμπεράσματα | 94 |

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο του τεύχους - Ιστορικό

Το παρόν τεύχος συντάχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου με τίτλο «*Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*», που ανατέθηκε από την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) στη εταιρεία NAMA Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές σε συνεργασία με τον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος του ΕΜΠ και τρεις ακόμη φορείς (Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης και Αποχέτευσης Καρδίτσας, Αειφορική Δωδεκανήσου, Marathon Data Systems). Το έργο εντάσσεται στο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα», στην Πράξη «Φυσικό Περιβάλλον και Βιώσιμη Ανάπτυξη». Επιστημονικός υπεύθυνος είναι ο Αναπληρωτής Καθηγητής Δ. Κουτσογιάννης.

Αντικείμενο του έργου είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος εργαλείων πληροφορικής, που σε συνδυασμό με ένα παράλληλο πλαίσιο μεθοδολογιών και προδιαγραφών, θα παρέχει την κατάλληλη υποδομή για την ορθολογική και βιώσιμη διαχείριση υδροσυστημάτων κάθε κλίμακας. Η κεντρική συνιστώσα του συστήματος είναι το μοντέλο προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδροσυστημάτων, που θα λειτουργεί ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων. Το μοντέλο διαχείρισης θα πλαισιώνεται από μια δέσμη υποστηρικτικών μοντέλων, για την ανάλυση κρίσιμων συνιστωσών που σχετίζονται με την προσφορά, ζήτηση και διαχείριση του νερού. Το παρόν τεύχος περιγράφει μια από τις κυριότερες και πλέον σύνθετες συνιστώσες του υπολογιστικού συστήματος. Συγκεκριμένα, αναφέρεται στο μοντέλο προσομοίωσης των υδρολογικών και υδρογεωλογικών διεργασιών λεκάνης απορροής, στο οποίο δόθηκε η ονομασία «ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ».

Σύμφωνα με το Τεχνικό Παράρτημα της Σύμβασης του έργου, η ανάπτυξη του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ εντάσσεται στην ενότητα εργασίας 3, με τίτλο «*Ανάπτυξη δέσμης μαθηματικών μοντέλων για την ανάλυση, εκτίμηση και προσομοίωση των συνιστωσών διαχείρισης των υδατικών πόρων*». Παραδοτέα της ενότητας είναι, για κάθε μαθηματικό μοντέλο, η υλοποίησή του, υπό μορφή αλγορίθμων και υπολογιστικών διαδικασιών, καθώς και το σχετικό τεύχος που περιέχει συνοπτική επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας, αναλυτική περιγραφή των μεθοδολογιών και τα πρώτα συμπεράσματα από τις πιλοτικές εφαρμογές.

Ειδικότερα, στο Τεχνικό Παράρτημα της Σύμβασης αναφέρεται ρητά ο στόχος του μοντέλου ως εξής:

«Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο υδρολογικό-υδρογεωλογικό μοντέλο υδατικού ισοζυγίου, το οποίο θα αναπαριστά το σύνολο των φυσικών διεργασιών μιας λεκάνης απορροής, με στόχο την εκτίμηση και πρόγνωση του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού της, επιφανειακού και υπόγειου. Τα δεδομένα εισόδου (κατακρημνίσματα, θερμοκρασία) και εξόδου (εξατμοδιαπνοή, επιφανειακή και πηγαία απορροή, υπόγεια αποθήκευση) θα δίνονται σε κατανεμημένη μορφή, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας. Οι μεθοδολογίες προσομοίωσης που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι κατάλληλες τόσο για κοκκώδεις όσο και για καρστικούς υδροφορείς, οι οποίοι αναπτύσσονται σε μεγάλες εκτάσεις στον ελληνικό χώρο και των οποίων η αντιμετώπιση-μοντελοποίηση είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Θα ενσωματωθούν ακόμη τεχνικές προσομοίωσης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού για τις υφάλμυρες ζώνες, αλλά και τις περιοχές που δέχονται έντονες πιέσεις από ρυπαντικά φορτία. Για το λόγο αυτό, η χωροχρονική κλίμακα του μοντέλου θα προσαρμόζεται ανάλογα με τις απαιτήσεις της ανάλυσης. Επιπλέον, για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου, θα χρησιμοποιηθούν

εξελκτικοί αλγόριθμοι μη γραμμικής βελτιστοποίησης, κατάλληλοι για την επίλυση του λεγόμενου “αντίστροφου προβλήματος”, με ικανοποιητική ακρίβεια και ταχύτητα, και με δυνατότητα χρήσης πολλαπλών μέτρων καλής προσαρμογής.»

Όπως εξηγείται αναλυτικά στο κεφάλαιο της θεωρητικής τεκμηρίωσης (Κεφάλαιο 3), η ανάπτυξη του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ έγινε σε πλήρη αρμονία με τις παραπάνω προδιαγραφές. Ειδικότερα, δόθηκε έμφαση στη συνεργασία του μοντέλου με εφαρμογές συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας, κάτι που είναι σύμφωνο με τις σύγχρονες πρακτικές διεθνώς (Maidment, 1997· Jain *et al.*, 2004). Ακόμη, κρίθηκε αναγκαία η σύζευξη του σχήματος προσομοίωσης των φυσικών διεργασιών με ένα σχήμα διαχείρισης των υδατικών πόρων, έτσι ώστε να είναι δυνατή η προσαρμογή του μοντέλου τόσο σε αδιατάρακτες όσο και σε διαταραγμένες λεκάνες, αλλά και η επιχειρησιακή συνεργασία του με το υπό ανάπτυξη σύστημα υποστήριξης αποφάσεων ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ. Η γενίκευση της χωρικής και της χρονικής κλίμακας επιτεύχθηκε αφενός με την αξιοποίηση της κατανεμημένης γεωγραφικής πληροφορίας, που παρέχει μεγάλη ευελιξία στη σχηματοποίηση του υδροσυστήματος, και αφετέρου με την ενσωμάτωση διαδικασιών διόδευσης, που επιτρέπουν την εφαρμογή του μοντέλου σε οσοδήποτε λεπτή χρονική κλίμακα, με την προϋπόθεση, βεβαίως, της ύπαρξης μετρημένων χρονοσειρών βροχόπτωσης και παροχής αντίστοιχα μικρής χρονικής διακριτότητας. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε σε κρίσιμα σημεία, όπως η συμβατότητα των παραμέτρων του μοντέλου με τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, η αποφυγή πολύπλοκων δομών, που θα είχαν ως συνέπεια την αύξηση της αβεβαιότητας του μοντέλου, ο περιορισμός του υπολογιστικού φόρτου, και η αξιοποίηση του συνόλου της διαθέσιμης πληροφορίας, γεωγραφικής και υδρολογικής. Τέλος, όσον αφορά στο ζήτημα της εκτίμησης των παραμέτρων του μοντέλου, υλοποιήθηκαν πρωτότυπες μεθοδολογίες βαθμονόμησης σε συνδυασμό με υπολογιστικές τεχνικές αιχμής, με στόχο την παραγωγή ευσταθών σχημάτων προσομοίωσης, με τη βέλτιστη προγνωστική ικανότητα που παρέχουν τα διαθέσιμα δεδομένα. Όλα τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός καινοτόμου σχήματος, ολιστικής θεώρησης, που προβλέπεται να είναι ανταγωνιστικό των αντίστοιχων συστημάτων που χρησιμοποιούνται διεθνώς.

Όσον αφορά στην ενσωμάτωση τεχνικών προσομοίωσης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού, η έμφαση δόθηκε στο πρόβλημα της υφαλμύρισης, που έχει ιδιαίτερη σημασία σε παράκτιους υδροφορείς. Βέβαια, η εντελώς διαφορετική χωρική και χρονική κλίμακα του φαινομένου, καθώς και το εξειδικευμένο πεδίο εφαρμογής του, οδήγησαν στην ανάπτυξη ενός ξεχωριστού μοντέλου, το οποίο περιγράφεται στο Τεύχος 4β.

Λόγω της δυσκολίας του εγχειρήματος, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση σε θέματα φιλοσοφίας και ανάλυσης προδιαγραφών του συστήματος. Στα πλαίσια αυτά, αξιολογήθηκαν οι διαθέσιμες υποδομές και εξετάστηκε η διεθνής εμπειρία, έτσι ώστε να εντοπιστούν τα πλεονεκτήματα αλλά και οι αδυναμίες των εν λόγω προσεγγίσεων, σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις που τέθηκαν από την πρόταση. Συνεπώς, κρίθηκε αναγκαία η σε βάθος διερεύνηση των πλέον καταξιωμένων σχημάτων προσομοίωσης, ώστε να αποκτηθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα όσον αφορά την αιχμή της έρευνας παγκοσμίως. Η έρευνα, που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 2, συνέβαλε στην αποσαφήνιση των απαιτήσεων του συστήματος, καθώς στόχος ήταν η παραγωγή ενός καινοτόμου εργαλείου, το οποίο να καλύπτει συγκεκριμένες ανάγκες και να υπερτερεί σε συγκεκριμένα σημεία σε σχέση με τα διεθνή μοντέλα, ώστε να είναι ελκυστικό στην αγορά.

Η ανάπτυξη του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ και του σχετικού υπολογιστικού συστήματος αξιοποιήθηκε η εμπειρία της ερευνητικής ομάδας σε θέματα υδρολογικής προσομοίωσης, με εφαρμογή σε διάφορες λεκάνες του ελληνικού χώρου (Ναλμπάντης, 1992· Nalbantis *et al.*, 2002· Efstratiadis *et al.*, 2003· Μαντούδη κ.ά., 2004· Rozos *et al.*, 2004· Ευστρατιάδης κ.ά., 2004). Μέχρι σήμερα, το μοντέλο έχει εφαρμοστεί στη λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού (Ευστρατιάδης, 2006) και στη Δυτική

Θεσσαλία (Τέγος, 2005), η οποία αποτελεί και την περιοχή μελέτης μιας εκ των δύο πιλοτικών εφαρμογών του έργου. Οι δύο αυτές μελέτες, που αναφέρονται σε δύο από τα πλέον πολύπλοκα υδροσυστήματα του ελληνικού χώρου, συνέβαλαν στην αποκρυστάλλωση της δομής του μοντέλου και στη συνεχή βελτίωσή του, μέσα από μια διαδραστική διαδικασία. Η διαδικασία προσαρμογής του μοντέλου στην περιοχή της Δυτικής Θεσσαλίας και τα σχετικά συμπεράσματα αναλύονται στο Κεφάλαιο 6.

Η ομάδα εκπόνησης του παρόντος τεύχους, που αποτελεί και την ομάδα ανάπτυξης του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, είναι:

- Ανδρέας Ευστρατιάδης, Πολιτικός Μηχανικός, Msc Υδρολόγος, Υποψ. Δρ.
- Αντώνης Κουκουβίνος, Αγρονόμος-Τοπογράφος Μηχανικός, DEA Γεωγραφίας
- Ευάγγελος Ρόζος, Πολιτικός Μηχανικός, Υδρολόγος, Υποψ. Δρ.
- Αριστοτέλης Τέγος, Πολιτικός Μηχανικός
- Ιωάννης Ναλμπάντης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ.

1.2 Διάρθρωση του τεύχους

Εκτός από την παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1), το τεύχος περιλαμβάνει πέντε ακόμη κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 2, μετά από μια γενική εισαγωγή στα μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης, γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των πλέον χαρακτηριστικών υδρολογικών μοντέλων από κάθε κατηγορία, με έμφαση στα σχήματα εκείνα που έχουν τύχει ευρείας εφαρμογής διεθνώς.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ. Περιλαμβάνει τις θεμελιώδεις απαιτήσεις που τέθηκαν από την ομάδα ανάπτυξης του μοντέλου, σε αρμονία με το τεχνικό αντικείμενο της σύμβασης, την παρουσίαση των δεδομένων εισόδου (πλην των γεωγραφικών, για τα οποία γίνεται ιδιαίτερη μνεία στο Κεφάλαιο 4), και την αναλυτική εξήγηση των μαθηματικών διαδικασιών και των σχετικών εξισώσεων.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι γεωγραφικές επεξεργασίες που απαιτούνται για την παραγωγή των θεματικών επιπέδων που χρησιμοποιεί ως είσοδο το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, με βάση πρωτογενή γεωγραφικά δεδομένα.

Στο Κεφάλαιο 5 εξετάζεται το πρόβλημα της εκτίμησης των παραμέτρων του μοντέλου, που βασίζεται στη χρήση πολλαπλών κριτηρίων προσαρμογής και αντιμετωπίζεται με εξελιγμένες υπολογιστικές τεχνικές. Επιπλέον, δίνεται ένα πλαίσιο αρχών εφαρμογής των παραπάνω εργαλείων, σε σύνθετα υδροσυστήματα όπου εμπλέκεται μεγάλος αριθμός παραμέτρων.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η εφαρμογή του μοντέλου στην πιλοτική περιοχή της Δυτικής Θεσσαλίας. Τα αποτελέσματα της εν λόγω εφαρμογής αξιοποιήθηκαν για την εκπόνηση του Σχεδίου Διαχείρισης των υδατικών πόρων της περιοχής, όπως περιγράφεται στο σχετικό τεύχος του έργου.

2 Επισκόπηση υδρολογικών μοντέλων

2.1 Γενικά

Για την αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών μιας λεκάνης απορροής έχει αναπτυχθεί μια πληθώρα μαθηματικών μοντέλων, τα οποία, χρησιμοποιώντας δεδομένα από επεξεργασία μετρήσεων πεδίου και ένα σύνολο υποθέσεων σχετικά με την μαθηματική αναπαράσταση των διεργασιών της λεκάνης, εκτιμούν τη διαίτά της σε διάφορες χωρικές και χρονικές κλίμακες. Τα εν λόγω μοντέλα συμβάλλουν στην κατανόηση των μηχανισμών που σχετίζονται με τον κύκλο του νερού. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται ως μοντέλα πρόγνωσης της εξέλιξης των υδρολογικών μεγεθών μιας λεκάνης, εφόσον είναι γνωστές οι αρχικές συνθήκες και τα δεδομένα εισόδου (Beven, 1989).

Τα υδρολογικά μοντέλα χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με:

- το πεδίο εφαρμογής τους·
- την μαθηματική τους δομή·
- τη χρονική τους διακριτότητα.

Στα εδάφια που ακολουθούν εξετάζονται οι διάφορες κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων, θίγεται το ζήτημα της εκτίμησης των παραμέτρων τους και παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικοί τύποι σχημάτων προσομοίωσης από τη διεθνή βιβλιογραφία, για τα οποία έγινε συστηματική διερεύνηση με σκοπό την απόκτηση της απαιτούμενης τεχνογνωσίας, που αξιοποιήθηκε στην ανάπτυξη του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

2.2 Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

2.2.1 Πεδίο εφαρμογής

Κατά κανόνα, το πεδίο εφαρμογής των υδρολογικών μοντέλων είναι είτε η λεκάνη απορροής είτε ο υδροφορέας. Η ανάπτυξη ξεχωριστών μοντέλων για κάθε πεδίο επιβάλλεται λόγω των διαφορετικών πρακτικών διαχείρισής τους αλλά και λόγω της διαφορετικής χωροχρονικής κλίμακας εξέλιξης των σχετικών φυσικών διεργασιών. Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται, συνήθως, σε σχήματα υδατικού ισοζυγίου, που δίνουν μια συνολική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου σε μια συγκεκριμένη χωρική ενότητα (που είναι είτε η ενιαία λεκάνη είτε διακριτά τμήματα αυτής), περιγράφοντας τον μετασχηματισμό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σε απορροή. Η απορροή της λεκάνης είναι η κύρια έξοδος του μοντέλου, αλλά και η μεταβλητή εκείνη με την οποία ελέγχεται η προσαρμογή του. Η υπόγεια (βασική) ροή θεωρείται συνιστώσα της συνολικής απορροής, και συνήθως εκτιμάται συγκεντρωτικά, με βάση απλοποιημένες παραδοχές (π.χ. θεωρώντας τον υδροφορέα ως γραμμικό ταμιευτήρα, η εκφόρτιση του οποίου τροφοδοτεί την υπόγεια απορροή). Οι Singh and Woolhiser (2002), κάνουν μια εκτενή επισκόπηση των μοντέλων επιφανειακής υδρολογίας, τα οποία χωρίζουν σε κατηγορίες, επιχειρώντας μια σύγκριση των χαρακτηριστικών τους.

Στην δεύτερη περίπτωση, προσομοιώνεται ο μηχανισμός κίνησης του υπόγειου νερού, με την χωρική (ή και χρονική) διακριτότητα της προσομοίωσης να είναι, ως επί το πλείστον, πολύ πιο λεπτομερής σε σχέση με τα μοντέλα επιφανειακής υδρολογίας. Πρόκειται για αριθμητικά σχήματα προσομοίωσης του πεδίου ροής του υδροφορέα, που προϋποθέτουν τη διακριτοποίησή του σε στοιχειώδη τμήματα

(κύτταρα). Για το σύνολο των κυττάρων, διατυπώνονται οι διαφορικές εξισώσεις συνέχειας και ροής, που επιλύονται με μεθόδους πεπερασμένων διαφορών, πεπερασμένων στοιχείων, κλπ. Οι αρχικές και οριακές συνθήκες, καθώς και οι φορτίσεις (κατείσδυση, αντλήσεις) δίνονται «εξωτερικά», ενώ η προσαρμογή του μοντέλου γίνεται με βάση παρατηρήσεις στάθμης.

Αν και η περίπτωση συνδυασμένης προσομοίωσης των επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών είναι λιγότερο συχνή, θεωρείται επιβεβλημένη όταν υπάρχουν συνδυασμένες χρήσεις νερού και σημαντική συνεισφορά του υπόγειου δυναμικού στη συνολική απορροή της λεκάνης (Rozos *et al.*, 2004· Panday and Huyakorn, 2004). Επιπλέον, είναι αναγκαία στην περίπτωση που, εξαιτίας του διαπερατού γεωλογικού υποβάθρου (π.χ. ανθρακικά πετρώματα, έντονα καρστικοποιημένα), ο χρόνος απόκρισης του υπόγειου συστήματος είναι συγκρίσιμος με το χρόνο απόκρισης του επιφανειακού συστήματος. Για να είναι αποδοτική από άποψη υπολογιστικού φόρτου, η συνδυασμένη προσομοίωση προϋποθέτει, αναγκαστικά, λιγότερο λεπτομερή περιγραφή του φυσικού συστήματος. Ωστόσο, παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη και, συνεπώς, πιο ρεαλιστική εικόνα των υδρολογικών διεργασιών. Για παράδειγμα, η κατείσδυση από τη βροχόπτωση, που αποτελεί την κύρια φόρτιση του υδροφορέα, υπολογίζεται από το ίδιο το μοντέλο και δεν ορίζεται, κατά αυθαίρετο τρόπο, από τον χρήστη. Επιπλέον, οι παράμετροι των επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών βαθμονομούνται ταυτόχρονα, αξιοποιώντας μετρήσεις που αναφέρονται τόσο στα επιφανειακά όσο και στα υπόγεια νερά.

2.2.2 Μαθηματική δομή

Τα υδρολογικά μοντέλα, ανάλογα με τη μαθηματική δομή τους, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη εντάσσονται τα *εννοιολογικά* (conceptual) μοντέλα, που αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες είτε της συνολικής λεκάνης ή των υπολεκάνων της, θεωρώντας μια προκαθορισμένη μαθηματική δομή, η οποία βασίζεται σε εμπειρικές, ως επί το πλείστον, υποθέσεις. Το πλεονέκτημα των μοντέλων αυτών είναι η απλότητά τους, που επιτρέπει την αναπαράσταση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών που χαρακτηρίζονται από έντονη χωρική ανομοιογένεια, μέσω ενός μικρού σχετικά πλήθους παραμέτρων. Οι εν λόγω παράμετροι, αν και δεν έχουν ακριβή φυσική σημασία, μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές ορισμένων «μέσων» χαρακτηριστικών της λεκάνης.

Τα εννοιολογικά υδρολογικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί σε διάφορες χρονικές διακριτότητες (ωριαία, ημερήσια, μηνιαία) και διάφορους βαθμούς πολυπλοκότητας, που κυμαίνονται από πολύπλοκα σχήματα με 10 έως 20 παραμέτρους, που είναι κατάλληλα για άνυδρες ή ημιάνυδρες λεκάνες, έως πολύ απλά σχήματα ελάχιστων παραμέτρων, που θεωρούνται επαρκή για λεκάνες με πλούσιο υδατικό δυναμικό (Alley, 1984· Makhoulouf and Michel, 1994· Ye *et al.*, 1997· Xu and Singh, 1998). Ανάλογα με τη χωρική διακριτότητα και τον τρόπο προσδιορισμού των παραμέτρων τους, τα εν λόγω σχήματα διακρίνονται σε (Ajami *et al.*, 2004):

- *Αδιαμέριστα* (lumped): Θεωρείται μια ενιαία παραμετροποίηση για το σύνολο της λεκάνης, της οποίας αναπαρίστανται οι κύριες υδρολογικές διεργασίες, με σκοπό την εκτίμηση της απορροής στην έξοδο αυτής.
- *Ημικατανεμημένα* (semi-distributed): Η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε διακριτές ενότητες, οι οποίες αντιστοιχούν είτε σε φυσικές υπολεκάνες είτε σε περιοχές με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, σε κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχούν διαφορετικά δεδομένα εισόδου (χρονοσειρές φόρτισης) και διαφορετικές τιμές παραμέτρων. Η απορροή κάθε ενότητας «μεταφέρεται» στην έξοδο της υπό μελέτη λεκάνης, κάτι που σε μικρή χρονική κλίμακα προϋποθέτει την εφαρμογή υπολογιστικών τεχνικών διόδευσης.
- *Ημι-αδιαμέριστα* (semi-lumped): Πρόκειται για μια ενδιάμεση σχηματοποίηση μεταξύ της συγκεντρωτικής και της ημικατανεμημένης, βάσει της οποίας θεωρούνται διακριτές ενότητες, κάθε μία από τις οποίες δέχεται διαφορετική φόρτιση, ωστόσο οι παράμετροι που εφαρμόζονται είναι κοινές για όλες τις ενότητες.

Στη δεύτερη κατηγορία εντάσσονται τα *κατανεμημένα* (distributed) μοντέλα φυσικής βάσης, τα οποία αναπαριστούν τις μικρής κλίμακας υδρολογικές διεργασίες, βασιζόμενα στους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού, καθώς και σε ημιεμπειρικές σχέσεις που έχουν προκύψει από έρευνες που έχουν γίνει σε πειραματικές λεκάνες. Στην πραγματικότητα, τα σχήματα αυτά μπορούν να θεωρηθούν εννοιολογικά, όχι όμως σε κλίμακα λεκάνης ή υπολεκάνης αλλά σε κλίμακα μονάδας χωρικής διακριτότητας, στην οποία το σύστημα θεωρείται ομοιογενές και ισότροπο (Beven, 1989). Επειδή η διακριτοποίηση είναι πυκνή, το πλήθος των χαρακτηριστικών μεγεθών του μοντέλου είναι εξαιρετικά μεγάλο. Θεωρητικά, τα μεγέθη αυτά εκτιμώνται αποκλειστικά συναρτήσει των φυσικών χαρακτηριστικών της λεκάνης (τοπογραφικών, εδαφολογικών, γεωλογικών, υδρογεωλογικών κλπ.), καθώς και από μετρήσεις πεδίου. Προφανώς, αυτό προϋποθέτει γνωστή χωρική κατανομή των εν λόγω χαρακτηριστικών, καθώς και εκτεταμένο πλήθος μετρήσεων. Επιπλέον, η έντονη ετερογένεια των φυσικών διεργασιών επιβάλλει την ύπαρξη των σχετικών πληροφοριών σε εξαιρετικά λεπτομερή χωρική κλίμακα, κάτι που στην πράξη είναι εξαιρετικά δύσκολο. Για το λόγο αυτό, ακόμη και στα μοντέλα φυσικής βάσης, επιβάλλεται η εκτίμηση ορισμένων τουλάχιστον μεγεθών με παρόμοιες τεχνικές που εφαρμόζονται και στην περίπτωση των εννοιολογικών μοντέλων, θεωρώντας δηλαδή τα φυσικά χαρακτηριστικά ως παραμέτρους προς βελτιστοποίηση (Refsgaard, 1997· Yu *et al.*, 2001· Eckhardt and Arnold, 2001· Madsen and Jacobsen, 2001· Beven, 2001· Beven and Freer, 2001· Madsen, 2002). Γενικά, τα μοντέλα φυσικής βάσης χρησιμοποιούνται για πιο εξειδικευμένες έρευνες, όπως για την εκτίμηση των επιπτώσεων που επιφέρει σε μια λεκάνη η αλλαγή στο κλίμα, τη φυτοκάλυψη ή τις χρήσεις γης, ενώ συχνά συνδυάζονται με μοντέλα μεταφοράς-διάχυσης ρύπων ή μεταφοράς φερτών. Από την άλλη πλευρά, η διεθνής εμπειρία καταδεικνύει ότι η χρήση αποκλειστικά για πρόγνωση της απορροής δεν παρέχει κανένα πλεονέκτημα σε σχέση με τα εννοιολογικά μοντέλα, και επιπλέον είναι υπολογιστικά ασύμφορη (Grayson *et al.*, 1992· Ye *et al.*, 1997).

Στην τελευταία κατηγορία μοντέλων εντάσσονται τα σχήματα τύπου *μαύρου κουτιού* (black-box), οι εξισώσεις των οποίων δεν αναπαριστούν τις ενδιάμεσες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου, είτε σε μεγάλη είτε σε μικρή κλίμακα, όπως συμβαίνει με τα εννοιολογικά και τα φυσικής βάσης μοντέλα, αντίστοιχα. Στα σχήματα μαύρου κουτιού περιλαμβάνονται τα στατιστικά και στοχαστικά μοντέλα που περιγράφουν γραμμικές (ή γραμμικοποιημένες) σχέσεις μεταξύ εισόδων και εξόδων, καθώς και τα νευρωνικά δίκτυα που περιγράφουν έντονα μη γραμμικούς μετασχηματισμούς των εισόδων σε εξόδους (Govindaraju and Rao, 2002). Ένα εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ως κάτι ενδιάμεσο μεταξύ ενός νευρωνικού δικτύου και ενός φυσικής βάσης μοντέλου (Kuczera and Parent, 1998). Επισημαίνεται ότι οι παράμετροι των στατιστικών και στοχαστικών μοντέλων υπολογίζονται αναλυτικά, με βάση τα ιστορικά υδρολογικά δείγματα ή ορισμένα στατιστικά τους χαρακτηριστικά, ενώ οι παράμετροι των νευρωνικών δικτύων εκτιμώνται, όπως και στην περίπτωση των εννοιολογικών μοντέλων, μέσω βαθμονόμησης. Η σχετική διαδικασία είναι γνωστή ως *εκπαίδευση* (training) του νευρωνικού δικτύου.

2.2.3 Χρονική διακριτότητα

Όσον αφορά στην χρονική διακριτότητα, αυτή είναι άμεσα εξαρτώμενη από τον σκοπό του μοντέλου. Σχήματα προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για διαχειριστικούς σκοπούς υιοθετούν την μηνιαία ή, σπανιότερα, την ημερήσια κλίμακα, ενώ τα μοντέλα πλημμυρών χρησιμοποιούν μικρότερες κλίμακες, με μέγιστη την ημερήσια. Βεβαίως, η μικρή χρονική κλίμακα προσομοίωσης επιβάλλει αντίστοιχα μικρή διακριτότητα των υδρολογικών χρονοσειρών εισόδου, κάτι που προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλης μετρητικής υποδομής στη λεκάνη, από συνεχή καταγραφικά όργανα όπως βροχογράφους και σταθμηγράφους. Επισημαίνεται ότι στις μικρές χρονικές κλίμακες, η επιφανειακή ολοκλήρωση των σημειακών υδρολογικών χρονοσειρών είναι ιδιαίτερα δύσκολη, αφού τα δείγματα πρέπει να είναι κατάλληλα χρονισμένα, ώστε να αντιπροσωπεύουν πραγματικούς χρόνους υστέρησης.

2.3 Το πρόβλημα της βαθμονόμησης

Οι παράμετροι των υδρολογικών μοντέλων, ακόμη και αν πρόκειται για σχήματα φυσικής βάσης, μπορούν να εκτιμηθούν έμμεσα, μέσω μιας συστηματικής διαδικασίας αξιολόγησης εναλλακτικών συνδυασμών που καλείται *βαθμονόμηση* (calibration). Η βαθμονόμηση γίνεται συγκρίνοντας τις προσομοιωμένες αποκρίσεις της λεκάνης (ή του υδροφορέα) με τις παρατηρημένες, και επιλέγοντας τον συνδυασμό εκείνο που επιτυγχάνει την καλύτερη προσαρμογή. Η βαθμονόμηση αναφέρεται σε ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απόκρισης, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών με τα προσομοιωμένα δεδομένα. Η διαδικασία ακολουθείται από την λεγόμενη *επαλήθευση* (validation) του μοντέλου, βάσει την οποίας ελέγχεται η προγνωστική του ικανότητα για μια άλλη (κατά κανόνα μεταγενέστερη) χρονική περίοδο.

Είναι γνωστό ότι η αξιοπιστία των εννοιολογικών μοντέλων εξαρτάται σε εξαιρετικά σημαντικό βαθμό από την ποιότητα της βαθμονόμησης. Αυτή χαρακτηρίζεται επιτυχής όταν ικανοποιεί τα ακόλουθα δύο κριτήρια: (α) το μοντέλο διαθέτει επαρκή προγνωστική ικανότητα, ή αλλιώς μπορεί να αναπαράγει όλο το φάσμα των αποκρίσεων μιας λεκάνης με ικανοποιητική ακρίβεια, και (β) οι εκτιμημένες τιμές των παραμέτρων κυμαίνονται σε λογικά πλαίσια, είναι δηλαδή συμβατές με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος.

Αν και τα τελευταία χρόνια, η αλματώδης εξέλιξη των υπολογιστικών τεχνικών, με την ανάπτυξη ισχυρών και αξιόπιστων αλγορίθμων βελτιστοποίησης, επιτρέπει την αυτόματη βαθμονόμηση των υδρολογικών μοντέλων, το πρόβλημα εξακολουθεί να θεωρείται ένα από τα πλέον δύσκολα που απαντά ένας υδρολόγος στην πράξη. Αυτό συμβαίνει επειδή ο χώρος αναζήτησης είναι έντονα τραχύς και περιέχει εξαιρετικά μεγάλο αριθμό τοπικών ακροτάτων, σε διάφορες μάλιστα κλίμακες (Duan *et al.*, 1992). Όσο αυξάνει το πλήθος των παραμέτρων, τόσο η εύρεση της θεωρητικά βέλτιστης λύσης καθίσταται ανέφικτη. Μάλιστα, στην περίπτωση σύνθετων μοντέλων, το πλήθος των δοκιμών απαιτεί το κύριο περιοριστικό παράγοντα της διαδικασίας βελτιστοποίησης, δεδομένου του υπολογιστικού φόρτου της προσομοίωσης. Συνεπώς, το πρακτικό ζητούμενο είναι η εύρεση μιας ικανοποιητικής λύσης, με λογικό πλήθος δοκιμών.

Μια επιπλέον δυσκολία έγκειται στην ύπαρξη πληθώρας συνδυασμών τιμών των παραμέτρων, που παράγουν ισοδύναμα καλές αποκρίσεις της λεκάνης, και οφείλεται, σε συνδυασμό αιτιών, που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους κατά τρόπο μη ελεγχόμενο. Σε αυτά περιλαμβάνονται:

- σφάλματα δομής του μοντέλου (απλουστευμένη αναπαράσταση εξαιρετικά σύνθετων διεργασιών, χρήση μεγαλύτερου αριθμού παραμέτρων σε σχέση με αυτές που μπορούν να υποστηρίξουν τα δεδομένα των μετρήσεων, αλληλεπίδραση παραμέτρων)·
- σφάλματα δεδομένων (ανεπαρκείς ή και λανθασμένες μετρήσεις, σφάλματα χωρικής και χρονικής ολοκλήρωσης)·
- μη αντιπροσωπευτική πληροφορία, βάσει της οποίας γίνεται η προσαρμογή του μοντέλου (π.χ. τα ιστορικά δείγματα δεν καλύπτουν όλο το φάσμα των υδροκλιματικών καταστάσεων της λεκάνης)·
- αδυναμία προσδιορισμού των αρχικών συνθηκών του μοντέλου·
- χρήση μέτρων προσαρμογής μη συμβατών με τη στατιστική δομή των σφαλμάτων του μοντέλου
- εγγενείς δυσχέρειες της διαδικασίας βελτιστοποίησης, που οφείλονται στα χαρακτηριστικά της επιφάνειας απόκρισης (πολλαπλά ακρότατα, γεωμετρικές ανωμαλίες)·
- αδυναμία ελέγχου των μεταβλητών εξόδου του μοντέλου για τις οποίες δεν υπάρχουν μετρήσεις (εξατμοδιαπνοή, κατείδυση, ύψος εδαφικής υγρασίας, διαφυγές προς τη θάλασσα, κλπ.)·
- μεταβολές των χαρακτηριστικών του συστήματος λόγω κλιματικής αλλαγής, προσθήκης νέων έργων, αστικοποίησης, πυρκαγιών, διαχειριστικών επεμβάσεων, κλπ., που αναιρεί τη διαχρονική ισχύ των παραμέτρων.

Τα παραπάνω συνεπάγονται μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την προγνωστική ικανότητα των μοντέλων, που γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνει το πλήθος των παραμέτρων, άρα και η πολυπλοκότητα του μοντέλου.

Όσον αφορά στο ζήτημα της βαθμονόμησης, η έρευνα έχει στραφεί προς την αξιοποίηση του συνόλου της διαθέσιμης πληροφορίας, με την ενσωμάτωση πολλαπλών κριτηρίων προσαρμογής (Gupta *et al.*, 1998), την αξιοποίηση της εμπειρίας του υδρολόγου στη διαδικασία της βελτιστοποίησης (Boyle *et al.*, 2000), καθώς και στην ανάπτυξη μεθοδολογιών ποσοτικοποίησης της αβεβαιότητας, με σκοπό τη βελτίωση της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου (Freer *et al.*, 1996· Wagener *et al.*, 2001).

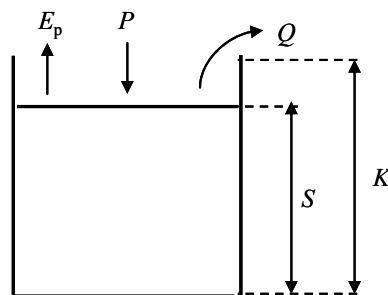
Στο σύστημα που αναπτύχθηκε, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη διαδικασία της βαθμονόμησης των παραμέτρων του μοντέλου. Για τον σκοπό αυτό υλοποιήθηκαν πρωτότυπα εξελικτικά σχήματα απλής αλλά και πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, που αναλύονται στο Κεφάλαιο 5.

2.4 Αδιαμέριστα μοντέλα

Τα αδιαμέριστα μοντέλα, που συχνά αναφέρονται και ως εννοιολογικά μοντέλα βροχής-απορροής, είναι τα παλαιότερα και πλέον διαδεδομένα σχήματα υδρολογικής προσομοίωσης. Οι Makhlof and Michel (1994) και Xu and Singh (1998) κάνουν μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των συγκεκριμένων μοντέλων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται το κλασικό σχήμα του Thornthwaite, που αποτέλεσε την εννοιολογική βάση μιας ευρείας κατηγορίας μοντέλων μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου, και το SACRAMENTO, που είναι ένα από τα πλέον διαδεδομένα μοντέλα πλημμυρών.

2.4.1 Το μοντέλο Thornthwaite

Το πρώτο εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο αναπτύχθηκε από τον Thornthwaite (1948) για την εκτίμηση της πραγματικής εξατμοδιαπνοής απλών λεκανών, με εφαρμογή ενός σχήματος μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου (Dingman, 1994, σ. 299-301· Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 236-243). Αργότερα, οι Thornthwaite and Mather (1955) παρουσίασαν μια τροποποιημένη εκδοχή, που αποτέλεσε τη βάση όλων των μεταγενέστερων εννοιολογικών μοντέλων υδρολογικής προσομοίωσης.



Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση της δομής του μοντέλου Thornthwaite.

Σύμφωνα με τον Thornthwaite (1948), η υδρολογική λειτουργία μιας απλής λεκάνης εξομοιώνεται με τη λειτουργία μιας εννοιολογικής δεξαμενής συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας χωρητικότητας K , που συνιστά την μοναδική παράμετρο του μοντέλου (Σχήμα 3.2). Στοιχεία εισόδου του μοντέλου είναι η βροχόπτωση, P_t , και η δυνητική εξατμοδιαπνοή¹, E_{p_t} . Σημειώνεται ότι με t συμβολίζεται ο δείκτης

¹ Ο όρος περιγράφει την ποσότητα της εξατμοδιαπνοής (δηλαδή του συνόλου των πραγματικών απωλειών νερού από την εξάτμιση εδαφών και τη διαπνοή της χλωρίδας) που δυνητικά θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί από εδαφικές επιφάνειες πλήρως και ομοιόμορφα καλυμμένες από αναπτυσσόμενη χλωρίδα, εφόσον υπήρχαν συνθήκες απεριόριστης διαθεσιμότητας νερού, σε αντιστοιχία, δηλαδή, με την εξάτμιση υδάτινων επιφανειών.

που αναφέρεται στο χρονικό διάστημα $[\tau, \tau + \Delta\tau]$, όπου $\Delta\tau$ το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, κατά κανόνα μηνιαίο. Το απόθεμα της δεξαμενής αναπαριστά την αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας, S_t . Εφόσον η βροχόπτωση υπερβαίνει την δυναμική εξατμοδιαπνοή ($P_t > E_{Pt}$), η πραγματική εξατμοδιαπνοή ταυτίζεται με τη δυναμική, και το περίσσειμα $P_t - E_{Pt}$ αποθηκεύεται ως εδαφική υγρασία. Η δεξαμενή υπερχειλίζει όταν το απόθεμα υπερβεί τη χωρητικότητα K . Συνεπώς, η υπερχειλίση αναπαριστά την επιφανειακή απορροή, Q_t , που πραγματοποιείται μόνο εφόσον γεμίσει η δεξαμενή, ή αλλιώς κορεστεί το έδαφος. Στην περίπτωση που προκύπτει έλλειμμα εξατμοδιαπνοής ($P_t < E_{Pt}$), μέρος αυτού καλύπτεται μέσω της αποθηκευμένης εδαφικής υγρασίας. Συγκεκριμένα, γίνεται η παραδοχή ότι ο ρυθμός της επιπλέον εξατμοδιαπνοής (εδαφική εξατμοδιαπνοή) είναι ανάλογος του ελλείμματος $E_{Pt} - P_t$ και του λόγου πλήρωσης της δεξαμενής, S_t / K , δηλαδή:

$$E_{St} = \frac{E_{Pt} - P_t}{K} S_t \quad (2.1)$$

Εφόσον διατίθενται χρονοσειρές μηνιαίας απορροής, είναι δυνατή η εκτίμηση της παραμέτρου K , με σύγκριση του ιστορικού και προσομοιωμένου υδρογραφήματος. Βεβαίως, η παραπάνω προσέγγιση είναι επαρκής μόνο για απλές υδρολογικές λεκάνες χειμαρρικής δίαιτας και χωρίς αξιόλογη υπόγεια αποθήκευση, καθώς δεν μπορεί να αναπαραστήσει ούτε μόνιμες ροές ούτε τις διεργασίες βαθιάς διήθησης και κατείσδυσης.

2.4.2 Το μοντέλο SACRAMENTO

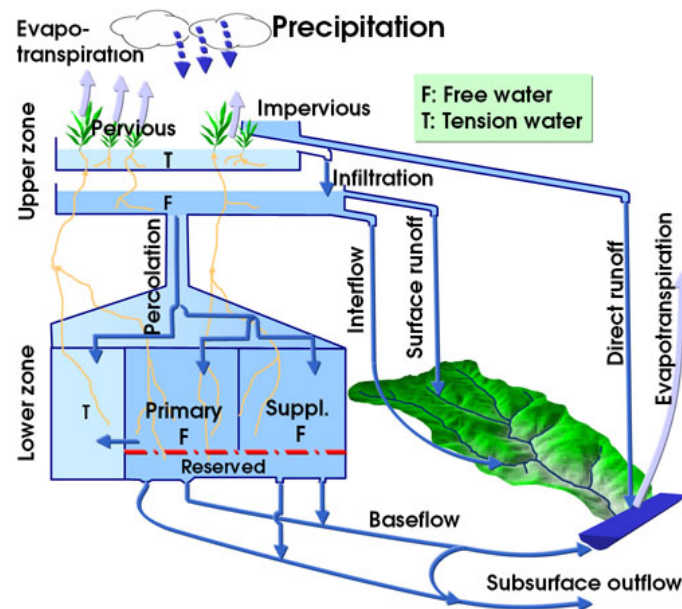
Το Γενικευμένο Μοντέλο Υδρολογικής Προσομοίωσης (Generalized Streamflow Simulation System-Conceptual Modeling) είναι ένα από τα πιο γνωστά μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της σχέσης βροχής-απορροής (Burnash *et al.*, 1973). Αναπτύχθηκε από το Κοινό Ομοσπονδιακό-Πολιτειακό Κέντρο Πρόγνωσης Πλημμυρών των ΗΠΑ (U.S. Joint Federal State River Forecasting Center), και έγινε ευρύτερα γνωστό ως μοντέλο SACRAMENTO, για να αποτελέσει στη συνέχεια τη θεωρητική βάση για την ανάπτυξη πολλών άλλων υδρολογικών μοντέλων. Σήμερα, αποτελεί το καθιερωμένο εργαλείο πρόγνωσης πλημμυρών στις ΗΠΑ, για το οποίο έχουν αναπτυχθεί τυποποιημένοι κανόνες βαθμονόμησής του (Anderson, 1997).

Το μοντέλο προσομοιώνει τις κυριότερες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου σε λεκάνες που δεν δέχονται εισροές από ανάντη υδροσυστήματα. Όπως όλα τα εννοιολογικά μοντέλα, έχει ως βάση ένα σύστημα από στοιχειώδεις εξισώσεις που αναπαριστούν φυσικές διεργασίες όπως η διήθηση, η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας και η εξατμοδιαπνοή. Η δομή του μοντέλου, που περιλαμβάνει ένα σύστημα διασυνδεδεμένων δεξαμενών, απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2.

Στο μοντέλο θεωρείται ότι η βροχόπτωση πέφτει σε δύο ξεχωριστά τμήματα της λεκάνης, ένα υδροπερατό (perVIOUS), που αντιστοιχεί στην εδαφική επιφάνεια της λεκάνης, και ένα αδιαπέρατο (impervIOUS), που θεωρείται ότι καλύπτεται από λίμνες, ποτάμια και πλήρως στεγανά υλικά, και το οποίο παράγει άμεση απορροή. Αντίθετα, το υδροπερατό τμήμα παράγει απορροή μόνο εφόσον η ένταση της βροχής ξεπεράσει το ρυθμό διήθησης του εδάφους.

Στο υδροπερατό τμήμα θεωρούνται δύο ζώνες υγρασίας, κατά την κατακόρυφη έννοια: (α) η *ανώτερη ζώνη* (upper zone), που περιλαμβάνει την εδαφική υγρασία στα ανώτερα στρώματα του εδάφους, και (β) η *κατώτερη ζώνη* (lower zone), που περιλαμβάνει το υπόγειο νερό από το οποίο προέρχεται η βασική ροή του υδατορεύματος. Το νερό των κατακρημνίσεων που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους γεμίζει κατά προτεραιότητα την δεξαμενή του *κατακρατούμενου νερού* (tension water), που αναπαριστά τη φυσική διεργασία της παρεμπόδισης της βροχής από τη χλωρίδα και της παγίδευσής της στις κοιλότητες του εδάφους. Η χωρητικότητα της δεξαμενής αντιστοιχεί στον όγκο νερού που απαιτείται για την έναρξη της διήθησης ή και της οριζόντιας στράγγισης. Μετά την πλήρωσή της, η περίσσεια νερού αποθηκεύεται, προσωρινά, στη δεξαμενή του *ελεύθερου νερού* (free water), που

αναφέρεται στο νερό που δεν μένει προσκολλημένο στο έδαφος αλλά μπορεί να κινηθεί υπό την επίδραση των δυνάμεων βαρύτητας, είτε διηθούμενο κατακόρυφα προς βαθύτερα εδαφικά στρώματα (percolation), είτε κινούμενο πλευρικά, παράγοντας υποδερμική ροή (interflow). Εφόσον η δεξαμενή γεμίσει, η περίσσεια νερού εμφανίζεται ως επιφανειακή απορροή (surface runoff). Ο μηχανισμός μεταφοράς νερού από την ανώτερη προς την κατώτερη ζώνη έχει ως βάση την εκτίμηση της ζήτησης για διήθηση.



Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση της δομής του μοντέλου SACRAMENTO.

Η κατώτερη ζώνη του εδάφους περιλαμβάνει τρεις δεξαμενές: (α) τη δεξαμενή κατακρατούμενου νερού της κατώτερης ζώνης (lower zone tension water), που περιλαμβάνει το τμήμα εκείνο των υπόγειων αποθεμάτων που είναι διαθέσιμα για την πραγματοποίηση της εξατμοδιαπνοής, (β) την κύρια δεξαμενή ελεύθερου νερού (lower zone primary free water), και (γ) την βοηθητική δεξαμενή ελεύθερου νερού (lower zone supplementary free water). Οι δύο τελευταίες θεωρούνται ως γραμμικοί ταμιευτήρες που τροφοδοτούν τη βασική ροή (base flow) του υδατορεύματος και την υπόγεια εκροή (subsurface outflow) εκτός λεκάνης. Η χρήση τριών διαφορετικών δεξαμενών επιτρέπει την αναπαράσταση μεγάλης ποικιλίας καμπυλών στείρευσης, που παρατηρούνται στα υδρογραφήματα. Μάλιστα, η εκτίμηση των παραμέτρων των εν λόγω δεξαμενών μπορεί να γίνει άμεσα, με γραφική ανάλυση των μετρημένων υδρογραφημάτων (χωρίς να απαιτείται εφαρμογή του μοντέλου).

Το μοντέλο SACRAMENTO εφαρμόζεται σε ημερήσια κλίμακα. Στην περίπτωση που υπάρχει κάποιο επεισόδια βροχής, τότε η ημέρα χωρίζεται σε δύο υποπεριόδους, μια βροχερή και μια ξηρή. Είσοδοι του μοντέλου είναι οι ημερήσιες χρονοσειρές βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής, χαρακτηριστικά της λεκάνης που προσδιορίζονται με βάση την τοπογραφία, τη γεωλογία και τις χρήσεις γης (ποσοστό μόνιμα αδιαπέρατης επιφάνειας, μέγιστο ποσοστό αδιαπέρατων εδαφών, ολικό ποσοστό κάλυψης της λεκάνης από υδάτινες επιφάνειες και παρόχθια βλάστηση) και ένα πλήθος παραμέτρων, ορισμένες από τις οποίες προκύπτουν από την ανάλυση των υδρογραφημάτων, ενώ άλλες εκτιμώνται μέσω βαθμονόμησης (Ναλμπάντης, 1992, σ. 3-24).

2.5 Ημικατανεμημένα μοντέλα

2.5.1 Γενικά

Τα περισσότερα ημικατανεμημένα μοντέλα αποτελούν γενίκευση των αδιαμέριστων, εννοιολογικών σχημάτων, με τη διαφορά ότι η αναπαράσταση των διεργασιών γίνεται σε κλίμακα υπολεκάνης. Με τον τρόπο αυτό, εκτιμώνται οι εισροές λόγω απορροής κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου, δηλαδή στις εξόδους των υπολεκανών. Στο πέρας κάθε χρονικού βήματος, οι εισροές αθροίζονται κατά μήκος του δικτύου, ώστε να προκύψουν οι παροχές των επιμέρους κλάδων. Εφόσον η χρονική διακριτότητα της προσομοίωσης είναι μικρή (ημερήσια ή μικρότερη) απαιτείται η εφαρμογή ενός υδραυλικού μοντέλου διόδευσης, ώστε να ληφθεί υπόψη η ανάσχεση της μεταφερόμενης παροχής.

2.5.2 Το μοντέλο HEC-HMS

Το HEC-HMS είναι από τα πλέον καταξιωμένα υδρολογικά μοντέλα και έχει βρει εφαρμογή σε πληθώρα μελετών πλημμυρών παγκοσμίως. Αναπτύχθηκε από το Υδρολογικό Κέντρο του Σώματος Μηχανικών των ΗΠΑ (U.S. Army Corp of Engineers), και αποτελεί εξέλιξη του μοντέλου HEC-1. Το HEC-HMS προσομοιώνει τις διεργασίες μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε παροχή και τη διόδευση της τελευταίας, σε υδρογραφικά δίκτυα δενδριτικού τύπου. Το μεθοδολογικό του υπόβαθρο βασίζεται στη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί τόσο για την πρόγνωση πλημμυρικών φαινομένων σε πραγματικό χρόνο όσο και τη δημιουργία συνθετικών υδρογραφημάτων, σε πολλαπλά σημεία ελέγχου του υδρογραφικού δικτύου.

Στην πραγματικότητα, δεν πρόκειται για ένα μεμονωμένο μαθηματικό σχήμα αλλά για μια υπολογιστική πλατφόρμα, η οποία υποστηρίζει εναλλακτικές εκδοχές μοντέλων για τις διάφορες διεργασίες του κύκλου μιας πλημμύρας (υπομοντέλα), όπως εξηγείται στη συνέχεια. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του συστήματος και τα διαθέσιμα δεδομένα, ο χρήστης του HEC-HMS επιλέγει τον κατάλληλο συνδυασμό υπομοντέλων. Συγκεκριμένα, ο χρήστης καλείται να επιλέξει υπομοντέλο για κάθε μία από τις ακόλουθες συνιστώσες:

- υπομοντέλο εκτίμησης υδρολογικών ελλειμμάτων·
- υπομοντέλο εκτίμησης άμεσης απορροής·
- υπομοντέλο εκτίμησης βασικής απορροής·
- υπομοντέλο διόδευσης πλημμυρών.

Το υπομοντέλο εκτίμησης των *υδρολογικών ελλειμμάτων* αποσκοπεί στην κατασκευή του καθαρού υετογραφήματος, που συνεισφέρει στην παραγωγή άμεσης απορροής. Ως υδρολογικά ελλείμματα νοούνται οι ποσότητες νερού που κατακρατούνται επιφανειακά (παρεμποδίζονται από τη χλωρίδα ή παγιδεύονται στις μικροκοιλότητες του εδάφους) και διηθούνται (δηλαδή εισχωρούν στο έδαφος) κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου βροχής. Η αναλυτική περιγραφή των εν λόγω διεργασιών ξεφεύγει από τους πρακτικούς σκοπούς μιας υδρολογικής μελέτης. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα συνολικής εκτίμησης των ελλειμμάτων, τα οποία για δεδομένο ύψος βροχής, υπολογίζουν την ενεργό βροχή ή πλεόνασμα βροχής. Το HEC-HMS ενσωματώνει διάφορα τέτοια μοντέλα, όπως:

- το μοντέλο αρχικών και σταθερού ρυθμού απωλειών (μέθοδος δείκτη φ)·
- το μοντέλο απωλειών της Soil Conservation Service (μέθοδος SCS)·
- το μοντέλο φυσικής βάσης Green-Ampt·
- το εννοιολογικό μοντέλο εδαφικής υγρασίας SMA (Soil Moisture Accounting), σε συγκεντρωτική και κατανεμημένη μορφή.

Για την εκτίμηση της *άμεσης απορροής*, το HEC-HMS υλοποιεί τον μετασχηματισμό του καθαρού υετογραφήματος σε πλημμυρογράφημα (δηλαδή το τμήμα του υδρογραφήματος που οφείλεται

αποκλειστικά στην ταχεία απόκριση της λεκάνης με τη μορφή επιφανειακής και ενδιάμεσης απορροής), εφαρμόζοντας είτε την εμπειρική μέθοδο του μοναδιαίου υδρογραφήματος (σε διάφορες εκδοχές της) είτε ένα φυσικής βάσης μοντέλο κινηματικού κύματος (kinematic wave). Ειδικότερα, η προσέγγιση του μοναδιαίου υδρογραφήματος, εστιάζει αποκλειστικά στον μετασχηματισμό της ενεργού βροχής σε απορροή, μη λαμβάνοντας υπόψη τις υπόλοιπες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου. Το μοναδιαίο υδρογράφημα είτε εισάγεται από τον χρήστη είτε κατασκευάζεται συνθετικά. Στην τελευταία περίπτωση, τα χαρακτηριστικά μεγέθη του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος (ΣΜΥ), δηλαδή ο χρόνος ανόδου και η παροχή αιχμής, εκτιμώνται συναρτήσει των χαρακτηριστικών της λεκάνης. Το πρόγραμμα υποστηρίζει διάφορους τύπους ΣΜΥ, όπως του Snyder, του Clark (στην αρχική και τροποποιημένη εκδοχή του) και του SCS.

Η *βασική απορροή* είναι η συνιστώσα του υδρογραφήματος που οφείλεται στη βραδεία απόκριση της λεκάνης, με τη μορφή επιφανειακής εκφόρτισης του υποκείμενου υδροφορέα. Από τη σύνθεση της βασικής και άμεσης απορροής, προκύπτει η συνολική απορροή (ολικό υδρογράφημα), που ενδιαφέρει στα πλαίσια μιας μελέτης πλημμυρών. Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια των πλημμυρικών επεισοδίων, η βασική απορροή αποτελεί μικρό μόνο ποσοστό της συνολικής παροχής, που γίνεται πιο αμελητέο όσο αυξάνει η περίοδος επαναφοράς. Το υποστηρίζει τα ακόλουθα μοντέλα εκτίμησης της βασικής απορροής:

- μοντέλο σταθερής τιμής, μεταβαλλόμενης ανά μήνα·
- μοντέλο εκθετικής μείωσης·
- μοντέλο γραμμικού ταμειυτήρα.

Τέλος, το πρόγραμμα ενσωματώνει διάφορα σχήματα *διόδευσης* (χρονικής υστέρησης, Muskingum, κινηματικού κύματος, Muskingum-Cunge, κλπ.), ενώ παρέχει και τη δυνατότητα διόδευσης του υδρογραφήματος μέσω του υπερχειλιστή ταμειυτήρα. Το σχετικό μαθηματικό υπόβαθρο βασίζεται στην εξίσωση συνέχειας, την καμπύλη στάθμης-παροχής του υπερχειλιστή και τις καμπύλες στάθμης-όγκου και στάθμης-επιφάνειας του ταμειυτήρα.

Οι παράμετροι των υπομοντέλων διαφοροποιούνται ανά υπολεκάνη. Το πρόγραμμα ενσωματώνει διάφορα εργαλεία βελτιστοποίησης, που διευκολύνουν το χρήστη στη βαθμονόμηση. Επειδή, ωστόσο, πρόκειται για αλγορίθμους τοπικής αναζήτησης, η χρήση των εν λόγω αλγορίθμων δεν εγγυάται τον εντοπισμό της ολικά βέλτιστης λύσης, εξαιτίας του προβλήματος των τοπικών ακροτάτων.

2.6 Κατανεμημένα σχήματα φυσικής βάσης

2.6.1 Γενικά

Τα μοντέλα φυσικής βάσης ξεκίνησαν να αναπτύσσονται στα μέσα της δεκαετίας του 1980, με σκοπό να καλύψουν ορισμένες εγγενείς αδυναμίες των εννοιολογικών μοντέλων, κυριότερη από τις οποίες είναι η αδυναμία εφαρμογής τους σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις, αφού η εκτίμηση των παραμέτρων τους γίνεται αποκλειστικά μέσω βαθμονόμησης (Abbot *et al.*, 1986· Beven, 1989). Αντίθετα, οι παράμετροι των μοντέλων φυσικής βάσης θεωρούνται γνωστές, καθώς είναι άμεσα συνδεδεμένες με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος, τα οποία μεταβάλλονται όχι μόνο χωρικά αλλά και χρονικά, λόγω αλλαγών στις χρήσεις γης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι δύο τυπικότεροι εκπρόσωποι των κατανεμημένων σχημάτων φυσικής βάσης, το MIKE SHE και το SWAT, τα οποία έχουν αναπτυχθεί και υποστηρίζονται από ευρωπαϊκά και αμερικάνικα ερευνητικά κέντρα, αντίστοιχα.

2.6.2 Το μοντέλο MIKE SHE

Το MIKE SHE (Système Hydrologique Européenne) είναι ένα δυναμικό εργαλείο ολοκληρωμένης προσομοίωσης του επίγειου υδρολογικού κύκλου. Η ανάπτυξη του μοντέλου ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1980 (Abbot *et al.*, 1986), ενώ η ανάπτυξη του λογισμικού υποστηρίζεται από τη Δανέζικη εταιρεία DHI Software¹.

Το μοντέλο έχει ένα εξαιρετικά ευρύ φάσμα εφαρμογών σε προβλήματα επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων, καθώς και σε προβλήματα περιβάλλοντος, όπως:

- επιπτώσεις στα επιφανειακά νερά λόγω αντλήσεων·
- συνδυασμένη χρήση επιφανειακών και υπόγειων νερών·
- διαχείριση και προστασία υδροβιότοπων·
- διαχείριση λεκάνης απορροής·
- εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων·
- δυναμική επανατροφοδοσία υδροφορέων·
- διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων·
- μελέτες πλημμυρών·
- εκτίμηση επιπτώσεων από αλλαγές στις χρήσεις γης και στο κλίμα·
- εκτίμηση επιπτώσεων από γεωργικές πρακτικές.

Το μοντέλο αναπαριστά τις ακόλουθες διεργασίες (Σχήμα 2.3):

- κατακρήμνιση (βροχόπτωση, χιονόπτωση)·
- εξατμοδιαπνοή, περιλαμβανομένης και της παρεμπόδισης από τη χλωρίδα·
- επίγεια απορροή·
- ροή σε υδατορεύματα / ανοιχτούς αγωγούς·
- ακόρεστη ροή στο έδαφος·
- κορεσμένη υπόγεια ροή.

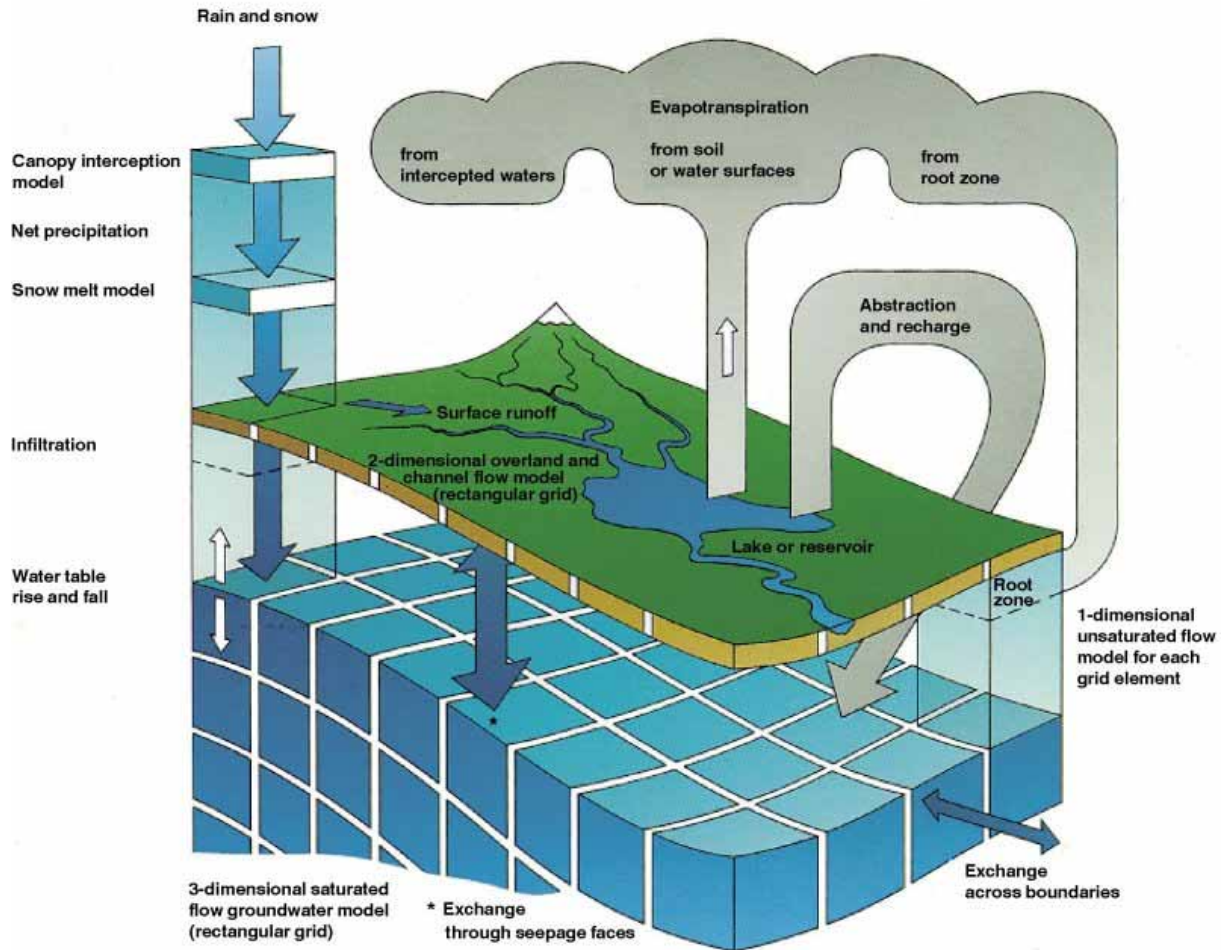
Για κάθε διεργασία, το MIKE SHE παρέχει εναλλακτικούς τρόπους μαθηματικής περιγραφής, που κυμαίνονται από απλές, συγκεντρωτικές προσεγγίσεις έως εξελιγμένες, κατανεμημένες προσεγγίσεις φυσικής βάσης. Οι εν λόγω προσεγγίσεις μπορούν να συνδυαστούν με μεγάλη ευελιξία, παρέχοντας έτσι στο χρήστη τη δυνατότητα να προσαρμόσει το μοντέλο στο υδρολογικό πρόβλημα που εξετάζεται και στα διαθέσιμα δεδομένα.

Αν στη σχηματοποίηση του μοντέλου περιλαμβάνεται η ακόρεστη ζώνη, τότε το MIKE SHE υπολογίζει τη διήθηση, την πραγματική εξατμοδιαπνοή και την τροφοδοσία του υδροφορέα (κατείσδυση), διαφορετικά η κατείσδυση δίνεται από το χρήστη. Τα υδρολογικά δεδομένα μπορεί να είναι σταθερές τιμές ή χρονοσειρές, που αναφέρονται είτε σε σημεία του χώρου (οπότε κατανέμονται με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen) είτε σε κυψέλες κανάβου. Για την εκτίμηση της κατείσδυσης, το MIKE SHE συνεργάζεται και με το εξειδικευμένο πρόγραμμα DAISY GIS, που είναι ένα μονοδιάστατο μοντέλο φυσικής βάσης, που προσομοιώνει τη ροή του νερού σε κατακόρυφες εδαφικές στρώσεις, παράγοντας χάρτες κατανεμημένης κατείσδυσης.

Η ακόρεστη ζώνη αποτελεί τη διεπιφάνεια μεταξύ των επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων. Το μοντέλο ακόρεστης ροής του MIKE SHE είναι ένα μοντέλο εδαφικού προφίλ, που αλληλεπιδρά τόσο με την επίγεια ροή (μέσω της επιλίμνασης των υδάτων στην επιφάνεια του εδάφους) όσο και με το μοντέλο υπόγειων νερών (αφού η στάθμη του υδροφορέα αποτελεί την κατώτατη οριακή συνθήκη της ακόρεστης ζώνης). Το MIKE SHE παρέχει τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις, και συγκεκριμένα: (α) ένα απλό μοντέλο υδατικού ισοζυγίου, που υποθέτει διακριτοποίηση της ακόρεστης ζώνης σε δύο

¹ Αναλυτικές πληροφορίες δίνονται στην ηλεκτρονική διεύθυνση <http://www.dhisoftware.com/mikeshe>

περιοχές, (β) ένα μοντέλο ροής με βαρύτητα, και (γ) ένα πλήρες μοντέλο επίλυσης των εξισώσεων Richards. Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται ο προσδιορισμός ορισμένων χαρακτηριστικών του εδάφους. Το μοντέλο ακόρεστης ροής συνεργάζεται με το μοντέλο εξατμοδιαπνοής, η οποία εκτιμάται με βάση τη δυναμική εξατμοδιαπνοή, τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία και τα χαρακτηριστικά της χλωρίδας.



Σχήμα 2.3: Αλληλουχία υδρολογικών διεργασιών που προσομοιώνει το μοντέλο MIKE SHE.

Για την προσομοίωση της υπόγειας ροής, το MIKE SHE περιλαμβάνει ένα διδιάστατο και ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων διαφορών, που ακολουθεί παρόμοια προσέγγιση με το γνωστό μοντέλο MODFLOW. Η γεωλογία περιγράφεται με τη μορφή ζωνών (layers) ή φακών (lenses), στα οποία δίνονται χαρακτηριστικές υδραυλικές ιδιότητες. Οι τελευταίες ορίζονται είτε ανά κυψέλη είτε ανά περιοχή (πολύγωνο). Για κάθε ζώνη, ο χρήστης δίνει τις οριακές συνθήκες. Ειδικού τύπου όρια είναι ο λίμνες, τα ποτάμια και οι γεωτρήσεις.

Όσον αφορά στην προσομοίωση της ροής σε ποτάμια, το MIKE SHE συνεργάζεται με το μονοδιάστατο υδροδυναμικό μοντέλο MIKE 11. Το τελευταίο παρέχει υπολογιστικά σχήματα διαφορετικής πολυπλοκότητας, που περιλαμβάνουν από απλά μοντέλα διάδευσης τύπου Muskingum έως σύνθετα σχήματα επίλυσης των εξισώσεων Saint-Venant.

Τέλος, η προσομοίωση της ροής στην επιφάνεια του εδάφους γίνεται με εφαρμογή ενός σχήματος πεπερασμένων διαφορών, που βασίζεται σε ένα διδιάστατο μοντέλο διάχυσης κύματος. Η επίγεια ροή αλληλεπιδρά με το ποτάμι, την ακόρεστη ζώνη καθώς και τον υδροφορέα.

2.6.3 Το μοντέλο SWAT

Το SWAT (Soil and Water Assessment Tool) είναι ένα ολοκληρωμένο υδρολογικό μοντέλο φυσικής βάσης, που προβλέπει την επίδραση του υδρολογικού κύκλου στο νερό, τα φερτά και τη συγκέντρωση των χημικών ουσιών, σε μεγάλες και πολύπλοκες λεκάνες απορροής με ποικίλους τύπου εδαφών και χρήσεων γης. Η ανάπτυξη του μοντέλου ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1990, από την USDA Agricultural Research Service¹.

Ως χωρική κλίμακα αναφοράς του μοντέλου νοείται η *μονάδα υδρολογικής απόκρισης*, που δεν ταυτίζεται με κάποια υπολεκάνη αλλά χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη χωρική μεταβλητότητα των υδρολογικών παραμέτρων. Ο χρήστης μπορεί να ορίσει μία ή περισσότερες μονάδες. Στην πρώτη περίπτωση, το μοντέλο λειτουργεί ως συγκεντρωτικό. Στη δεύτερη περίπτωση, το πρόγραμμα ορίζει αυτόματα τις μονάδες, λαμβάνοντας υπόψη τα ποσοστά των εκτάσεων που ορίζει ο χρήστης.

Το μοντέλο προσομοίωσης λειτουργεί σε ημερήσια κλίμακα, και απαιτεί τα ακόλουθα δεδομένα εισόδου:

- ψηφιακό μοντέλο εδάφους·
- ψηφιακός χάρτης με χρήσεις γης·
- ψηφιακό υπόβαθρο υδρογραφικού δικτύου (προαιρετικό)·
- ημερήσιες χρονοσειρές βροχόπτωσης, μέγιστης-ελάχιστης θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας·
- διάφορα κλιματικά χαρακτηριστικά (προαιρετικά), όπως ύψος βροχόπτωσης για διάρκειες 0.5 και 6 ωρών και περίοδο επαναφοράς 10 ετών, κατανομή βροχόπτωσης, στατιστικά χαρακτηριστικά βροχόπτωσης, διαδοχή υγρών-ξηρών ημερών, μέσες μηνιαίες τιμές μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ηλιοφάνεια, σημείου δρόσου, κλπ.

Το μοντέλο εκτιμά τη δυνητική εξατμοδιαπνοή με μία από τις μεθόδους Priestley-Taylor, Penman-Monteith ή Hargreaves.

Οι παράμετροι του μοντέλου είναι:

- παράμετροι καμπυλών SCS (για τη ρύθμιση της επιφανειακής απορροής ανά μονάδα υδρολογικής απόκρισης)·
- χρόνος υστέρησης (εφόσον ο χρόνος συρροής είναι μεγαλύτερος της ημέρας)·
- δείκτης φυλλικής αγωγιμότητας (επιφάνεια φύλλων που καλύπτουν κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης)·
- παράγοντας αντιστάθμισης εξάτμισης εδάφους (λαμβάνει υπόψη την ασυνέχεια των εδαφικών στρωμάτων)·
- διαθέσιμη υγρασία εδαφικού στρώματος (όγκος νερού που θα έπρεπε να είναι διαθέσιμος στα φυτά αν το έδαφος βρισκόταν στην υδατοϊκανότητα)·
- παράγοντας βασικής απορροής ή συντελεστής αποφόρτισης (~ 1 για ήπιες κλίσεις του καθοδικού κλάδου, ~ 0 για απότομες κλίσεις)·
- αρχική αποθήκευση υπόγειου νερού·
- κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα·
- χαρακτηριστικά μεγέθη αβαθή υδροφορέα (ο χρόνος, σε ημέρες, που χρειάζεται το νερό για να κινηθεί από τη ζώνη ριζοστρώματος στον αβαθή υδροφορέα, ποσοστό νερού που κινείται προς τον αβαθή υδροφορέα, ελάχιστο ύψος νερού που απαιτείται ώστε να υπάρξει κίνηση προς τον αβαθή υδροφορέα, ελάχιστο ύψος που απαιτείται για ροή από το υπέδαφος στο ποτάμι)·
- κλάσμα διήθησης βαθιού υδροφορέα

¹ Αναλυτικές πληροφορίες δίνονται στην ηλεκτρονική διεύθυνση <http://www.brc.tamus.edu/swat>

Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να παράξει χρονοσειρές *καιρικών συνθηκών*, χρησιμοποιώντας τα στατιστικά κλιματικά μεγέθη. Επιπλέον, με βάση τη μέση ημερήσια θερμοκρασία, επιμερίζει τα συνολικά κατακρημνίσματα σε βροχόπτωση και χιονόπτωση. Η τήξη του χιονιού υπολογίζεται συναρτήσει της ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας, του σημείου δρόσου και της ταχύτητας του ανέμου. Τέλος, η θερμοκρασία εδάφους υπολογίζεται συναρτήσει της μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας του αέρα, της φυτοκάλυψης και της χιονοκάλυψης.

Το μοντέλο αναπαριστά τις ακόλουθες υδρολογικές διεργασίες:

- επιφανειακή απορροή·
- ροή μέσω των εδαφικών στρωμάτων (διήθηση)·
- ενδιάμεση απορροή·
- υπόγεια απορροή·
- εξατμοδιαπνοή (υπολογίζεται χωριστά για το έδαφος και τα φυτά)·
- τήξη χιονιού·
- απώλειες υδατορευμάτων.

Τέλος, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη του τις λεγόμενες κατασκευές συγκράτησης, που είναι έργα αναχαίτισης της απορροής πάνω σε υδατορεύματα.

Παρόλο που η προσομοίωση των διεργασιών γίνεται σε ημερήσια κλίμακα, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει σε ημερήσιο, μηνιαίο και ετήσιο χρονικό βήμα. Το χαρακτηριστικό αυτό βοηθά στη βαθμονόμηση του μοντέλου, στην περίπτωση που οι χρονοσειρές απόκρισης είναι αραιότερης χρονικής κλίμακας σε σχέση με την κλίμακα προσομοίωσης.

2.7 Μοντέλα υπόγειων νερών

Τα μοντέλα που αναπτύσσονται στους υπόγειους υδροφορείς χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: μαύρου κουτιού (black box), εννοιολογικά (conceptual) και φυσικής βάσης (physically based).

Τα μοντέλα μαύρου κουτιού έχουν στόχο τον προσδιορισμό μιας συναρτησιακής μορφής που να εκφράζει τη σχέση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου ενός προβλήματος. Αυτή η συναρτησιακή μορφή δεν βασίζεται στην αναπαράσταση φυσικών διεργασιών, δηλαδή δεν απαιτείται η κατανόηση του μηχανισμού που συνδέει την είσοδο με την έξοδο ενός συστήματος εξ ου και το όνομα μαύρου κουτιού. Στόχος είναι η ρύθμιση ενός αδιαφανούς μηχανισμού που αναλαμβάνει να παράξει την παρατηρημένη έξοδο για μια γνωστή είσοδο. Στην υδρολογία δύο είναι τα βασικά μοντέλα μαύρου κουτιού, η *συνέλιξη* και τα *νευρωνικά δίκτυα*.

Τα εννοιολογικά μοντέλα βασίζονται σε σχέσεις που αποδίδουν την κύρια διεργασία ενός συστήματος χωρίς χωρική κατανομή. Συνέπεια αυτού είναι ότι επιστρατεύονται για την περιγραφή του συστήματος συνήθως διαφορικές εξισώσεις με αναλυτικές λύσεις. Τα εννοιολογικά μοντέλα είναι φειδωλά ως προς τις απαιτούμενες παραμέτρους το οποίο συνεπάγεται μειωμένες απαιτήσεις δεδομένων και εύκολη ρύθμιση. Από την άλλη η έλλειψη χωρικής κατανομής είναι μειονέκτημα σε περίπτωση που υπάρχουν κατανεμημένες μετρήσεις πεδίου ή όταν απαιτείται να προσομοιωθούν μεταβλητές με χωρική κατανομή (υδραυλικό ύψος). Πρώτος ο Maillet (1905) σχεδόν εκατό χρόνια πριν, εισήγαγε το πρώτο εννοιολογικό μοντέλο στην υπόγεια υδρολογία χρησιμοποιώντας ένα γραμμικό στοιχείο αποθήκευσης (δεξαμενή) με ένα άνοιγμα στην βάση του για να μοντελοποιήσει το υδρογράφημα μιας πηγής.

Τα μοντέλα φυσικής βάσης επιχειρούν να περιγράψουν τις συνθήκες ροής σε όλα τα σημεία του υδροφορέα με την επίλυση μιας διαφορικής εξίσωσης με μερικές παραγώγους. Η επίλυση αυτή γίνεται συνήθως με αριθμητικά σχήματα εκτός από το μοντέλο του Strack (1999) που βασίζεται στην

τεχνική των αναλυτικών στοιχείων. Δύο είναι τα επικρατέστερα μοντέλα αυτής της κατηγορίας. Το MODFLOW (McDonald, 1998) που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και το FEFLOW (Kolditz, 1995) που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με τη μέθοδο προσέγγισης Galerkin. Το πλεονέκτημα αυτών των μοντέλων είναι ότι οι παράμετροι τους έχουν φυσικό νόημα και άρα μπορούν προκύψουν από μετρήσεις πεδίου. Τα βασικά μειονεκτήματα τους είναι η εξάρτηση από μεγάλο πλήθος εξειδικευμένων δεδομένων που συνήθως δεν είναι διαθέσιμα και η ανάγκη για χωρική διακριτοποίηση με μεγάλο αριθμό κυττάρων το οποίο επιφέρει μεγάλο υπολογιστικό φόρτο.

3 Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

3.1 Γενικά

Σε πολύπλοκα υδροσυστήματα, στα οποία οι φυσικές διεργασίες επηρεάζονται σημαντικά από τις ανθρώπινες επεμβάσεις, απαιτείται μοντελοποίηση με ολιστική αντίληψη, ώστε να εξασφαλιστεί πιο πιστή αναπαράσταση των μηχανισμών και, συνεπώς, πιο ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων. Το υπολογιστικό σύστημα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ είναι ένα ολοκληρωμένο σχήμα προσομοίωσης, το οποίο υλοποιεί ένα συνδυαστικό (επιφανειακό και υπόγειο) υδρολογικό μοντέλο που αναπαριστά τις διεργασίες στο έδαφος και το υπέδαφος, σε συνδυασμό με ένα σχήμα διαχείρισης συστημικού προσανατολισμού, το οποίο εκτιμά τις πραγματικές απολήψεις του υδροσυστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς των τεχνικών έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων.

Ως προς τη χωρική κλίμακα αναπαράστασης των διεργασιών, το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ βασίζεται σε μια ημικατανεμημένη προσέγγιση, εκτιμώντας το ισοζύγιο των υδατικών πόρων σε χαρακτηριστικά σημεία (κόμβοι) του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής. Ως προς τη χρονική κλίμακα, το μοντέλο χρησιμοποιεί, στην τυπική του εκδοχή, μηνιαίο ή ημερήσιο χρονικό βήμα, ενώ στην εξελιγμένη του εκδοχή είναι δυνατή η εφαρμογή ακόμα λεπτότερου βήματος, με την ενσωμάτωση διαδικασιών διόδευσης.

Το πρόγραμμα συνεργάζεται με σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας (ΣΓΠ) για την παραγωγή των γεωγραφικών δεδομένων, με τη μορφή θεματικών επιπέδων (βλ. Κεφ. 4). Επιπλέον, χρησιμοποιεί υδρολογικά και διαχειριστικά δεδομένα εισόδου (στόχοι, περιορισμοί), για την προσαρμογή του μοντέλου στις παρατηρημένες συνθήκες του παρελθόντος (βαθμονόμηση παραμέτρων). Για τον σκοπό αυτό, έχει υλοποιηθεί μια αυτόματη διαδικασία, που βασίζεται σε πολλαπλά κριτήρια επίδοσης και εξελιγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης (βλ. Κεφ. 5).

3.2 Θεμελιώδεις απαιτήσεις

Το υπολογιστικό σύστημα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ υλοποιεί ένα σχήμα συνδυασμένης προσομοίωσης των επιφανειακών και υπόγειων νερών. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία σε λεκάνες με διαπερατό υπόβαθρο, όπου υπάρχουν σημαντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διεργασιών του εδάφους και του υπεδάφους, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη σημαντικής βασικής απορροής που προέρχεται από την τροφοδοσία του υδροφορέα από ανάντη επιφανειακά νερά.

Στις θεμελιώδεις απαιτήσεις του μοντέλου εντάσσεται και η περιγραφή των αλληλεπιδράσεων των φυσικών διεργασιών με τις ανθρωπογενείς επεμβάσεις. Η προσέγγιση αυτή απουσιάζει από τα περισσότερα υδρολογικά μοντέλα, κάτι που περιορίζει την επιχειρησιακή τους εφαρμογή σε αδιατάρακτες, πρακτικά, λεκάνες. Αντίθετα, στον μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, η αναπαράσταση των εν λόγω διεργασιών γίνεται λαμβάνοντας πλήρως υπόψη τη λειτουργία των τεχνικών έργων (διατάξεις εκτροπής, αρδευτικά δίκτυα, συστήματα γεωτρήσεων), κάτι που επιτρέπει τη διερεύνηση των επιπτώσεων στο υδατικό δυναμικό της λεκάνης έναντι συγκεκριμένων πολιτικών διαχείρισης (π.χ. επιπτώσεις στην επιφανειακή απορροή από την εντατική εκμετάλλευση των ανάντη γεωτρήσεων). Με

τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η ασφαλής εκτίμηση του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού, επιφανειακού και υπόγειου, σε καθορισμένα σημεία ελέγχου του υδροσυστήματος.

Στο μοντέλο επιχειρείται μια προσέγγιση φυσικής βάσης (δεδομένου ότι η σχηματοποίηση του συστήματος γίνεται με χρήση κατανεμημένης γεωγραφικής πληροφορίας), διατηρώντας, ωστόσο, μια μαθηματική δομή φειδωλή σε παραμέτρους. Αυτό επιτυγχάνεται με την εννοιολογική συσχέτιση των υδρολογικών διεργασιών με τα γεωμορφολογικά και φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης. Για το λόγο αυτό, σε αντίθεση με τα συνήθη ημικατανεμημένα σχήματα που εφαρμόζουν διαφορετικές παραμέτρους για κάθε υπολεκάνη, δηλαδή για χωρικές ενότητες με σαφή γεωγραφικά όρια, στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ η παραμετροποίηση γίνεται στις μονάδες υδρολογικής απόκρισης, δηλαδή σε ακανόνιστες χωρικές ενότητες που προσδιορίζονται με βάση τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος.

Σε αντίθεση με τα περισσότερα κατανεμημένα μοντέλα φυσικής βάσης που απαιτούν πολύ μεγάλο όγκο γεωγραφικής πληροφορίας, οι απαιτήσεις του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ σε δεδομένα είναι όσο το δυνατό πιο περιορισμένες. Στην πράξη, η σχηματοποίηση μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας αποκλειστικά και μόνο το ψηφιακό μοντέλο της λεκάνης. Από την άλλη πλευρά, με την αύξηση της διαθέσιμης πληροφορίας, βελτιώνεται η γνώση όσον αφορά στα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος, που έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη παραμετροποίηση του μοντέλου. Στους βασικούς στόχους εντάσσεται και η αξιοποίηση του συνόλου της διαθέσιμης υδρολογικής πληροφορίας, έτσι ώστε ακόμη και σποραδικές μετρήσεις ή και χονδροειδείς εκτιμήσεις των υδρολογικών μεγεθών να λαμβάνονται υπόψη στην εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου.

3.3 Συνιστώσες και δεδομένα εισόδου

Ως προς την αναπαράσταση του φυσικού συστήματος, η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε διάφορα θεματικά επίπεδα, και συγκεκριμένα:

- το *επιφανειακό σύστημα*, που περιλαμβάνει το υδρογραφικό δίκτυο, τις υπολεκάνες ανάντη κάθε κόμβου του δικτύου και τις πηγές·
- τις *μονάδες υδρολογικής απόκρισης*, που είναι γεωγραφικές ενότητες με κοινά γεωλογικά, γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά·
- το *υπόγειο σύστημα* (υδροφορέας) που αναπαρίσταται ως ένα σύστημα κυττάρων πολυγωνικού σχήματος, σε κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί μια εννοιολογική δεξαμενή αποθήκευσης του υπόγειου νερού·
- το *υδροσύστημα*, δηλαδή μια σχηματική αναπαράσταση για την διαχείριση των υδατικών πόρων της λεκάνης (επιφανειακών και υπόγειων), που περιλαμβάνει, εκτός από το υδρογραφικό δίκτυο, τα υδραυλικά έργα (υδραγωγεία, έργα εκτροπής, ομάδες γεωτρήσεων) και τα σημεία ζήτησης (π.χ., αρδευτικοί κόμβοι).

Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ χρησιμοποιεί γεωγραφικά, υδρολογικά και διαχειριστικά δεδομένα εισόδου. Συγκεκριμένα, σε μια ολοκληρωμένη εφαρμογή, ζητούνται οι ακόλουθες κατηγορίες δεδομένων:

- *Συνιστώσες επιφανειακής υδρολογίας*: ψηφιακό μοντέλο εδάφους, υδρογραφικό δίκτυο (κόμβοι και κλάδοι υδατορευμάτων), υπολεκάνες, γεωλογία, υδατοπερατότητα, κάλυψη γης, μονάδες υδρολογικής απόκρισης, σταθμοί μέτρησης.
- *Συνιστώσες υπόγειας υδρολογίας*: κύτταρα υδροφορέα, πηγές, γεωτρήσεις.
- *Συνιστώσες διαχείρισης υδατικών πόρων*: κόμβοι απόληξης, υδραγωγεία, ομάδες γεωτρήσεων, αρδευόμενες εκτάσεις, χρήσεις νερού, λειτουργικοί περιορισμοί υδροσυστήματος.
- *Χρονοσειρές*: επιφανειακή βροχόπτωση και δυνητική εξατμοδιαπνοή (ανά υπολεκάνη), υδατικές ανάγκες, χρονοσειρές ελέγχου (μετρημένες παροχές ποταμών και πηγών, παρατηρημένες στάθμες υδροφορέα).

- *Δεδομένα σεναρίου*: υπολογιστικές συνιστώσες διαδικασιών προσομοίωσης και βαθμονόμησης.

Τα δεδομένα εισόδου με γεωαναφορά παράγονται με την εφαρμογή τυποποιημένων αλγορίθμων, σε περιβάλλον ArcGIS (βλ. Κεφ. 4). Το σύνολο των δεδομένων αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων, και στη συνέχεια ανακτώνται από το κύριο πρόγραμμα του συστήματος ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

3.4 Σχηματοποίηση επιφανειακού συστήματος

3.4.1 Υδρογραφικό δίκτυο

Όπως έχει αναφερθεί, το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ βασίζεται σε μια ημικατανεμημένη διακριτοποίηση της λεκάνης. Αυτό προϋποθέτει τη διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης, τον ορισμό των σημείων ελέγχου (κόμβοι) και τη χάραξη των υπολεκανών ανάντη κάθε κόμβου.

Ως υδρογραφικό δίκτυο νοείται το κύριο υδατόρευμα της λεκάνης καθώς και συμβάλλοντες κλάδοι σε αυτό. Η σχηματοποίηση του δικτύου γίνεται με τη βοήθεια συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας, χρησιμοποιώντας ως υπόβαθρο το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της λεκάνης και ορίζοντας κατάλληλο όριο στη συνάρτηση συγκέντρωσης της απορροής (βλ. 4.3.1). Όσο μικρότερο είναι το εν λόγω όριο, τόσο πυκνότερο είναι το δίκτυο που διαμορφώνεται. Το δίκτυο, που στη γενική περίπτωση είναι δενδροειδούς τύπου, ορίζεται μέσω των κόμβων, και πρέπει απαραίτητα να καταλήγει σε ένα τελικό σημείο, δηλαδή την έξοδο της λεκάνης. Η διαδρομή μεταξύ δύο κόμβων καλείται *τμήμα υδατορεύματος*, με χαρακτηριστικά μεγέθη το μήκος, την τυπική διατομή (τραπεζοειδούς μορφής) και τον συντελεστή διήθησης, δ . Ο τελευταίος είναι αδιάστατη παράμετρος, που εκφράζει το ποσοστό της διερχόμενης παροχής που κατεισδύει προς τον υπόγειο υδροφορέα από τον πυθμένα και τα πρανή της διατομής.

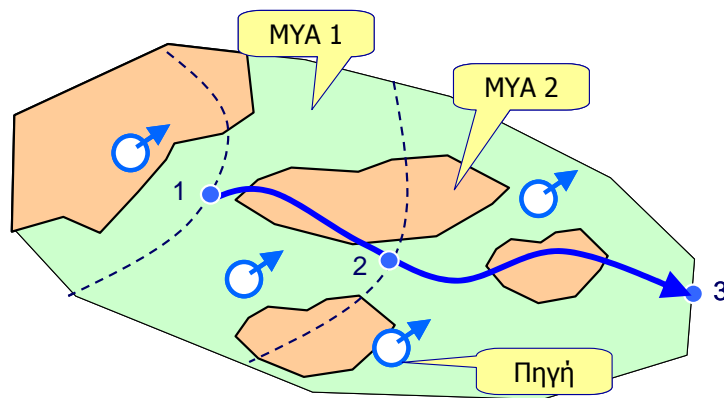
Οι κόμβοι τοποθετούνται στην έξοδο της λεκάνης (όπου συγκεντρώνεται το σύνολο της απορροής), στα σημεία συμβολής των κλάδων καθώς και σε ενδιάμεσες θέσεις, στις οποίες ζητείται ο υπολογισμός της παροχής. Τέτοιες μπορεί να είναι θέσεις υδρομετρικών σταθμών, όπου ελέγχεται η προσαρμογή των προσομοιωμένων παροχών στις μετρημένες, θέσεις πραγματοποίησης απολήψεων καθώς και θέσεις εισροής νερού (π.χ. κατάντη φραγμάτων). Ακόμη, μπορεί να είναι θέσεις εισροής σημειακών ρυπαντικών φορτίων, όπως και σημεία μέτρησης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού. Ανάντη κάθε κόμβου μπορούν να συμβάλλουν ένας ή περισσότεροι κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου, ενώ κατάντη επιτρέπεται να ξεκινά ένας και μόνο κλάδος. Επιπλέον, οι κόμβοι του υδρογραφικού δικτύου μπορούν να συνδέονται με απεριόριστο αριθμό υδραγωγείων.

Ανάντη των κόμβων χαράσσονται οι υδροκρίτες, με τρόπο ώστε σε κάθε κλάδο του υδρογραφικού δικτύου να αντιστοιχεί μία και μόνο υπολεκάνη. Ανάντη των ακραίων κόμβων του δικτύου ορίζεται επίσης μία και μοναδική υπολεκάνη, η απορροή της οποίας θεωρείται ότι συγκεντρώνεται ακαριαία στον αντίστοιχο κόμβο, μέσω μικρών χειμάρρων που καταλήγουν σε αυτόν, χωρίς να σχηματίζουν κάποιο εμφανές κύριο υδατόρευμα. Επιπλέον, κάθε σημείο επιφανειακής εκφόρτισης του υδροφορέα (πηγή) θεωρείται ότι ανήκει σε συγκεκριμένη υπολεκάνη.

Οι χρονοσειρές εισόδου κάθε υπολεκάνης είναι η επιφανειακή βροχόπτωση και η δυνητική εξατμοδιαπνοή. Μέσω του μοντέλου προσομοίωσης προκύπτουν η (κατανεμημένη) επιφανειακή απορροή κάθε υπολεκάνης, καθώς και η απορροή όλων των πηγών που ανήκουν στη συγκεκριμένη υπολεκάνη (βασική ή υπόγεια απορροή). Τα δύο μεγέθη θεωρείται ότι μεταφέρονται στον αμέσως κατάντη κόμβο, με τη μορφή σημειακής πλευρικής εισροής.

3.4.2 Μονάδες υδρολογικής απόκρισης

Η μονάδα υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ) αποτελεί θεμελιώδη έννοια της προσέγγισης που ακολουθείται. Ως τέτοια νοείται μια χωρική ενότητα της λεκάνης, με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Ο όρος εισήχθη από τον Flügel (1995) και χρησιμοποιείται σε φυσικής βάσης μοντέλα, όπως το SWAT (βλ. 2.6.3), αλλά με μια πιο στενή έννοια. Αντίθετα, στην ΥΔΡΟΓΕΙΟ, ο ΜΥΑ δεν αναφέρεται σε μια αυστηρά οριοθετημένη περιοχή, αλλά ένα σύνολο από πολλά μικρά ανεξάρτητα τμήματα, τυχαίας γεωμετρίας. Σε κάθε ΜΥΑ, ο μηχανισμός γέννησης της απορροής θεωρείται ενιαίος, κάτι που εκφράζεται με τη χρήση κοινών παραμέτρων σε όλη την έκταση που καλύπτει η συγκεκριμένη μονάδα. Με τον τρόπο, η παραμετροποίηση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών, αντί να γίνεται με βάση τις υπολεκάνες, όπως συνηθίζεται στα ημικαταναμημένα υδρολογικά μοντέλα, γίνεται με βάση τις ΜΥΑ, κάτι που αποτελεί πρακτική των πλέον καταξιωμένων καταναμημένων εφαρμογών. Με άλλα λόγια, αντί μιας μοντελοποίησης τύπου «μαύρου κουτιού», που θα προέκυπτε εφόσον οι παράμετροι ορίζονταν με βάση γεωγραφικά όρια, ακολουθείται μια μοντελοποίηση φυσικής βάσης, στην οποία οι παράμετροι συνδέονται, έστω και εννοιολογικά, με χαρακτηριστικά μεγέθη του φυσικού συστήματος που αναμένεται να επηρεάζουν τις υδρολογικές διεργασίες.



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα σχηματοποίησης υδροσυστήματος που αποτελείται από τρεις υπολεκάνες και δύο μονάδες υδρολογικής απόκρισης.

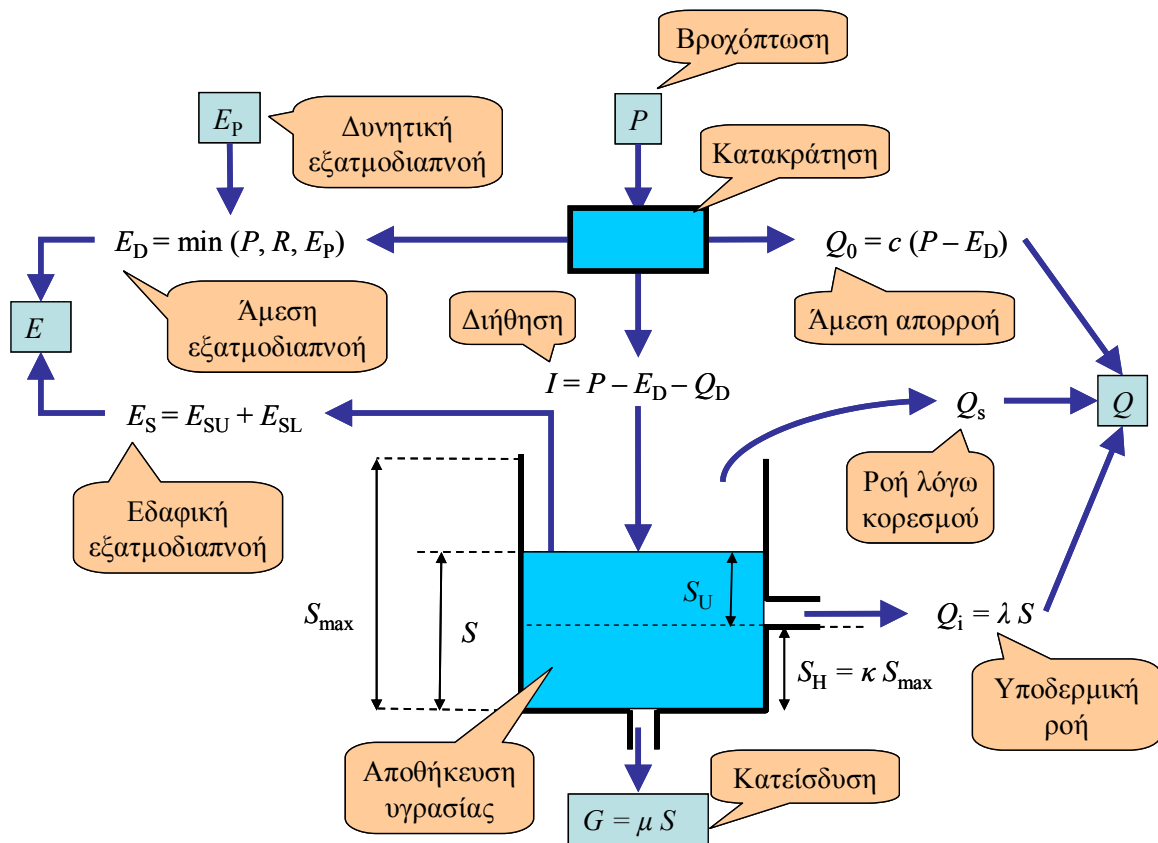
Λόγω του καταναμημένου χαρακτήρα της προσέγγισης, η σχηματοποίηση των ΜΥΑ προϋποθέτει τη χρήση κατάλληλων υπολογιστικών εργαλείων σε περιβάλλον ArcGIS. Οι ΜΥΑ ορίζονται ως ενώσεις (unions) μεταξύ θεματικών επιπέδων, που απεικονίζουν καταναμημένη πληροφορία ταξινομημένη σε κατηγορίες, όπως η γεωλογία, η κάλυψη του εδάφους, οι κλίσεις που αναπτύσσονται, κλπ. (βλ. 4.3.9). Πρόκειται για χαρακτηριστικά που προφανώς σχετίζονται με τους μηχανισμούς γέννησης της απορροής. Για παράδειγμα, αν διατίθεται ψηφιακά υπόβαθρα με n_A τύπους από το χαρακτηριστικό A και n_B τύπους από το χαρακτηριστικό B, τότε με την ένωση των δύο υποβάθρων προκύπτουν $n_A \times n_B$ συνδυασμοί των δύο χαρακτηριστικών της λεκάνης, σε κάθε έναν από τους οποίους αντιστοιχεί διαφορετική ΜΥΑ, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του Σχήματος 3.1.

Επισημαίνεται ότι το πλήθος των παραμέτρων είναι ευθέως ανάλογο του αριθμού των ΜΥΑ. Κατά συνέπεια, η σχηματοποίησή τους πρέπει να γίνεται με προσοχή, λαμβάνοντας υπόψη τη διαθέσιμη υδρολογική πληροφορία (μετρήσεις παροχής) για την υποστήριξη της παραμετροποίησης που επιλέγεται. Διαφορετικά, υπάρχει κίνδυνος διαμόρφωσης υπερ-παραμετροποιημένων σχημάτων προσομοίωσης, τα οποία είναι ευαίσθητα στις μεταβολές των παραμέτρων, βαθμονομούνται δύσκολα και διαθέτουν μειωμένη προγνωστική ικανότητα.

3.5 Προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών εδάφους

3.5.1 Δομή μοντέλου εδαφικής υγρασίας

Η προσομοίωση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών σε ένα εδαφικό στοιχείο μοναδιαίας επιφάνειας γίνεται μέσω ενός εννοιολογικού μοντέλου συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας, που αναπαριστά το μηχανισμό μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε απορροή, εξατμοδιαπνοή και κατείδυση προς τον υπόγειο υδροφόρο. Το μοντέλο εντάσσεται στην κατηγορία των αδιαμερίστων εννοιολογικών σχημάτων υδατικού ισοζυγίου (βλ. 2.4), που έχουν τύχει ευρείας εφαρμογής διεθνώς, καθώς χρησιμοποιώντας απλές υποθέσεις σχετικά με τη λειτουργία των φυσικών μηχανισμών και μικρό πλήθος παραμέτρων, επιτυγχάνουν καλή προσαρμογή ακόμη και στην περίπτωση εξαιρετικά πολύπλοκων συστημάτων. Υπενθυμίζεται ότι οι παράμετροι των εννοιολογικών μοντέλων, αν και δεν έχουν απόλυτη φυσική ερμηνεία, μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές κάποιων μέσων χαρακτηριστικών του εδάφους, καθώς εξαρτώνται από παράγοντες όπως η κλίση, η διαπερατότητα των πετρωμάτων, η φυτοκάλυψη, κλπ.



Σχήμα 3.2: Σχηματική παράσταση των διεργασιών του μοντέλου εδαφικής υγρασίας.

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2, η υδρολογική λειτουργία του εδαφικού στοιχείου εξομοιώνεται με τη λειτουργία μιας εννοιολογικής δεξαμενής συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας, χωρητικότητας S_{max} . Η δεξαμενή, που είναι ανοιχτή από πάνω, παρέχει τη δυνατότητα πλευρικής και κατακόρυφης εκροής νερού, καθώς και εκροής λόγω υπερχειλίσεως. Η πλευρική εκροή πραγματοποιείται μέσω μιας οπής που βρίσκεται σε στάθμη $S_H = \kappa S_{max}$, ενώ η κατακόρυφη μέσω οπής που βρίσκεται στον πυθμένα. Ο ρυθμός πραγματοποίησης της πλευρικής και κατακόρυφης εκροής ελέγχεται μέσω των συντελεστών στείρευσης λ και μ , αντίστοιχα. Το απόθεμα της δεξαμενής αναπαριστά την αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους. Η τελευταία, με βάση το όριο κ , χωρίζεται

σε δύο περιοχές (άνω και κάτω ζώνη), στις οποίες διαφοροποιείται ο μηχανισμός εξάτμισης, όπως εξηγείται παρακάτω. Η εισροή στη δεξαμενή αναπαριστά τη φυσική διεργασία της διήθησης.

Έστω t ο δείκτης που αναφέρεται στο χρονικό διάστημα $[\tau, \tau + \Delta\tau]$, όπου $\Delta\tau$ το βήμα της προσομοίωσης. Στο διάστημα αυτό θεωρούνται γνωστά η συνολική κατακρήμνιση, P_t , η δυναμική εξατμοδιαπνοή, $E_{p,t}$, και η αποθήκευση εδαφικής υγρασίας στην αρχή του χρονικού διαστήματος, S_t . Ζητούμενο είναι η εκτίμηση της απορροής Q_t , της πραγματικής εξατμοδιαπνοής E_t , της κατεΐσδυσης G_t , και της εδαφικής υγρασίας στο πέρας του χρονικού διαστήματος, S_{t+1} . Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου γράφεται:

$$S_{t+1} = S_t + P_t - Q_t - E_t - G_t \quad (3.1)$$

Όπως αναλύεται στη συνέχεια, η παραπάνω σχέση επιλύεται με βάση ορισμένες εύλογες παραδοχές ως προς τα άγνωστα μεγέθη Q_t , E_t , και G_t . Η αποθήκευση εδαφικής υγρασίας, S_t , που είναι μεταβλητή κατάστασης του μοντέλου, προϋποθέτει γνώση της αρχικής συνθήκης, S_0 , στο χρόνο $t = 0$. Εφόσον η προσομοίωση ξεκινά στην αρχή του υδρολογικού έτους, η αρχική τιμή της εδαφικής υγρασίας μπορεί να θεωρηθεί ίση με μηδέν.

Η απορροή Q_t επιμερίζεται σε τρεις συνιστώσες:

- την άμεση απορροή, $Q_{D,t}$, που εκφράζει την ποσότητα της βροχής που μετασχηματίζεται σε απορροή εντός του χρονικού βήματος, χωρίς να τροφοδοτήσει τη δεξαμενή·
- τη ροή λόγω κορεσμού (ταχεία απορροή), $Q_{S,t}$, που εκφράζει την απορροή που πραγματοποιείται λόγω κορεσμού του εδάφους σε υγρασία, και αναπαρίσταται ως υπερχειλίση της δεξαμενής·
- την υποδερμική ροή, $Q_{i,t}$, που εκφράζει την πλευρική αποστράγγιση του εδάφους, η οποία πραγματοποιείται με χρονική υστέρηση, και αναπαρίσταται ως εκροή από την οριζόντια οπή της δεξαμενής.

Η πραγματική εξατμοδιαπνοή, που είναι εξ ορισμού μικρότερη ή ίση με τη δυναμική και θεωρείται υδρολογική απώλεια, περιλαμβάνει δύο συνιστώσες:

- την άμεση εξατμοδιαπνοή, $E_{D,t}$, που αναφέρεται στον ταχύ μετασχηματισμό μέρους της βροχής σε απώλειες λόγω εξάτμισης, από νερό που κατακρατείται επιφανειακά και δεν προλαβαίνει να διηθηθεί στο έδαφος, και
- την εδαφική εξατμοδιαπνοή, $E_{S,t}$, που αναφέρεται στην ικανοποίηση του ελλείμματος της δυναμικής εξατμοδιαπνοής μέσω της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας στην ανώτερη και κατώτερη ακόρεστη εδαφική ζώνη.

Τέλος, η κατεΐσδυση, G_t , αναφέρεται στην κατακόρυφη μεταφορά νερού από τα ανώτερα (ακόρεστη ζώνη) προς τα κατώτερα (κορεσμένη ζώνη) στρώματα του εδάφους, που αναπαρίσταται ως εκροή από την οπή στον πυθμένα της δεξαμενής. Επισημαίνεται ότι η κατεΐσδυση είναι ταυτόχρονα μεταβλητή εξόδου του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας και μεταβλητή εισόδου (φόρτιση) του μοντέλου υπόγειας υδρολογίας.

3.5.2 Υπολογιστική διαδικασία

Η λειτουργία του μοντέλου έχει ως εξής: Αρχικά, υπολογίζεται η εισροή λόγω διήθησης, η οποία προκύπτει αφαιρώντας από την βροχόπτωση την άμεση εξατμοδιαπνοή, $E_{D,t}$, και την άμεση απορροή, $Q_{D,t}$. Υπενθυμίζεται ότι η πρώτη υποδηλώνει την ποσότητα βροχής που κατακρατείται επιφανειακά και εξατμίζεται, μην προλαβαίνοντας να διηθηθεί στο έδαφος. Η κατακράτηση οφείλεται στην παγίδευση μέρους νερού στις μικροκοιλότητες του εδάφους και τα φυλλώματα, και δεν μπορεί να ξεπεράσει την ποσότητα R , που αποτελεί παράμετρο του μοντέλου, με διαστάσεις ισοδύναμου ύψους νερού. Με την παραπάνω παραδοχή, η άμεση εξατμοδιαπνοή εκτιμάται από τη σχέση:

$$E_{dt} = \min (P_t, R, E_{Pt}) \quad (3.2)$$

Η άμεση απορροή εκφράζει το ποσοστό της περίσσειας βροχής που μετασχηματίζεται σε απορροή εντός του χρονικού βήματος, χωρίς να τροφοδοτήσει τη δεξαμενή, και δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{Dt} = c (P_t - E_{Dt}) \quad (3.3)$$

όπου c αδιάστατη παράμετρος του μοντέλου.

Η διήθηση στο έδαφος, δηλαδή η τροφοδοσία της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας, υπολογίζεται από την σχέση:

$$I_t = P_t - E_{Dt} - Q_{Dt} \quad (3.4)$$

Λόγω της διήθησης, το απόθεμα εδαφικής υγρασίας της δεξαμενής αυξάνει σε:

$$S_t^* = S_t + I_t \quad (3.5)$$

Επισημαίνεται ότι το τρέχον απόθεμα S_t^* ενδέχεται να ξεπερνά τη χωρητικότητα της δεξαμενής, S_{\max} . Πρακτικά, η περίσσεια εδαφικής υγρασίας πάνω από το όριο υπερχειλίσης αντιπροσωπεύει την ποσότητα νερού που δεν μπορεί να απορροφηθεί από το κορεσμένο έδαφος, οπότε αφήνεται να λιμνάσει και, ακολούθως, μέρος του να εξατμιστεί και μέρος του να κατεισδύσει. Η υπόθεση αυτή επιτρέπει την παραγωγή πιο ρεαλιστικών αποκρίσεων, οι οποίες είναι συνεπείς με την μεταβλητότητα της βροχόπτωσης. Το απόθεμα S_t^* κατανέμεται στις δύο ζώνες της δεξαμενής ως εξής:

$$S_{Ut} = \min (0, S_t^* - S_H), S_{Lt} = S_t^* - S_{Ut} \quad (3.6)$$

όπου S_{Ut} το απόθεμα της ανώτερης και S_{Lt} το απόθεμα της κατώτερης ζώνης.

Οι εκροές από τη δεξαμενή οφείλονται στην εδαφική εξατμοδιαπνοή από την ανώτερη και κατώτερη ζώνη, την πλευρική αποστράγγιση και την κατεισδυση. Η εδαφική εξατμοδιαπνοή, E_{St} , αναφέρεται στην ικανοποίηση του ελλείμματος της δυνητικής εξατμοδιαπνοής μέσω της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας, και πραγματοποιείται κατά προτεραιότητα από την ανώτερη ζώνη, με βάση τη σχέση:

$$E_{SUt} = \min (S_{Ut}, E_{Pt} - E_{Dt}) \quad (3.7)$$

Στη συνέχεια, ποσοστό λ της περίσσειας υγρασίας της ανώτερης ζώνης διαφεύγει πλευρικά μέσω της οριζόντιας οπής, παράγοντας υποδερμική ροή με βάση τη σχέση:

$$Q_{It} = \lambda (S_{Ut} - E_{SUt}) \quad (3.8)$$

Εφόσον το απόθεμα της ανώτερης ζώνης είναι μηδενικό ή δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση για εξατμοδιαπνοή, τότε μέρος του ελλείμματος που προκύπτει καλύπτεται από την αποθήκευση υγρασίας στην κατώτερη ζώνη. Ο σχετικός μηχανισμός βασίζεται στην υπόθεση του Thornthwaite (1948), σύμφωνα με την οποία ο ρυθμός εξάτμισης είναι ανάλογος του βαθμού κορεσμού του εδάφους. Στην προκειμένη περίπτωση, προκύπτει η ακόλουθη ημιεμπειρική σχέση υπολογισμού της επιπλέον εξάτμισης από την κατώτερη ζώνη:

$$E_{SLt} = (E_{Pt} - E_{Dt} - E_{SUt}) [1 - \exp (-S_{Lt} / S_H)] \quad (3.9)$$

Τέλος, η κατεισδυση προς τον υπόγειο υδροφορέα πραγματοποιείται μέσω της οπής στον πυθμένα, και είναι ανάλογη της συνολικής διαθέσιμης υγρασίας (μετά την αφαίρεση των εκροών λόγω εδαφικής εξάτμισης και υποδερμικής ροής) και του συντελεστή στείρευσης μ , δηλαδή: $G_t = \mu S_t^*$.

$$G_t = \mu (S_t^* - E_{SUt} - E_{SLt} - Q_{It}) \quad (3.10)$$

Μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών, εκτιμάται η ροή λόγω κορεσμού του εδάφους σε υγρασία, εφόσον πραγματοποιείται υπερχειλίση της δεξαμενής, από την σχέση:

$$Q_{S_t} = \max (0, S_t^* - E_{SU_t} - E_{SL_t} - Q_{I_t} - G_t - S_{\max}) \quad (3.11)$$

Προφανώς, εφόσον πραγματοποιηθεί υπερχειλίση, το απόθεμα υγρασίας στο πέρας του χρονικού βήματος είναι ίσο με τη χωρητικότητα της δεξαμενής, S_{\max} .

Τέλος, η συνολική εξατμοδιαπνοή και απορροή προκύπτουν ως:

$$E_t = E_{D_t} + E_{S_t} \quad (3.12)$$

$$Q_t = Q_{D_t} + Q_{I_t} + Q_{S_t} \quad (3.13)$$

Με γνωστή τη χρονοσειρά βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής και γνωστή την αρχική συνθήκη S_0 , είναι δυνατή η προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών στο μοναδιαίο εδαφικό στοιχείο, με βήμα-προς-βήμα επίλυση του προβλήματος.

3.5.3 Παράμετροι μοντέλου

Το μοντέλο εδαφικής υγρασίας, στην εκδοχή που παρουσιάζεται παραπάνω έχει έξι παραμέτρους και μία αρχική συνθήκη, που φαίνονται στον Πίνακα 3.1. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι τιμές των παραμέτρων συνδέονται έμμεσα με τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος, και συνεπώς διαφοροποιούνται για κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης. Συγκεκριμένα:

Η χωρητικότητα κατακράτησης της βροχής, R , έχει διαστάσεις ισοδύναμου ύψους νερού. Η σχετική διεργασία περιλαμβάνει δύο συνιστώσες, την παρεμπόδιση τμήματος της βροχής από τη χλωρίδα και την επιφανειακή παγίδευση, δηλαδή την ανακοπή της προσπίπτουσας βροχής λόγω εγκλωβισμού του στο επιφανειακό εδαφικό στρώμα (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 251-253). Στην πράξη, η παράμετρος αυτή εξαρτάται σημαντικά από ανθρωπογενείς παράγοντες, όπως η ανάπτυξη έργων αντιπλημμυρικής προστασίας για συγκράτηση της απορροής, που είναι προφανές ότι επηρεάζουν την υδρολογική συμπεριφορά μιας λεκάνης, καθώς αποθηκεύουν νερό στην επιφάνεια, το οποίο στη συνέχεια εξατμίζεται, προτού να διηθηθεί στο έδαφος.

Το ποσοστό της περισσειας βροχόπτωσης που εμφανίζεται ως άμεση απορροή, c , είναι ένα αδιάστατο μέγεθος, που εξαρτάται από την κλίση του εδάφους, τη φυτοκάλυψη και την έκταση των αδιαπέρατων σχηματισμών της λεκάνης.

Η χωρητικότητα της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας, S_{\max} , με διαστάσεις ισοδύναμου ύψους νερού, εξαρτάται, κυρίως, από τον τύπο του εδάφους και την κλίση. Ειδικότερα, η τιμή της αυξάνει όσο μεταβαίνουμε από αμμώδη σε αργιλικά εδάφη και όσο αυξάνει η κλίση. Σε τυπικά εδαφικά δοκίμια, η εν λόγω χωρητικότητα κυμαίνεται ανάμεσα στα 100-200 mm (Brutsaert, 1982, σ. 243). Ωστόσο, στα μηνιαία εννοιολογικά μοντέλα, η τιμή αυτή είναι συνήθως αρκετά μεγαλύτερη.

Το αδιάστατο κατώφλι του αποθέματος της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας για παραγωγή υποδερμικής ροής, κ , ορίζεται ως ποσοστό της χωρητικότητας S_{\max} , και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Το εν λόγω κατώφλι οριοθετεί τις δύο ζώνες εδαφικής υγρασίας, και είναι προφανές ότι επηρεάζει σημαντικά όχι μόνο τον μηχανισμό παραγωγής υποδερμικής ροής αλλά και τον μηχανισμό παραγωγής της εδαφικής εξατμοδιαπνοής.

Ο συντελεστής στείρευσης λ , που εκφράζει τον ρυθμό εκφόρτισης της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας για παραγωγή πλευρικής (υποδερμικής) ροής, έχει μονάδες αντίστροφου χρόνου, και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους.

Τέλος, ο συντελεστής στείρευσης μ , που εκφράζει τον ρυθμό εκφόρτισης της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας για παραγωγή κατείσδυσης, έχει επίσης μονάδες αντίστροφου χρόνου, και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά τόσο του εδάφους όσο και του υπεδάφους. Προφανώς, όσο μεγαλύτερη είναι η

διαπερατότητα τόσο του εδαφικού υλικού όσο και των υποκείμενων γεωλογικών σχηματισμών, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της παραμέτρου.

Πίνακας 3.1: Παράμετροι μοντέλου εδαφικής υγρασίας.

| Συμβολισμός | Περιγραφή | Διαστάσεις |
|-------------|--|--------------------|
| R | Χωρητικότητα κατακράτησης της βροχής | [L] |
| c | Ποσοστό της περίσσειας της βροχόπτωσης που εμφανίζεται ως άμεση απορροή | Αδιάστατο |
| S_{max} | Χωρητικότητα δεξαμενής εδαφικής υγρασίας | [L] |
| κ | Κατώφλι αποθέματος δεξαμενής εδαφικής υγρασίας για την παραγωγή υποδερμικής ροής | Αδιάστατο |
| λ | Ρυθμός εκφόρτισης δεξαμενής εδαφικής υγρασίας για την παραγωγή υποδερμικής ροής | [T ⁻¹] |
| μ | Ρυθμός εκφόρτισης δεξαμενής εδαφικής υγρασίας για την παραγωγή κατείσδυσης | [T ⁻¹] |
| S_0 | Αρχικό απόθεμα δεξαμενής εδαφικής υγρασίας | [L] |

3.5.4 Υπολογισμός εισροών στο υδρογραφικό δίκτυο

Επειδή οι υδρολογικές μεταβλητές εισόδου, δηλαδή τα ύψη βροχόπτωσης, p_i , και δυναμικής εξατμοδιαπνοής, e_{pi} , διαφοροποιούνται ανά υπολεκάνη i ($i = 1, \dots, NB$), ενώ οι παράμετροι του μοντέλου εδαφικής υγρασίας διαφοροποιούνται ανά μονάδα υδρολογικής απόκρισης j ($j = 1, \dots, NH$), η προσομοίωση των επιφανειακών διεργασιών γίνεται θεωρώντας μια σύνθετη γεωγραφική οντότητα, που προκύπτει από την ένωση των δύο θεματικών επιπέδων. Πρόκειται για τον συνδυασμό υπολεκάνης – μονάδας υδρολογικής απόκρισης (MYA), που αποτελεί την ελάχιστη χωρική μονάδα του επιφανειακού συστήματος. Σε κάθε χρονικό βήμα, και για κάθε τέτοιο συνδυασμό, εφαρμόζεται το μοντέλο εδαφικής υγρασίας, το οποίο εκτιμά τον επιμερισμό του ύψους βροχόπτωσης p_i (που είναι κοινό για όλα τα τμήματα των MYA που ανήκουν στην υπολεκάνη i) σε ισοδύναμα ύψη επιφανειακής απορροής, q_{ij} , πραγματικής εξατμοδιαπνοής, e_{ij} , κατείσδυσης, g_{ij} , και αποθήκευσης υγρασίας, s_{ij} .

Στη συνέχεια, τα παραπάνω μεγέθη ολοκληρώνονται στην επιφάνεια κάθε υπολεκάνης. Αν F_{ij} είναι η κοινή επιφάνεια της υπολεκάνης i με την MYA j , τότε ο όγκος απορροής προκύπτει ως το άθροισμα:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{NH} q_{ij} F_{ij} \quad (3.14)$$

Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζονται τα υπόλοιπα υδρολογικά μεγέθη, δηλαδή οι όγκοι πραγματικής εξατμοδιαπνοής, Q_i , και κατείσδυσης, G_i . Συγκεκριμένα:

$$E_i = \sum_{j=1}^{NH} e_{ij} F_{ij} \quad (3.15)$$

$$G_i = \sum_{j=1}^{NH} g_{ij} F_{ij} \quad (3.16)$$

Επισημαίνεται ότι η εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας προϋποθέτει τον καθορισμό της αρχικής υγρασίας σε κάθε συνδυασμό υπολεκάνης - MYA. Όπως προαναφέρθηκε, εφόσον η προσομοίωση ξεκινά στην αρχή του υδρολογικού έτους, η αρχική υγρασία μπορεί να θεωρηθεί, καταρχήν, μηδενική. Στη συνέχεια, και μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου, η τιμή της αρχικής υγρασίας μπορεί να τεθεί ίση με την τελική (ή ακόμη την μέση εκτίμηση των αντίστοιχων χρονικών περιόδων), εξασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό μόνιμες (steady state) συνθήκες προσομοίωσης.

Στην επιφανειακή απορροή, Q_i , προστίθεται η εκροή όλων των πηγών της υπολεκάνης, δηλαδή η βασική ροή, Q_{bi} . Στο σημείο αυτό, δεχόμαστε ότι η πηγαία απορροή είναι γνωστή από την επίλυση του μοντέλου υπόγειας υδρολογίας, κάτι που στην πράξη επιβάλλει την εφαρμογή μιας επαναληπτικής διαδικασίας (βλ. 3.8). Στη συνέχεια, το σύνολο της απορροής μεταφέρεται ως συγκεντρωμένη εισροή στον κόμβο εξόδου, αφού αφαιρεθούν οι απώλειες προς τον υδροφορέα, κατά τη διαδρομή του νερού στο αντίστοιχο υδατόρευμα της υπολεκάνης. Οι απώλειες αυτές εκτιμώνται από την σχέση:

$$\delta_i = \theta_i (Q_i + Q_{bi}) / F_i \quad (3.17)$$

όπου θ_i ο συντελεστής διήθησης του υδατορεύματος που διατρέχει την υπολεκάνη i και F_i η έκταση αυτής. Οι απώλειες αυτές αποτελούν τη συνιστώσα γραμμικής φόρτισης των υποκειμένων, του εν λόγω υδατορεύματος, κυττάρων του υδροφορέα. Σε αυτές προστίθενται οι διηθήσεις που προέρχονται από τη διαδρομή των ανάντη νερών, και εκτιμώνται από το μοντέλο κατανομής των υδατικών πόρων. Από την άλλη πλευρά, η ποσότητα g_{ij} , που εκφράζει το ύψος κατείσδυσης από τον συνδυασμό της υπολεκάνης i με τη ΜΥΑ j , αποτελεί την κατανεμημένη φόρτιση των υποκειμένων της σχετικής χωρικής μονάδας κυττάρων (βλ. 3.6.2).

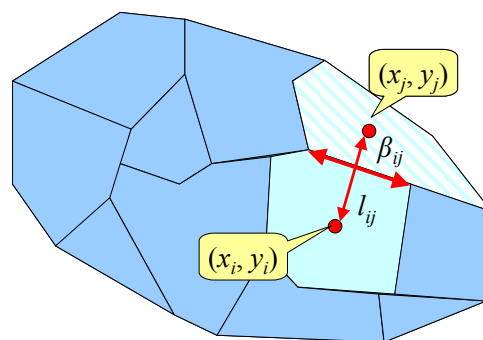
3.6 Μοντέλο υπόγειας υδρολογίας

3.6.1 Σχηματοποίηση υδροφορέα

Η προσομοίωση της υπόγειας κίνησης του νερού (κορεσμένη ροή) βασίζεται στην τεχνική των πολυκυτταρικών μοντέλων (Bear, 1979). Τα μοντέλα αυτά επιλέγονται συχνά σε υδρολογικές εφαρμογές, όταν υπάρχει έλλειψη δεδομένων ή ανάγκη μεγάλης ταχύτητας προσομοίωσης. Σύμφωνα με τους Rozos and Koutosyiannis (2006), τα πολυκυτταρικά μοντέλα είναι ισοδύναμα με την θεωρία των *πεπερασμένων όγκων* (finite volume), αρκεί να ικανοποιούνται οι ακόλουθοι δύο περιορισμοί:

- η χάραξη των κυττάρων να γίνεται με τρόπο ώστε οι ακμές τους να είναι παράλληλες προς τις ισοδυναμικές γραμμές·
- τα κέντρα βάρη γειτονικών κυττάρων να ορίζουν ευθεία κάθετη στην κοινή ακμή.

Με αυτό τον τρόπο χάραξης του κανάβου, είναι δυνατή η εκμετάλλευση της διαθέσιμης πληροφορίας σχετικά με την πιεζομετρία της περιοχής μελέτης. Επιπλέον, το πολυγωνικό σχήμα των κυττάρων παρέχει ιδιαίτερη ευελιξία, καθώς επιτρέπει την περιγραφή υδροφορέων τυχαίας γεωμετρίας, με φειδωλό μάλιστα αριθμό κυττάρων. Αυτό περιορίζει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο και συμβάλλει στην καλύτερη εποπτεία του συστήματος, αφού η χάραξη των κυττάρων, και συνακόλουθα η παραμετροποίηση του συστήματος, μπορεί να γίνει με βάση τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους (π.χ. γεωλογία), που είναι προφανές ότι επηρεάζουν τις υπόγειες υδρολογικές διεργασίες.



Σχήμα 3.3: Παράδειγμα διακριτοποίησης υδροφορέα σε κύτταρα και χαρακτηριστικά γεωμετρικά τους μεγέθη.

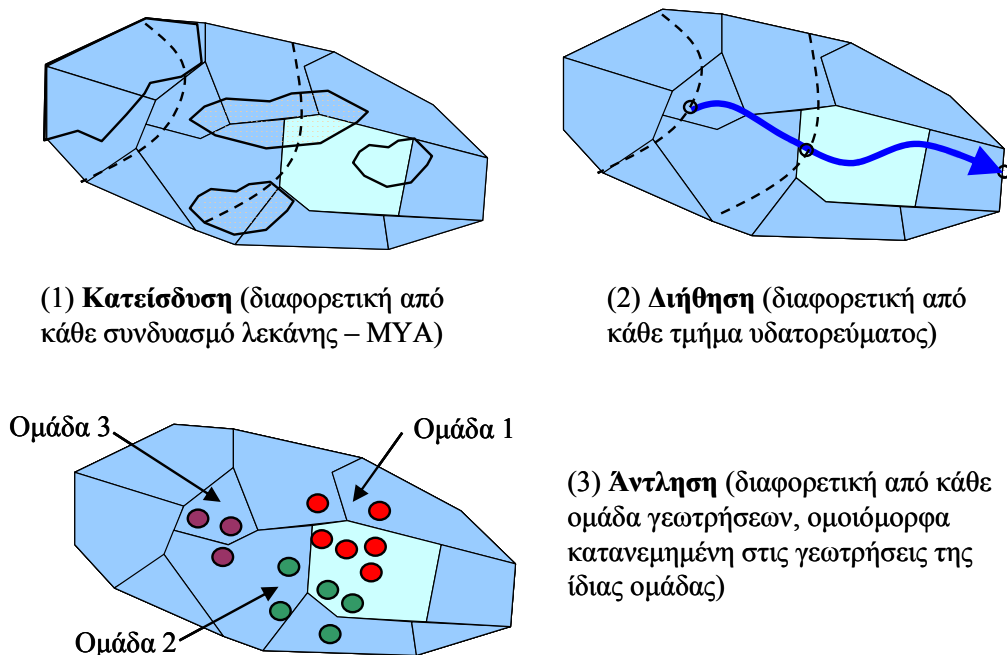
Η τοπολογία του δικτύου ροής ορίζεται από τις γεωγραφικές συντεταγμένες του κέντρου βάρους των κυττάρων, x_i και y_i , το μέσο μήκος που διανύει η ροή μεταξύ δύο γειτονικών κυττάρων, l_{ij} , και το μήκος της κοινής τους ακμής, β_{ij} (Σχήμα 3.3). Οι διεργασίες κάθε κυττάρου αναπαρίστανται από εννοιολογικές δεξαμενές συγκέντρωσης του υπόγειου νερού. Το δίκτυο των δεξαμενών μπορεί να θεωρηθεί ως το υδραυλικό ανάλογο της διακριτής αναπαράστασης του υδροφορέα. Χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε δεξαμενής είναι το εμβαδόν της βάσης, F_i , η στάθμη της οροφής, w_i^{\max} , και του πυθμένα, w_i^{\min} . Οι δεξαμενές τροφοδοτούνται από την κατείσδυση μέσω των υπερκείμενων στρωμάτων, και η μεταβολή της στάθμης τους απεικονίζει τη μεταβολή της πιεζομετρίας στον υδροφορέα. Η ροή του νερού πραγματοποιείται από τις δεξαμενές υψηλότερης προς τις δεξαμενές χαμηλότερης στάθμης.

Η εκφόρτιση του υδροφορέα αναπαρίστανται με ειδικούς τύπους δεξαμενών, που αντιπροσωπεύουν είτε σημειακές εξόδους νερού στην επιφάνεια (πηγές) είτε περιοχές συγκέντρωσης του υπόγειου νερού που βρίσκονται εκτός της λεκάνης (π.χ., υποθαλάσσιες εκφορτίσεις). Και στις δύο περιπτώσεις θεωρούνται εικονικές δεξαμενές πολύ μεγάλης βάσης, ώστε η στάθμη τους να διατηρείται πρακτικά σταθερή. Οι δεξαμενές αυτές δεν δέχονται κατείσδυση ούτε τροφοδοτούν γειτονικές τους δεξαμενές.

3.6.2 Συνιστώσες φόρτισης υπόγειων δεξαμενών

Οι δεξαμενές υπόγειου νερού δέχονται τριών ειδών φορτίσεις (Σχήμα 3.4):

- την κατανεμημένη κατείσδυση της εδαφικής υγρασίας·
- την γραμμική διήθηση νερού κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου·
- την σημειακή άντληση νερού από τις γεωτρήσεις του υδροσυστήματος.



Σχήμα 3.4: Συνιστώσες φόρτισης υδροφορέα και αντίστοιχα θεματικά επίπεδα.

Οι δύο πρώτες συνιστώσες αντιπροσωπεύουν εισροή νερού στο υπόγειο σύστημα, που οφείλεται σε φυσική τροφοδοσία του υδροφορέα από τη βροχόπτωση, ενώ η τρίτη συνιστώσα αντιπροσωπεύει εκροή (απόληψη) νερού, που οφείλεται στον ανθρώπινο παράγοντα. Για τον υπολογισμό των τριών τύπων φορτίσεων σε κάθε δεξαμενή, απαιτείται η διαμόρφωση αντίστοιχων επιπέδων γεωγραφικής πληροφορίας, και συγκεκριμένα:

- της ένωσης κυττάρων υδροφορέα – υπολεκανών – μονάδων υδρολογικής απόκρισης (βλ. 4.3.15)·

- της τομής κυττάρων υδροφορέα – τμημάτων υδατορευμάτων (βλ. 4.3.16).
- της τομής κυττάρων υδροφορέα – γεωτρήσεων (βλ. 4.3.16).

Η κατανεμημένη κατείδυση από κάθε συνδυασμό υπολεκάνης – μονάδας υδρολογικής απόκρισης ολοκληρώνεται στην επιφάνεια των κυττάρων. Αν F_{ijk} είναι η κοινή επιφάνεια της υπολεκάνης i με την μονάδα υδρολογικής απόκρισης j και το κύτταρο k , g_{ij} είναι το ύψος κατείδυσης από τον συνδυασμό της υπολεκάνης i με τη μονάδα απόκρισης j (γνωστή από την εφαρμογή του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας), και F_k είναι η έκταση του κυττάρου k , τότε το ύψος κατείδυσης στο εν λόγω κύτταρο υπολογίζεται από την σχέση:

$$g_k = \frac{1}{F_k} \sum_{i=1}^{NB} \sum_{j=1}^{NH} g_{ij} F_{ijk} \quad (3.18)$$

όπου NB και NH το πλήθος των υπολεκανών και μονάδων υδρολογικής απόκρισης, αντίστοιχα.

Οι απώλειες λόγω διήθησης στα υδατορεύματα επιμερίζονται στα υποκείμενα κύτταρα, αναλογικά με το μήκος ανάπτυξης κάθε κλάδου του υδρογραφικού δικτύου. Συγκεκριμένα, αν δ_i το ύψος απωλειών κατά μήκος του κλάδου i , L_{ik} το μήκος του κλάδου i που αναπτύσσεται πάνω το κύτταρο k , και L_i το συνολικό του μήκος, τότε το ύψος διήθησης που φορτίζει το κύτταρο k δίνεται από τη σχέση:

$$\delta_k = \frac{1}{L_i} \sum_{i=1}^{NR} \delta_i L_{ik} \quad (3.19)$$

όπου NR το πλήθος των κλάδων (τμήματα υδατορευμάτων).

Τέλος, οι υπόγειες απολήψεις εκτιμώνται από το μοντέλο κατανομής των υδατικών πόρων για κάθε γεώτρηση (βλ. 3.7). Στη συνέχεια, αθροίζονται οι αντλήσεις από το σύνολο των γεωτρήσεων κάθε κυττάρου, και ανάγονται στην επιφάνειά του, διαιρώντας με την αντίστοιχη έκταση.

3.6.3 Λειτουργία δεξαμενών

Στο διακριτό μοντέλο του υδροφορέα που διαμορφώνεται, ισχύουν οι εξισώσεις συνέχειας σε κάθε δεξαμενή, καθώς και οι εξισώσεις ροής, που αναφέρονται στην ανταλλαγή νερού μεταξύ των γειτονικών δεξαμενών.

Η στάθμη του νερού w_i εντός της δεξαμενής i αποτελεί τη μεταβλητή κατάστασης του συστήματος, και αντιπροσωπεύει μια μέση κατάσταση του υδροφορέα στην περιοχή του αντίστοιχου κυττάρου. Σε συνθήκες φρεάτιου υδροφορέα, η στάθμη κυμαίνεται μεταξύ μιας κατώτατης και μιας ανώτατης τιμής, που καθορίζεται κατά την σχηματοποίηση (βλ. 3.6.1). Εφόσον η στάθμη ξεπεράσει την οροφή της δεξαμενής, τότε ο υδροφορέας θεωρείται περιορισμένος. Συνεπώς, το υδραυλικό φορτίο h_i της δεξαμενής i υπολογίζεται από την σχέση:

$$h_i = \begin{cases} w_i^{\min} + w_i & w_i \leq b_i \\ w_i^{\max} + (w_i - b_i) \theta & w_i > b_i \end{cases} \quad (3.20)$$

όπου θ είναι ο λόγος της ειδικής απόδοσης προς την αποθηκευτικότητα υπό συνθήκες πίεσης και b_i η διαφορά μεταξύ της ανώτατης και κατώτατης στάθμης, που εκφράζει το πάχος του υδροφορέα στην περιοχή του κυττάρου. Ο άνω κλάδος στην σχέση (3.20) αντιστοιχεί σε φρεάτιες συνθήκες, ενώ ο κάτω κλάδος αντιστοιχεί σε συνθήκες περιορισμένου υδροφορέα.

Για δεδομένη στάθμη w_i , ο αντίστοιχος αποθηκευμένος όγκος V_i νερού υπολογίζεται από την σχέση:

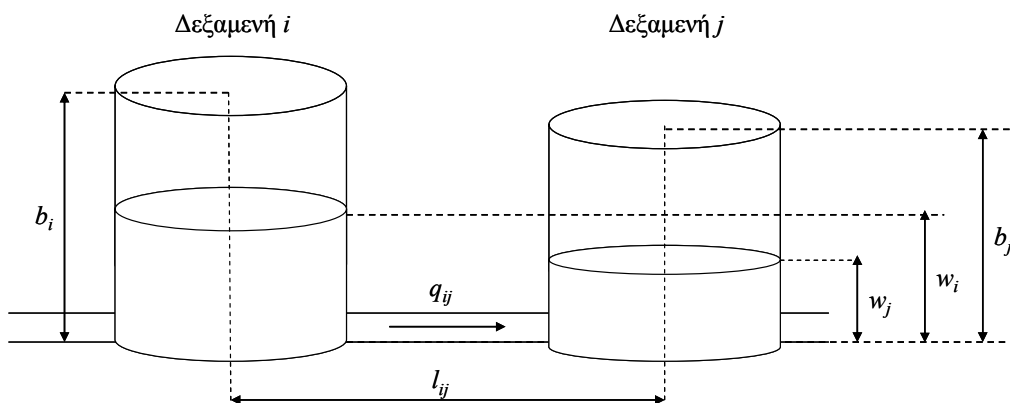
$$V_i = w_i F_i \quad (3.21)$$

όπου F_i το εμβαδόν της βάσης της δεξαμενής i το οποίο ισούται με το εμβαδό του αντίστοιχου κυττάρου επί την ειδική απόδοση του υδροφορέα. Η μεταβλητότητα της στάθμης της δεξαμενής

εξαρτάται από την τιμή της ειδικής απόδοσης που αποτελεί αδιάστατη παράμετρο του μοντέλου. Αν αυτή είναι μικρή, τότε η βάση της δεξαμενής είναι μικρή και απαιτείται μεγάλη μεταβολή στάθμης για την αποθήκευση συγκεκριμένου όγκου νερού, ενώ, αντίστροφα, αν η τιμή της ειδικής απόδοσης είναι μεγάλη, τότε η βάση της δεξαμενής είναι μεγάλη και απαιτείται μικρή μεταβολή στάθμης για την αποθήκευση του ίδιου όγκου.

Εκτός από την ειδική απόδοση, μία ακόμη χαρακτηριστική ιδιότητα της κάθε δεξαμενής, που επίσης αποτελεί παράμετρο του μοντέλου, είναι η υδραυλική αγωγιμότητα, που συμβολίζεται K_i , και έχει μονάδες ταχύτητας.

Η κίνηση του νερού θεωρείται ότι πραγματοποιείται μέσω ενός δικτύου αγωγών. Το μήκος l_{ij} κάθε αγωγού ισούται με την απόσταση των κέντρων βάρους των δεξαμενών i και j που αυτός συνδέει, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Το εμβαδόν A_{ij} ισούται με την κορεσμένη διατομή μέσω της οποίας το νερό περνάει από την περιοχή του υδροφορέα που αντιστοιχεί στο κύτταρο i στην περιοχή του υδροφορέα που αντιστοιχεί στο κύτταρο j . Η τελευταία εξαρτάται από το μήκος της κοινής ακμής, β_{ij} , το υψόμετρο της βάσης του υδροφορέα και την επίκαιρη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Η υδραυλική αγωγιμότητα K_{ij} του αγωγού προκύπτει με συνδυασμό (π.χ. αριθμητικός, γεωμετρικός μέσος, κλπ.) των αγωγιμοτήτων των δεξαμενών, K_i και K_j .



Σχήμα 3.5: Σχηματική παράσταση μοντέλου προσομοίωσης υπόγειων υδρολογικών διεργασιών.

Έστω ότι η ροή πραγματοποιείται από τη δεξαμενή i προς τη δεξαμενή j , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Η παροχή Q_{ij} υπολογίζεται από την εξίσωση Darcy, δηλαδή:

$$Q_{ij} = K_{ij} A_{ij} \frac{h_i - h_j}{l_{ij}} \quad (3.22)$$

όπου τα υδραυλικά φορτία h_i και h_j υπολογίζονται από την εξίσωση (3.20).

Ο υπολογισμός της ροής εντός του δικτύου των δεξαμενών μπορεί να γίνει, εναλλακτικά, με ένα ρητό ή ένα πεπλεγμένο σχήμα επίλυσης. Τα δύο αυτά αριθμητικά σχήματα περιγράφονται στα εδάφια 3.6.5 και 3.6.6, αντίστοιχα.

3.6.4 Χρονικό βήμα υπολογισμών

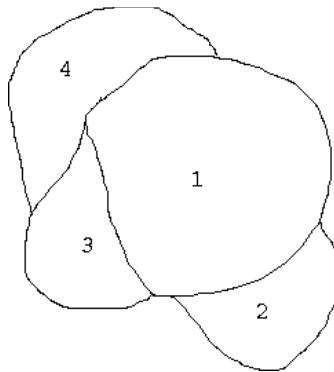
Η επίλυση του μοντέλου υπόγειων νερών γίνεται με χρονικό βήμα Δt που είναι μικρότερο από την χρονική διακριτότητα της προσομοίωσης, $\Delta \tau$, που αντιστοιχεί στην περίοδο φόρτισης (stress period). Το βήμα αυτό επιλέγεται κατά περίπτωση, με κριτήριο την επίτευξη αριθμητικής ευστάθειας. Αυτό γίνεται εμπειρικά, ελέγχοντας αν η περαιτέρω μείωση του χρονικού βήματος οδηγεί σε σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα. Είναι προφανές ότι η θεώρηση πολύ μικρού Δt συνεπάγεται αντίστοιχα αυξημένο υπολογιστικό φόρτο, δεδομένου ότι η επίλυση του δικτύου ροής γίνεται $N_\delta = \Delta \tau / \Delta t$ φορές για κάθε περίοδο φόρτισης. Για την εξασφάλιση αριθμητικής ευστάθειας, οι φορτίσεις των

δεξαμενών, που υπολογίζονται με βάση όσα αναφέρονται στο εδάφιο 3.6.2, θεωρούνται ομοιόμορφα κατανομημένες στο χρονικό βήμα Δt . Συνεπώς, τα ύψη κατείδυσης, διήθησης και άντλησης διαιρούνται με την ποσότητα N_δ .

3.6.5 Ρητό σχήμα επίλυσης

Στο ρητό σχήμα υπολογίζονται οι μεταβολές στάθμης εντός όλων των δεξαμενών στο χρονικό βήμα Δt λόγω της ανταλλαγής νερού μεταξύ τους και με την παραδοχή ότι το υδραυλικό ύψος παραμένει πρακτικά σταθερό.

Για να διευκολυνθεί η περιγραφή θα εξεταστεί σαν παράδειγμα η ανταλλαγή νερού μεταξύ των γειτονικών δεξαμενών i και j που φαίνονται στο Σχήμα 3.5, και θα γενικευτεί η περιγραφή σε περισσότερες δεξαμενές. Οι δεξαμενές i και j έχουν επιφάνειες βάσης F_i και F_j , η στάθμη του νερού σε αυτές είναι w_i και w_j , και τα υδραυλικά ύψη h_i και h_j , αντίστοιχα. Το μήκος του αγωγού που τις συνδέει είναι l_{ij} , η διατομή του A_{ij} και η αντίστοιχη υδραυλική αγωγιμότητα K_{ij} . Η παροχή Q_{ij} από την δεξαμενή i στην δεξαμενή j ισούται με $Q_{ij} = T_{ij} (h_i - h_j)$ όπου $T_{ij} = K_{ij} A_{ij} / l_{ij}$. Η μεταβολή της στάθμης μετά από χρόνο Δt στις δυο δεξαμενές που προκαλείται από την κίνηση νερού από την μια στην άλλη θα είναι $\Delta w_i = -Q_{ij} \Delta t / F_i$ και $\Delta w_j = Q_{ij} \Delta t / F_j$ αντίστοιχα.



Σχήμα 3.6: Παράδειγμα μη ορθογωνικής διακριτοποίησης ελεύθερου υδροφορέα με τέσσερα κύτταρα. Η γεωμετρία των κυττάρων δεν ικανοποιεί τα κριτήρια καλής χάραξης, αλλά έχει ως στόχο την εύκολη κατανόηση των αλγορίθμων επίλυσης.

Πίνακας 3.2: Πορεία υπολογισμών (σε κάθε χρονικό βήμα) στο υδραυλικό ανάλογο του Σχήματος 3.6.

| i | j | Υπολογισμός Δw_{ij} και w_i |
|-----|-----|---|
| 1 | 2 | $\Delta w_{12} = T_{12} (h_2^{t-1} - h_1^{t-1}) \Delta t / F_1$ και $\Delta w_{21} = T_{21} (h_1^{t-1} - h_2^{t-1}) \Delta t / F_2$ |
| | 3 | $\Delta w_{13} = T_{13} (h_3^{t-1} - h_1^{t-1}) \Delta t / F_1$ και $\Delta w_{31} = T_{31} (h_1^{t-1} - h_3^{t-1}) \Delta t / F_3$ |
| | 4 | $\Delta w_{14} = T_{14} (h_4^{t-1} - h_1^{t-1}) \Delta t / F_1$ και $\Delta w_{41} = T_{41} (h_1^{t-1} - h_4^{t-1}) \Delta t / F_4$ |
| | | $w_1 = w_1^{t-1} + \Delta w_{12} + \Delta w_{13} + \Delta w_{14} + g_1 \Delta t$ |
| 2 | 3 | |
| | 4 | |
| | | $w_2 = w_2^{t-1} + \Delta w_{21} + g_2 \Delta t$ |
| 3 | 4 | $\Delta w_{34} = T_{34} (h_4^{t-1} - h_3^{t-1}) \Delta t / F_3$ και $\Delta w_{43} = T_{43} (h_3^{t-1} - h_4^{t-1}) \Delta t / F_4$ |
| | | $w_3 = w_3^{t-1} + \Delta w_{31} + \Delta w_{34} + g_3 \Delta t$ |
| 4 | | $w_4 = w_4^{t-1} + \Delta w_{41} + \Delta w_{43} + g_4 \Delta t$ |

Στη γενική περίπτωση, οι προηγούμενες πράξεις επαναλαμβάνονται μεταξύ όλων των δεξαμενών που επικοινωνούν μεταξύ τους. Στο Σχήμα 3.6 φαίνεται η διακριτοποίηση ενός υποθετικού ελεύθερου

υδροφορέα με τέσσερα κύτταρα. Το υδραυλικό ανάλογο αποτελείται από τέσσερις δεξαμενές, στο οποίο η δεξαμενή 1 επικοινωνεί με τις 2, 3 και 4, η δεξαμενή 2 μόνο με την 1, η δεξαμενή 3 επικοινωνεί με τις 1 και 4 και η δεξαμενή 4 με τις 3 και 1. Στον Πίνακα 3.2 φαίνονται όλες οι πράξεις που πρέπει να γίνουν για να υπολογιστεί η κίνηση του νερού που πραγματοποιείται στο υδραυλικό ανάλογο μεταξύ του χρόνου $t - \Delta t$ και t . Με Δw_{ij} συμβολίζεται η αλλαγή στάθμης που προκαλείται στην δεξαμενή i λόγω ανταλλαγής νερού με την δεξαμενή j και με g_i η επιφανειακή φόρτιση που δέχεται η δεξαμενή i (με μονάδες ύψους στη μονάδα του χρόνου). Στις χρονικά μεταβαλλόμενες ποσότητες, δηλαδή τις στάθμες των δεξαμενών w_i , τα υδραυλικά ύψη h_i και τις φορτίσεις g_i που δεν αναγράφεται η χρονική θέση, θεωρείται ότι είναι η t . Αφού ολοκληρωθεί ο υπολογισμός της τιμής της στάθμης σε όλες της δεξαμενές για την χρονική θέση t , υπολογίζονται τα αντίστοιχα υδραυλικά ύψη από την εξίσωση (3.20) και ξεκινάει από την αρχή ο κύκλος υπολογισμού των μεταβολών στάθμης.

Στον Πίνακα 3.2 είναι εμφανές ότι, ενώ για την δεξαμενή 1 πρέπει να υπολογιστούν οι ανταλλαγές νερού και με τις τρεις γειτονικές της, για την δεξαμενή 4 οι ανταλλαγές νερού με τις δεξαμενές 1 και 3 έχουν ήδη υπολογιστεί στα προηγούμενα βήματα. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει τέσσερις κοινές ακμές κυττάρων και τέσσερα κύτταρα. Συνεπώς, στο ρητό σχήμα υπολογίζονται τέσσερα υδατικά ισοζύγια και τέσσερις ανταλλαγές νερού. Γενικά, σε ένα μοντέλο με m δεξαμενές και n επικοινωνίες δεξαμενών, υπολογίζονται m ισοζύγια και n ανταλλαγές νερού σε κάθε χρονικό βήμα.

3.6.6 Πεπλεγμένο σχήμα επίλυσης

Στο πεπλεγμένο σχήμα υπολογίζονται ταυτόχρονα όλα τα υδραυλικά ύψη του επόμενου χρονικού βήματος. Η περιγραφή του αλγορίθμου βασίζεται και πάλι στο υδραυλικό ανάλογο του Σχήματος 3.6, και στη συνέχεια διατυπώνεται στη γενική, μητρική του μορφή. Εφαρμόζοντας την εξίσωση συνέχειας για τα τέσσερα κύτταρα του Σχήματος 3.6 προκύπτει:

$$Q_{12} + Q_{13} + Q_{14} = \frac{w_1 - w_1^{t-1}}{\Delta t} F_1 + g_1^{t-1} F_1$$

$$Q_{12} = \frac{w_2 - w_2^{t-1}}{\Delta t} F_2 + g_2^{t-1} F_2$$

$$Q_{13} + Q_{34} = \frac{w_3 - w_3^{t-1}}{\Delta t} F_3 + g_3^{t-1} F_3$$

$$Q_{14} + Q_{34} = \frac{w_4 - w_4^{t-1}}{\Delta t} F_4 + g_4^{t-1} F_4$$

Επειδή ο υδροφορέας είναι ελεύθερος, από την (3.20) προκύπτει ότι $w_i - w_i^{t-1} = h_i - h_i^{t-1}$, ενώ στην περίπτωση που ήταν υπό πίεση θα προέκυπτε $w_i - w_i^{t-1} = (h_i - h_i^{t-1}) \theta$. Εισάγοντας στις παραπάνω εξισώσεις την εξίσωση Darcy για τον υπολογισμό των παροχών και ομαδοποιώντας τους συντελεστές των αγνώστων, προκύπτει ένα σύστημα τεσσάρων γραμμικών εξισώσεων με τέσσερις αγνώστους:

$$\left(T_{12} + T_{13} + T_{14} + \frac{F_1}{\Delta t}\right) h_1 - T_{12} h_2 - T_{13} h_3 - T_{14} h_4 = \left(\frac{h_1^{t-1}}{\Delta t} + g_1^{t-1}\right) F_1$$

$$-T_{12} h_1 + \left(T_{12} + \frac{F_2}{\Delta t}\right) h_2 = \left(\frac{h_2^{t-1}}{\Delta t} + g_2^{t-1}\right) F_2$$

$$-T_{13} h_1 + \left(T_{13} + T_{34} + \frac{F_3}{\Delta t}\right) h_3 - T_{34} h_4 = \left(\frac{h_3^{t-1}}{\Delta t} + g_3^{t-1}\right) F_3$$

$$-T_{14} h_1 - T_{34} h_3 + \left(T_{14} + T_{34} + \frac{F_4}{\Delta t}\right) h_4 = \left(\frac{h_4^{t-1}}{\Delta t} + g_4^{t-1}\right) F_4$$

Στην γενική περίπτωση n κυττάρων, όπου ο υδροφορέας μπορεί να μεταβεί από περιορισμένες συνθήκες ($h_i > w_i^{\max}$) σε ελεύθερες συνθήκες ($h_i < w_i^{\max}$) και αντιστρόφως, το σύστημα εξισώσεων που

προκύπτει από την εφαρμογή του υδατικού ισοζυγίου σε όλα τα κύτταρα έχει την μορφή $\mathbf{A} \mathbf{h} = \mathbf{c}$, όπου \mathbf{h} είναι ο πίνακας με τα άγνωστα υδραυλικά ύψη h_i , \mathbf{A} ο πίνακας των συντελεστών των αγνώστων, και \mathbf{c} ο πίνακας με τους σταθερούς όρους. Τα στοιχεία των μητρώων υπολογίζονται ως:

$$c_i = (h_i^{t-1} + g_i \Delta t) \text{FDTL}_i \quad (3.23)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} -T_{ij} & \text{για } i \neq j \\ \sum_{j=1}^{i-1} T_{ij} + \sum_{j=i+1}^n T_{ij} + \text{FDTL}_i & \text{για } i = j \end{cases} \quad (3.24)$$

όπου:

$$\text{FDTL}_i = \begin{cases} \frac{F_i}{\theta \Delta t} & \text{αν } h_i^{t-1} > w_i^{\max} \\ \frac{F_i}{\Delta t} & \text{αν } h_i^{t-1} \leq w_i^{\max} \end{cases} \quad (3.25)$$

Η επίλυση του παραπάνω συστήματος μπορεί να γίνει με κάποιον από τους τυπικούς γραμμικούς επιλυτές, όπως η μέθοδος Gauss. Πρέπει να επισημανθεί ότι αν ο κánaβος της διακριτοποίησης δεν είναι ορθογωνικός, δεν προκύπτει τριδιαγώνιος πίνακας \mathbf{A} .

3.7 Μοντέλο κατανομής υδατικών πόρων

3.7.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Όπως εξηγείται στο εδάφιο 3.5.4, το μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας υπολογίζει σε κάθε χρονικό βήμα τις πλευρικές εισροές στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου, ως άθροισμα της επιφανειακής και υπόγειας (πηγαίας) απορροής. Δεδομένου ότι κατά μήκος του δικτύου πραγματοποιούνται απώλειες από φυσικά αίτια (διηθήσεις), απολήψεις αλλά και εισροές λόγω π.χ. της λειτουργίας ενός έργου εκτροπής νερού από γειτονική λεκάνη, απαιτείται η διατύπωση και επίλυση των εξισώσεων συνέχειας σε όλους τους κόμβους, για την κατάρτιση του υδατικού ισοζυγίου και τον υπολογισμό των παροχών στα υδατορεύματα.

Επιπλέον, σε διαταραγμένα συστήματα, είναι προφανές ότι η πραγματοποίηση απολήψεων από επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους επηρεάζει το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης. Κατά κανόνα όμως, είναι δύσκολο να βρεθούν ιστορικά στοιχεία (μετρήσεις) όσον αφορά στις απολήψεις, ενώ αντίθετα είναι δυνατό να γίνουν εκτιμήσεις σχετικά με τις υδατικές ανάγκες. Επιπλέον, όταν μελετάται η μελλοντική κατάσταση της λεκάνης, κάτι που προϋποθέτει ότι το υδρολογικό μοντέλο έχει βαθμονομηθεί και λειτουργεί υπό μορφή πρόγνωσης, θεωρούνται δεδομένα τα χαρακτηριστικά του υδροσυστήματος και οι υδατικές ανάγκες και ζητείται η εκτίμηση των πραγματικών απολήψεων.

Εφόσον μάλιστα προκύπτουν αντικρουόμενες ανάγκες σε συνθήκες περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού, καθώς και εναλλακτικοί τρόποι ικανοποίησης των αναγκών, με διαφοροποίηση του σχετικού κόστους, τότε τίθεται ένα επιπλέον ζήτημα, που έχει σχέση με τον εντοπισμό της πλέον πρόσφορης πολιτικής διαχείρισης των υδατικών πόρων της λεκάνης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στο πρόγραμμα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ υλοποιήθηκε η δυνατότητα περιγραφής, εκτός του φυσικού συστήματος, και των έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων της λεκάνης. Στο μοντέλο προσομοίωσης, ενσωματώθηκε ένα σχήμα κατανομής των υδατικών πόρων που, για δεδομένες σημειακές εισροές στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου, δεδομένες χρήσεις νερού και προτεραιότητες των εν λόγω χρήσεων, δεδομένους περιορισμούς στη λειτουργία του υδροσυστήματος, και δεδομένα χαρακτηριστικά των υδραυλικών έργων, υπολογίζει τις μεταβλητές

του υδροσυστήματος (παροχές, απολήψεις), με τρόπο ώστε να ικανοποιούνται οι φυσικοί και λειτουργικοί περιορισμοί και να ελαχιστοποιείται το κόστος των απολήψεων.

3.7.2 Σχηματοποίηση υδροσυστήματος

Η ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ παρέχει τη δυνατότητα αναπαράστασης των ανθρωπογενών επεμβάσεων σε μια λεκάνη, υιοθετώντας μια σχηματική διάταξη δικτύου, που περιλαμβάνει τις ακόλουθες συνιστώσες:

- *κόμβους*, δηλαδή θέσεις προσφοράς ή ζήτησης νερού ή σημεία αλλαγής της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών μεγεθών του δικτύου·
- *ομάδες γεωτρήσεων*, δηλαδή συστήματα έργων υδροληψίας από υπόγειους υδατικούς πόρους, δεδομένης αντλητικής ικανότητας·
- *υδραγωγεία*, δηλαδή στοιχεία μεταφοράς νερού που συνδέουν ζεύγη κόμβων και αναφέρονται σε ανοιχτούς ή κλειστούς αγωγούς, δεδομένης παροχευτικότητας·
- *στόχοι*, που εκφράζουν τους λειτουργικούς περιορισμούς του συστήματος.

Οι παραπάνω συνιστώσες συνδέονται με το υδρογραφικό δίκτυο και τον υδροφορέα, διαμορφώνοντας έτσι ένα ευρύτερο δίκτυο που καλείται *υδροσύστημα*.

Ειδική κατηγορία κόμβων είναι οι *αρδευτικοί*, χαρακτηριστικό των οποίων είναι η δυνατότητα επιστροφής μέρος της αρδευόμενης ποσότητας στο σύστημα, μέσω του αποστραγγιστικού δικτύου. Οι ομάδες γεωτρήσεων είναι εννοιολογικές οντότητες, που αντιπροσωπεύουν συστήματα μεμονωμένων γεωτρήσεων, στη λογική της αδρής σχηματοποίησης ενός διαχειριστικού μοντέλου. Μέσω των υδραγωγείων, υλοποιείται η σύνδεση του τεχνητού με το φυσικό σύστημα, τόσο με τη μορφή απόληψης από επιφανειακά και υπόγεια νερά όσο και με τη μορφή τεχνητής τροφοδοσίας των επιφανειακών αποδεκτών. Τόσο στα υδραγωγεία όσο και στις ομάδες γεωτρήσεων, εισάγεται ένα μοναδιαίο κόστος λειτουργίας (χρηματικές μονάδες ανά μονάδα διερχόμενου όγκου), που λαμβάνεται υπόψη στη διαδικασία υπολογισμού των απολήψεων. Τέλος, οι στόχοι, που ορίζονται κατά σειρά προτεραιότητας και οι τιμές τους μπορούν να διαφοροποιούνται σε κάθε χρονικό βήμα, εντάσσονται σε δύο κατηγορίες, καταναλωτικοί και μη καταναλωτικοί. Οι πρώτοι αναφέρονται στη ζήτηση νερού για ύδρευση ή άρδευση, ενώ οι δεύτεροι αναφέρονται στη διατήρηση της παροχής στα υδραγωγεία ή τα υδατορεύματα μεταξύ ενός επιθυμητού εύρους.

3.7.3 Δικτυακή διατύπωση προβλήματος

Τα γνωστά μεγέθη του υδροσυστήματος είναι η προσφορά και ζήτηση νερού στους κόμβους. Η προσφορά νερού προέρχεται από:

- την απορροή των υπολεκανών·
- την υπόγεια αποθήκευση νερού·
- τις εισροές που εισάγονται στο υδροσύστημα από εξωτερικές πηγές.

Η ζήτηση νερού αναφέρεται σε στόχους κατανάλωσης νερού για ύδρευση και άρδευση, που ορίζονται κατά σειρά προτεραιότητας. Εκτός των παραπάνω στόχων, στο υδροσύστημα μπορούν να οριστούν και μη καταναλωτικοί στόχοι, όπως περιορισμοί ελάχιστης και μέγιστης ροής σε υδραγωγεία και υδατορεύματα. Συνεπώς, εκτός από τη «φυσική» μεταφορά νερού κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου, επιβάλλεται και «τεχνητή» μεταφορά υδατικών πόρων, επιφανειακών (μέσω έργων εκτροπής) και υπόγειων (μέσω των γεωτρήσεων), εξαιτίας των στόχων και περιορισμών που θέτει ο χρήστης.

Τα άγνωστα μεγέθη του υδροσυστήματος είναι οι μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου, δηλαδή:

- οι παροχές στους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου και στα υδραγωγεία·
- οι απολήψεις από τους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου και τις ομάδες γεωτρήσεων·

- οι απώλειες κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου λόγω διήθησης.

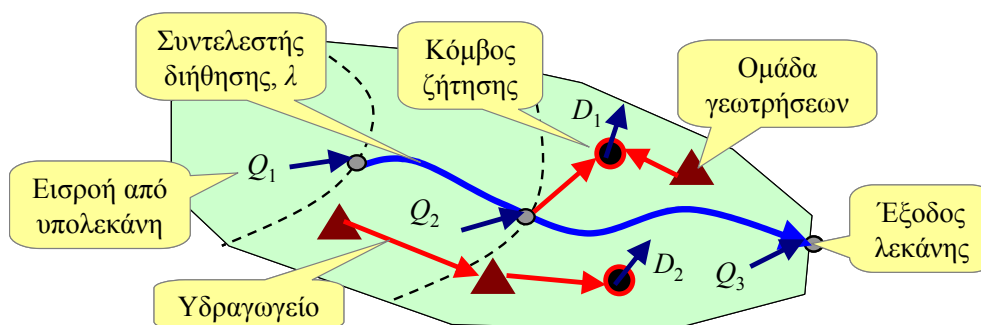
Ζητούμενο είναι η εύρεση των παραπάνω μεγεθών, με τρόπο ώστε να τηρούνται με αυστηρή ιεραρχία οι ακόλουθες υποθέσεις:

- να ικανοποιείται το σύνολο των φυσικών περιορισμών του συστήματος, δηλαδή οι εξισώσεις συνέχειας σε όλους τους κόμβους·
- να ικανοποιούνται, εφόσον είναι εφικτό, οι στόχοι και λοιποί λειτουργικοί περιορισμοί του συστήματος, με την επιθυμητή σειρά προτεραιότητας·
- να ελαχιστοποιείται το κόστος λειτουργίας του συστήματος, δηλαδή το κόστος άντλησης και μεταφοράς νερού.

Αποδεικνύεται ότι τα παραπάνω μπορούν να διατυπωθούν μαθηματικά ως ένα μοντέλο δικτυακού προγραμματισμού, μετασχηματίζοντας τις συνιστώσες του υδροσυστήματος σε συνιστώσες ενός μοντέλου διγράφου, δηλαδή ενός συνόλου από κόμβους και κλάδους (Koutsoyiannis *et al.*, 2002· Efstratiadis *et al.*, 2004). Οι κόμβοι είναι τα μοναδικά σημεία στα οποία πραγματοποιείται προσφορά ή κατανάλωση νερού, ενώ οι κλάδοι, σε κάθε έναν από τους οποίους αντιστοιχεί μία και μοναδική άγνωστη μεταβλητή, αντιπροσωπεύουν πραγματικές ή εικονικές διαδρομές νερού. Με την εν λόγω διατύπωση, η κατανομή των διαθέσιμων υδατικών πόρων στις επιμέρους συνιστώσες του συστήματος ανάγεται σε ένα πρόβλημα γραμμικής βελτιστοποίησης, που σε μορφή μητρώων γράφεται ως:

$$\begin{aligned} & \text{minimise } f(\mathbf{x}) = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ & \text{έτσι ώστε } \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{y} \\ & \mathbf{0} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{aligned} \quad (3.26)$$

όπου \mathbf{x} το διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου, δηλαδή των μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου, \mathbf{c} το διάνυσμα των τιμών μοναδιαίου κόστους, \mathbf{A} το λεγόμενο *μητρώο πρόσπτωσης*, που περιγράφει την τοπολογία του διγράφου, \mathbf{y} το διάνυσμα προσφοράς και ζήτησης νερού, $\mathbf{0}$ το μηδενικό διάνυσμα, και \mathbf{u} το διάνυσμα των τιμών μεταφορικής ικανότητας των κλάδων. Με τον ορισμό κατάλληλων τιμών των διανυσμάτων \mathbf{c} , \mathbf{y} και \mathbf{u} , η επίλυση μπορεί να γίνει με τυποποιημένους αλγορίθμους (π.χ., μέθοδος simplex), που χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλη ταχύτητα υπολογισμών.

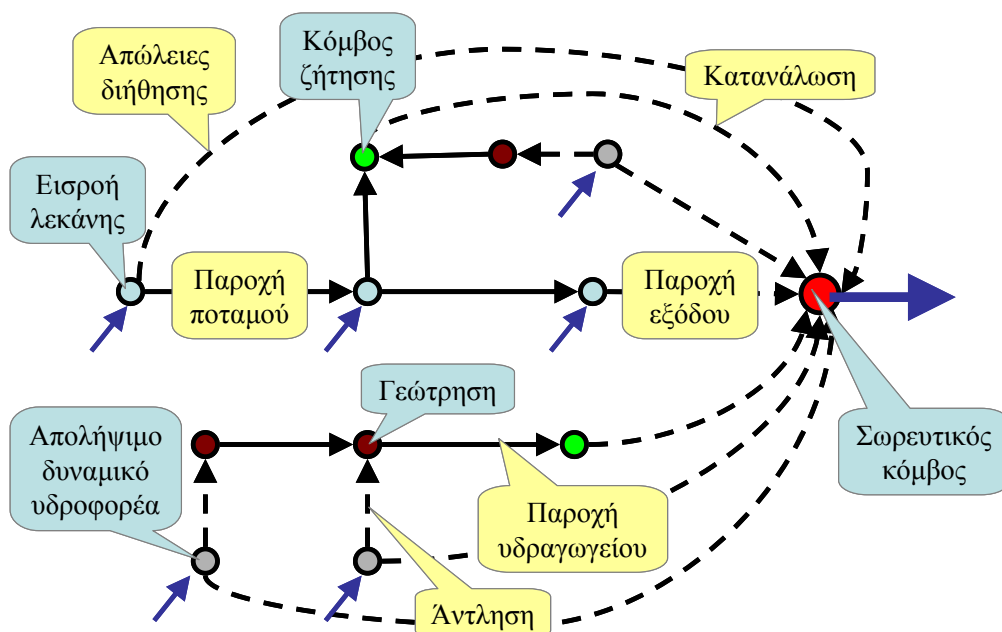


Σχήμα 3.7: Σχηματική παράσταση ενός υποθετικού υδροσυστήματος.

Στο Σχήμα 3.7 απεικονίζεται η διαμόρφωση ενός υποθετικού υδροσυστήματος, που περιλαμβάνει τρεις υπολεκάνες, τρεις ομάδες γεωτρήσεων και τέσσερα υδραγωγεία, στο οποίο εισάγονται δύο στόχοι ζήτησης νερού. Ο πρώτος σε προτεραιότητα στόχος μπορεί να ικανοποιηθεί είτε με απευθείας απόληψη επιφανειακών νερών από τον ποταμό (συνεπώς χωρίς κόστος), είτε με άντληση νερού από το παρακείμενο σύστημα γεωτρήσεων. Ο δεύτερος στόχος μπορεί να ικανοποιηθεί με άντληση νερού, από τις υπόλοιπες ομάδες γεωτρήσεων. Έστω ότι σε κάποιο χρονικό βήμα, από την επίλυση του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας είναι γνωστές οι πλευρικές εισροές στους τρεις κόμβους του

υδρογραφικού δικτύου, Q_1 , Q_2 και Q_3 , αντίστοιχα. Στο ανάντη τμήμα υδατορεύματος, είναι επίσης γνωστός ο συντελεστής διήθησης λ , που αποτελεί παράμετρο του μοντέλου. Επιπλέον, είναι γνωστές οι τιμές των στόχων απόληξης D_1 και D_2 , αντίστοιχα, οι παροχεταιυτικότητες και τα μοναδιαία κόστη των υδραγωγείων, καθώς και η αντλητική ικανότητα και τα μοναδιαία κόστη των ομάδων γεωτρήσεων.

Στο Σχήμα 3.8 απεικονίζεται ο μετασχηματισμός του υποθετικού υδροσυστήματος του παραδείγματος σε μοντέλο διγράφου. Με συνεχή γραμμή απεικονίζονται οι κλάδοι που εκφράζουν πραγματικές διαδρομές νερού (τμήματα υδατορευμάτων και υδραγωγεία), οι οποίοι διατηρούν την τοπολογία και τις χαρακτηριστικές τους ιδιότητες (παροχεταιυτικότητες και κόστη). Στο μοντέλο, εισάγονται και εικονικοί κλάδοι, που «μεταφέρουν» τις απολήψεις, τις απώλειες λόγω διήθησης και το υπολειπόμενο (μετά την πραγματοποίηση των αντλήσεων) απολήψιμο δυναμικό του υδροφορέα, σε έναν εικονικό σωρευτικό κόμβο, η εκροή του οποίου ισούται με το σύνολο της φυσικής προσφοράς νερού στο συγκεκριμένο χρονικό βήμα.



Σχήμα 3.8: Παράδειγμα μετασχηματισμού των συνιστωσών του υποθετικού υδροσυστήματος σε συνιστώσες του μοντέλου διγράφου.

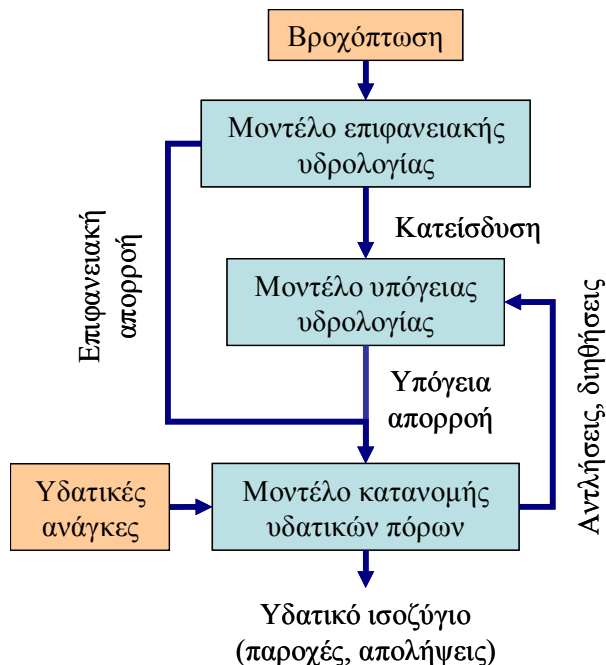
Γενικά, για κάθε λειτουργικό περιορισμό εισάγεται ένας εικονικός κλάδος, το μοναδιαίο κόστος του οποίου εξαρτάται από τη σειρά προτεραιότητας του αντίστοιχου στόχου. Ειδικότερα, στην περίπτωση στόχων απόληξης και περιορισμών ελάχιστης παροχής, το κόστος είναι αρνητικό ώστε να υποχρεώσει την μεταφορά νερού. Αντίθετα, στην περίπτωση περιορισμών μέγιστης παροχής, το κόστος είναι θετικό ώστε να επιβάλει ποινή στην παραβίαση του εν λόγω περιορισμού. Τα ιδεατά αυτά κόστη είναι, κατ' απόλυτη τιμή, μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερα από τα πραγματικά, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται κατά προτεραιότητα η ικανοποίηση των περιορισμών έναντι της ελαχιστοποίησης του κόστους μεταφοράς.

Η παραπάνω διαδικασία μαθηματικής αναπαράστασης των συνιστωσών ενός υδροσυστήματος σε μοντέλο διγράφου, σε ένα πλαίσιο βελτιστοποίησης της διαχείρισής τους, έχει υλοποιηθεί και στο πρόγραμμα ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ, που αποτελεί το κεντρικό υπολογιστικό εργαλείο του συστήματος, και περιγράφεται αναλυτικά στο σχετικό τεύχος θεωρητικής τεκμηρίωσης.

3.8 Ολοκλήρωση των μοντέλων στη διαδικασία προσομοίωσης

Στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 3.9 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της προσομοίωσης σε ένα χρονικό βήμα, με συνδυασμένη εφαρμογή των τριών μοντέλων που συζητήθηκαν προηγουμένως.

Αρχικά, εφαρμόζεται το μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας, με διαφορετικές παραμέτρους για κάθε ΜΥΑ. Είσοδοι του μοντέλου είναι η βροχόπτωση και η δυνητική εξατμοδιαπνοή (διαφορετικές για κάθε υπολεκάνη), ενώ έξοδοι είναι ο επιμερισμός της βροχόπτωσης σε πραγματική εξατμοδιαπνοή, επιφανειακή απορροή, κατείδυση και αποθήκευση εδαφικής υγρασίας (διαφορετικές για κάθε εδαφικό στοιχείο). Η κατανεμημένη απορροή ολοκληρώνεται στην επιφάνεια κάθε υπολεκάνης, στην οποία προστίθεται η εκροή των πηγών της (υπόγεια απορροή), και μεταφέρεται ως συγκεντρωμένη παροχή στον αντίστοιχο κόμβο του υδρογραφικού δικτύου. Στο σημείο αυτό προκύπτει η ανάγκη επαναληπτικών κύκλων, δεδομένου ότι η παροχή των πηγών επηρεάζεται από τις ανάντη αντλήσεις, που με τη σειρά τους πραγματοποιούνται ανάλογα με τη διαθεσιμότητα επαρκούς παροχής στα ποτάμια. Ως αρχική εκτίμηση, θεωρείται η παροχή των πηγών του προηγούμενου χρονικού βήματος, διαφορετικά θεωρείται η παροχή που προκύπτει από την επίλυση του μοντέλου υπόγειων νερών.



Σχήμα 3.9: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου προσομοίωσης του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

Η επίλυση του προβλήματος υπόγειας ροής προϋποθέτει την εκτίμηση της φόρτισης κάθε κυττάρου, που υπολογίζεται αθροίζοντας την τροφοδοσία λόγω κατείδυσης και διήθησης και αφαιρώντας τις αντλήσεις. Η κατείδυση είναι ήδη γνωστή, ενώ οι διηθήσεις και οι αντλήσεις προκύπτουν από την επίλυση του σχήματος βέλτιστης κατανομής των ροών του υδροσυστήματος. Ως αρχική εκτίμηση, λαμβάνονται οι τιμές του προηγούμενου χρονικού βήματος, που στη συνέχεια διορθώνονται. Με δεδομένες τις φορτίσεις, επιλύεται το μοντέλο υπόγειας ροής, έξοδοι του οποίου είναι οι στάθμες των δεξαμενών, οι παροχές των πηγών και οι υπόγειες εκφορτίσεις εκτός λεκάνης (π.χ. απώλειες προς τη θάλασσα ή προς γειτονικές λεκάνες).

Οι συγκεντρωμένες παροχές στους κόμβους μεταφέρονται μέσω του υδρογραφικού δικτύου έως την έξοδο της λεκάνης, ενώ ενδιάμεσα πραγματοποιούνται απολήψεις μέσω των υδραγωγείων και των γεωτρήσεων. Οι παραπάνω διεργασίες αναπαρίστανται με τη μορφή ενός μοντέλου διγράφου, οι ιδιότητες του οποίου αναπροσαρμόζονται με βάση τα επίκαιρα χαρακτηριστικά του συστήματος

(διαθεσιμότητα νερού, υδατικές ανάγκες, κόστος). Το μοντέλο προσομοίωσης διατυπώνει και επιλύει ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, έξοδοι του οποίου είναι οι παροχές στα υδατορεύματα και τα υδραγωγεία, οι απώλειες κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου λόγω διήθησης, και οι απολήψεις από τους κόμβους και τις γεωτρήσεις.

Μετά την ολοκλήρωση κάθε κύκλου, ο αλγόριθμος αν η εκτίμηση της παροχής των πηγών διαφέρει σημαντικά σε σχέση με την προηγούμενη, οπότε επαναλαμβάνεται η διαδικασία, όσον αφορά στα μοντέλα διαχείρισης και κατανομής των υδατικών πόρων, μέχρι η απόκλιση να γίνει μικρότερη από κάποια ανοχή. Συνήθως, για τη σταθεροποίηση της παροχής των πηγών, επαρκεί ένας μόνο κύκλος.

3.9 Μοντέλο διόδευσης ροών στο υδρογραφικό δίκτυο

3.9.1 Εισαγωγή

Κατά την ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ διαπιστώθηκε ότι, για προσομοιώσεις σε σχετικά λεπτό χρονικό βήμα (π.χ., μια ημέρα), είναι απαραίτητο να γίνεται διόδευση της απορροής που παράγεται από το μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας μέσα στο υδρογραφικό δίκτυο της υπό μελέτη λεκάνης. Η διόδευση αυτή επιλέχτηκε, κατ' αρχάς, να πραγματοποιείται με μια από τις γνωστές και καταξιωμένες μεθόδους που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Εκτεταμένη βιβλιογραφική έρευνα σε όλο το φάσμα των μεθόδων διόδευσης έδειξε ότι η μέθοδος, ή, αλλιώς, το μοντέλο, Muskingum-Cunge είναι η πλέον ενδεδειγμένη για την περίπτωση του παρόντος ερευνητικού έργου καθώς:

- έχει σχετική απλότητα στις διαφορικές εξισώσεις του, γεγονός που επιτρέπει επίλυση με ένα απλό σχήμα πεπερασμένων διαφορών
- διαθέτει παραμέτρους που συνδέονται με φυσικά χαρακτηριστικά του υδατορεύματος που μελετάται τόσο σε ό,τι αφορά τη γεωμετρία του πεδίου ροής όσο και τις υδραυλικές ιδιότητές του
- λόγω ακριβώς του παραπάνω χαρακτηριστικού, επιτρέπει την αποφυγή εισαγωγής νέων παραμέτρων στο όλο σύστημα μοντέλων της ΥΔΡΟΓΕΙΟΥ, που είναι ήδη επιβαρυνμένο με σχετικά μεγάλο αριθμό παραμέτρων
- παρέχει πληροφορία σε κατανομημένη μορφή κατά μήκος της κοίτης του υπό μελέτη υδατορεύματος, πράγμα που είναι ιδιαίτερα επιθυμητό για την σωστή αναπαράσταση της επικοινωνίας του υδατορεύματος και του υποκείμενου υδροφορέα, εφόσον, βέβαια, υπάρχει τέτοιος υδροφορέας
- είναι επαρκώς μελετημένο και υποστηρίζεται από εκτεταμένη βασική έρευνα.

Το μοντέλο αυτό, από την εμφάνισή του στη βιβλιογραφία (Cunge, 1969), αποτέλεσε αντικείμενο πολλών ερευνών (π.χ., Dooge *et al.*, 1982). Ο κατάλογος των σχετικών δημοσιευμένων άρθρων είναι ιδιαίτερα μακρύς. Στο παρόν τεύχος δεν δίνουμε τέτοιο κατάλογο, αλλά ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στον Fread (1992). Πάντως, τα χαρακτηριστικά του μοντέλου όπως αυτό χρησιμοποιήθηκε προέκυψαν μετά από σύνθεση στοιχείων της σχετικής βιβλιογραφίας.

Το παρόν υποκεφάλαιο περιλαμβάνει: (α) παρουσίαση του μοντέλου από θεωρητική άποψη, (β) το αριθμητικό σχήμα επίλυσης των εξισώσεων του μοντέλου, (γ) την διαδικασία εκτίμησης των παραμέτρων του μοντέλου, (δ) την εκτίμηση του χρονικού και χωρικού βήματος, (ε) τον επιμερισμό του όγκου απορροής στο χρονικό βήμα προσομοίωσης, (στ) την πορεία υπολογισμών του μοντέλου στο μεμονωμένο τμήμα υδατορεύματος και το πλήρες υδρογραφικό δίκτυο, και (ζ) τις απαιτήσεις σε δεδομένα που θα πρέπει να αποθηκευθούν στη βάση.

3.9.2 Περιγραφή του μοντέλου

Στο μοντέλο Muskingum-Cunge θεωρείται ότι ισχύουν όλες οι παραδοχές που γίνονται στα τυπικά υδροδυναμικά μοντέλα, τα οποία λαμβάνουν υπ' όψη τους τις πλήρεις εξισώσεις St. Venant για την διατήρηση της ποσότητας κίνησης. Συνοπτικά, οι κύριες παραδοχές είναι οι ακόλουθες:

- ισχύουν οι εξισώσεις της Μηχανικής των Ρευστών·
- η ροή θεωρείται μονοδιάστατη, μη μόνιμη και με ελεύθερη επιφάνεια·
- τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διατομών του υπό μελέτη υδατορεύματος είναι χρονικά αμετάβλητα·
- τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη υδατορεύματος (π.χ., συντελεστές Manning) είναι χρονικά αμετάβλητα·
- το υδατόρευμα έχει αρχική μη μηδενική παροχή νερού (δεν επιτρέπεται να είναι ξηρό) κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης.

Πέραν των υποθέσεων αυτών που δίνονται αναλυτικά σε κλασικά βιβλία της Υδραυλικής, στο μοντέλο δεν θεωρούνται οι πλήρεις εξισώσεις St. Venant για τη διατήρηση της ποσότητας κίνησης, αλλά αυτές απλοποιούνται με βάση τις ακόλουθες παραδοχές:

- αγνοείται ο όρος της τοπικής επιτάχυνσης·
- αγνοείται ο όρος της μεταθετικής επιτάχυνσης·
- αγνοούνται οι απώλειες λόγω διαστολής και συστολής των διατομών του υδατορεύματος·
- αγνοούνται οι πρόσθετες απώλειες τριβών που σχετίζονται με εσωτερική απώλεια ιξώδους μη Νευτώνειων ρευστών·
- αγνοείται η συμβολή της πλευρικής εισροής (ή εκροής) στην ποσότητα κίνησης·
- αγνοείται η συμβολή των μαιανδρισμών.

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές η εξίσωση ποσότητα κίνησης γράφεται:

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (3.27)$$

όπου S_f είναι η κλίση της γραμμής ενάργειας λόγω τριβών, S_0 η κλίση του πυθμένα της κοίτης του υδατορεύματος, y το βάθος ροής του νερού, και x η τεταγμένη άξονα που βαίνει κατά την έννοια του κύριου άξονα ροής.

Η εξίσωση συνέχειας γράφεται:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (3.28)$$

όπου A είναι η επιφάνεια της υγρής διατομής, Q η παροχή, q η πλευρική παροχή ανά μονάδα μήκους, και t ο χρόνος.

3.9.3 Επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου

Οι εξισώσεις του μοντέλου Muskingum-Cunge που δόθηκαν στο προηγούμενο εδάφιο επιδέχονται επίλυση μέσω ενός απλού σχήματος προς τα πίσω πεπερασμένων διαφορών. Αυτό περιλαμβάνει χωροχρονική διακριτοποίηση του πεδίου ροής με τα ακόλουθα βήματα:

- Δx = χωρικό βήμα προσομοίωσης·
- Δt = χρονικό βήμα προσομοίωσης.

Με βάση το χωρικό βήμα, χωρίζεται το υπό μελέτη τμήμα υδατορεύματος σε n υπομήματα μήκους Δx το καθένα. Σε κάθε υπομήμα i χωριστά, το σχήμα πεπερασμένων διαφορών δίνει τη σχέση:

$$O_{i,t} = C_{1,i} I_{i,t-1} + C_{2,i} I_{i,t} + C_{3,i} O_{i,t-1} + C_{4,i} q_{i,t} \Delta x \quad (3.29)$$

όπου:

$O_{i,t}$ η παροχή εξόδου του υποτιμήματος i στο χρόνο t

$I_{i,t-1}$ η παροχή εισόδου του υποτιμήματος i στο χρόνο $t - 1$.

$I_{i,t}$ η παροχή εισόδου του υποτιμήματος i στο χρόνο t

$O_{i,t-1}$ η παροχή εξόδου του υποτιμήματος i στο χρόνο $t - 1$.

$q_{i,t}$ η χρονικά μέση πλευρική παροχή εισόδου του υποτιμήματος i στο χρονικό διάστημα $[t - 1, t]$.

$C_{k,i}$, $k = 1, \dots, 4$ συντελεστές διόδευσης για το υποτίμημα i .

Οι συντελεστές διόδευσης δίνονται από τις σχέσεις:

$$C_{1,i} = \frac{\Delta t - K_{ii} X_{ii}}{2K_{ii}(1 - X_{ii}) + \Delta t} \quad (3.30)$$

$$C_{2,i} = \frac{\Delta t + K_{ii} X_{ii}}{2K_{ii}(1 - X_{ii}) + \Delta t} \quad (3.31)$$

$$C_{3,i} = \frac{2K_{ii}(1 - X_{ii}) - \Delta t}{2K_{ii}(1 - X_{ii}) + \Delta t} \quad (3.32)$$

$$C_{4,i} = \frac{2\Delta t}{2K_{ii}(1 - X_{ii}) + \Delta t} \quad (3.33)$$

όπου K_{ii} είναι ο χρόνος διάδοσης του πλημμυρικού κύματος στο υποτίμημα i και X_{ii} είναι αδιάστατος συντελεστής. Τα τελευταία δύο μεγέθη ισχύουν στο χρονικό διάστημα $[t - 1, t]$ και ορίζονται ως:

$$K_{ii} = \frac{\Delta x}{c_{ii}} \quad (3.34)$$

$$X_{ii} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q_{ii}}{B_{ii} S_0 c_{ii} \Delta x} \right) \quad (3.35)$$

όπου c_{ii} η ταχύτητα διάδοσης του πλημμυρικού κύματος, B_{ii} το μέσο πλάτος ελεύθερης επιφάνειας νερού και Q_{ii} η παροχή αναφοράς στο υποτίμημα i στο χρονικό διάστημα $[t - 1, t]$.

Συμπερασματικά, για την εκτίμηση των συντελεστών διόδευσης σε κάθε υποτίμημα και κάθε χρονικό βήμα απαιτούνται εκτιμήσεις των ακόλουθων μεγεθών:

- η ταχύτητα διάδοσης του πλημμυρικού κύματος
- το μέσο πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας νερού.

Η εκτίμηση των μεγεθών αυτών, με βάση άλλα γνωστά μεγέθη, σχολιάζεται στο επόμενο εδάφιο.

3.9.4 Εκτίμηση παραμέτρων

Η ταχύτητα διάδοσης του πλημμυρικού κύματος c σε ένα υδατόρευμα, σύμφωνα με την προσέγγιση του κινηματικού κύματος, δίνεται από την απλή σχέση:

$$c = \frac{\partial Q}{\partial A} \quad (3.36)$$

όπου Q είναι η παροχή και A η επιφάνεια της υγρής διατομής.

Στο μοντέλο που εντάχθηκε στην ΥΔΡΟΓΕΙΟ θεωρήθηκε ότι σε κάθε τμήμα υδατορεύματος διατίθεται μια τυπική τραπεζοειδής διατομή που είναι αντιπροσωπευτική του τμήματος υδατορεύματος, καθώς και μια τιμή της υδραυλικής τραχύτητας κατά Manning που είναι επίσης

αντιπροσωπευτική του υπό μελέτη τμήματος υδατορεύματος. Με βάση αυτά τα δεδομένα ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

Πρώτα, εφαρμόζεται η γνωστή σχέση του Manning στο υπό μελέτη τμήμα και παράγονται ζεύγη τιμών παροχής και επιφάνειας υγρής διατομής.

Στη συνέχεια, με βάση τα ζεύγη αυτά, βαθμονομείται μια απλή σχέση τύπου δύναμης της μορφής:

$$Q = a A^b \quad (3.37)$$

όπου a και b συντελεστές, σταθεροί για το συγκεκριμένο τμήμα υδατορεύματος.

Όπως είναι προφανές, ο υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης κύματος γίνεται εύκολα αναλυτικά ως εξής:

$$c = \frac{\partial Q}{\partial A} = a b A^{b-1} \quad (3.38)$$

Για δεδομένο τμήμα υδατορεύματος και δεδομένο χρονικό βήμα, εκτιμάται η αντιπροσωπευτική επιφάνεια A από τις γνωστές τιμές της παροχής και, στη συνέχεια, η ταχύτητα διάδοσης του κύματος από την εξίσωση (3.38).

Σε ότι αφορά στην εκτίμηση του πλάτους της ελεύθερης επιφάνεια B , εφαρμόστηκε μια απολύτως όμοια διαδικασία. Η μόνη διαφορά είναι ότι, αντί της σχέσης δύναμης, βρέθηκε ότι μια γραμμική σχέση της μορφής:

$$B = d + e A \quad (3.39)$$

όπου d και e παράμετροι, είναι επαρκής.

Η παραπάνω ανάλυση επιτρέπει την συστηματοποίηση των βημάτων υπολογισμού των συντελεστών διόδευσης σε κάθε χρονικό βήμα. Γίνονται οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

1. Από τις γνωστές παροχές του χρονικού βήματος εκτιμάται μια μέση τιμή που είναι η παροχή αναφοράς.
2. Με βάση την παροχή αναφοράς εκτιμώνται τα μεγέθη της ταχύτητας διάδοσης του κύματος και το πλάτος ελεύθερης επιφάνειας, από τις εξισώσεις (3.38) και (3.39), αντίστοιχα.
3. Εκτιμώνται ο χρόνος διάδοσης του κύματος K και ο συντελεστής X από τις εξισώσεις (3.34) και (3.35), αντίστοιχα.
4. Υπολογίζονται οι συντελεστές διόδευσης από τις σχέσεις (3.30) έως (3.33).

3.9.5 Υπολογισμός χρονικού και χωρικού βήματος προσομοίωσης

Πρώτα πραγματοποιείται η επιλογή του χρονικού βήματος. Για την επιλογή του τίθενται δύο κριτήρια:

- το χρονικό βήμα πρέπει να επιτρέπει την παρακολούθηση της διακύμανσης της πλευρικής εισροής σε κάθε τμήμα υδατορεύματος·
- το χρονικό βήμα πρέπει να επιτρέπει την παρακολούθηση της διάδοσης του κύματος σε κάθε τμήμα υδατορεύματος.

Οι απαιτήσεις αυτές οδηγούν στην επιλογή μιας τιμής που είναι η ελάχιστη των ακόλουθων δύο τιμών:

- ο χρόνος διαδρομής του κύματος στον κλάδο για τη μέγιστη αναμενόμενη παροχή·
- το υποπολλαπλάσιο του ελάχιστου χρόνου ανόδου του υδρογραφήματος πλευρικής εισροής.

Σύμφωνα με αυτά τα κριτήρια, θα έπρεπε το χρονικό βήμα να μεταβάλλεται από το ένα υποτμήμα στο άλλο, αλλά και κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Επιλέχτηκε το χρονικό βήμα να είναι σταθερό (για όλη την προσομοίωση και όλο το υδρογραφικό δίκτυο που μελετάται) και ίσο με μια μικρή τιμή που καλύπτει και τη δυσμενέστερη περίπτωση. Έτσι, το χρονικό βήμα δίνεται εξωτερικά από τον χρήστη, ο οποίος θεωρείται ότι το έχει υπολογίσει το χρόνο διαδρομής του κύματος στο μικρότερο σε μήκος τμήμα υδατορεύματος για την μέγιστη αναμενόμενη παροχή και μετά από εξέταση και του ελάχιστου αναμενόμενου χρόνου ανόδου του υδρογραφήματος πλευρικής εισροής ο οποίος, στη συνήθη περίπτωση, δεν πρέπει να είναι δεσμευτικός.

Από τη στιγμή που έχει επιλεγεί το χρονικό βήμα Δt , γίνεται εκτίμηση του απαιτούμενου χωρικού βήματος Δx . Γι' αυτό, γίνεται χρήση του αριθμού Courant (C) που, για δεδομένη τιμή της ταχύτητας διάδοσης κύματος c , δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{c \Delta t}{\Delta x} \quad (3.40)$$

Το χωρικό βήμα εκτιμάται χωριστά για κάθε τμήμα υδατορεύματος από τη σχέση (3.40) θεωρώντας μοναδιαίο αριθμό Courant για την μέγιστη αναμενόμενη ταχύτητας διάδοσης κύματος $c_{\max,i}$ που αντιστοιχεί στη μέγιστη αναμενόμενη παροχή. Αναλυτικά:

$$\Delta x_i = c_{\max,i} \Delta t \quad (3.41)$$

3.9.6 Επιμερισμός παροχών από το χρονικό βήμα των δεδομένων στο χρονικό βήμα προσομοίωσης

Στα προηγούμενα εδάφια, το χρονικό βήμα αναφέρεται πάντοτε στο χρονικό βήμα με βάση το οποίο πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί του μοντέλου. Το χρονικό αυτό βήμα διαφέρει γενικά από εκείνο του χρονικού βήματος των δεδομένων που διατίθενται αλλά και του χρονικού βήματος στο οποίο απαιτούνται τα εξαγόμενα του μοντέλου. Εδώ θα θεωρήσουμε ότι το χρονικό βήμα των δεδομένων, δηλαδή των χρονοσειρών εισόδου, συμπίπτει με το απαιτούμενο χρονικό βήμα των εξαγόμενων. Έτσι, θεωρούμε δύο διαφορετικά χρονικά βήματα:

- το χρονικό βήμα προσομοίωσης Δt
- το χρονικό βήμα των δεδομένων $\Delta t'$

Μάλιστα, το χρονικό βήμα προσομοίωσης είναι πολύ μικρότερο από εκείνο των δεδομένων. Εξ αυτού του λόγου, τίθεται το πρόβλημα επιμερισμού των δεδομένων εισόδου που είναι οι χρονοσειρές της πλευρικής εισροής στα τμήματα υδατορεύματος. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με τις ακόλουθες παραδοχές:

- το χρονικό βήμα προσομοίωσης για την εφαρμογή του μοντέλου διόδευσης στην ΥΔΡΟΓΕΙΟ θα είναι η ημέρα (στην περίπτωση μηνιαίας προσομοίωσης, δεν έχει νόημα η διόδευση)
- δεν διατίθεται καμία υδρολογική πληροφορία στο χρονικό βήμα προσομοίωσης
- στο χρονικό διάστημα μιας ημέρας, η συνήθης μορφή των παρατηρημένων υδρογραφημάτων περιλαμβάνει μια κύρια αιχμή και ίσως και άλλες δευτερεύουσες
- η υπόθεση μίας και μοναδικής αιχμής δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα
- το απλούστερο σχήμα υδρογραφήματος περιλαμβάνει έναν απότομο ανοδικό κλάδο και έναν καθοδικό κλάδο με πιο ήπια και προοδευτικά μειούμενη κλίση
- ο όγκος απορροής του χρονικού βήματος των δεδομένων πρέπει να διατηρείται από το υδρογράφημα στο χρονικό βήμα της προσομοίωσης.

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές καταρτίστηκε ένα εξαιρετικά απλό εμπειρικό μοντέλο επιμερισμού που έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

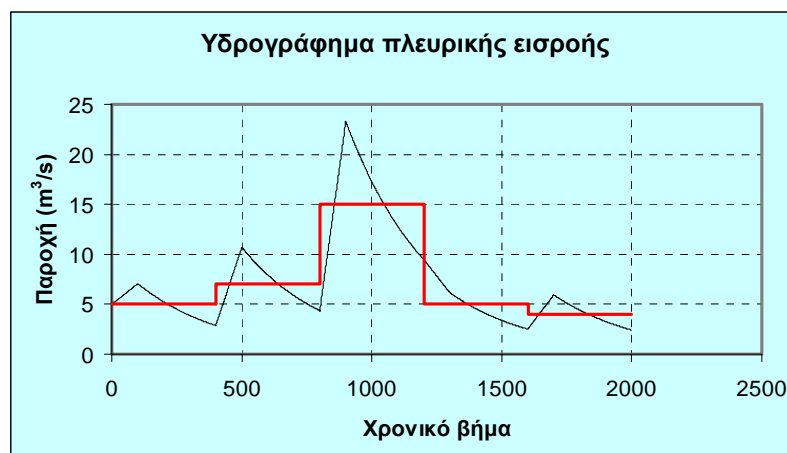
- Το σχήμα του υδρογραφήματος εντός του χρονικού βήματος των δεδομένων καθορίζεται ως ευθεία γραμμή (ανοδικός κλάδος σε περίπτωση πλημμύρας ή καθοδικός κλάδος σε περίπτωση στείρευσης) για το ένα τέταρτο της διάρκειας του χρονικού βήματος των δεδομένων και φθίνουσα εκθετική καμπύλη για τα υπόλοιπα τρία τέταρτα της διάρκειας του χρονικού βήματος των δεδομένων.
- Οι ελεύθερες παράμετροι του μοντέλου είναι δύο: (α) η παροχή αιχμής του υδρογραφήματος Q_p και (β) ο συντελεστής στείρευσης η της φθίνουσας εκθετικής καμπύλης. Το μέγιστο πλήθος παραμέτρων είναι $2nN$, όπου n ο αριθμός των τμημάτων υδατορεύματος και N ο αριθμός των χρονικών περιόδων προσομοίωσης, μετρημένων με το χρονικό βήμα των δεδομένων.
- Η διατήρηση του όγκου απορροής εισάγει nN περιοριστικές συνθήκες. Συνεπώς μπορούν να επιλεγούν αυθαίρετα μόνο nN παράμετροι κατά μέγιστο.
- Στην απλούστερη περίπτωση, που τελικά επιλέχθηκε, εκτιμώνται οι αιχμές των υδρογραφημάτων (nN τον αριθμό) από τις περιοριστικές συνθήκες διατήρησης του όγκου απορροής. Σε ό,τι αφορά τον συντελεστή στείρευσης η , αυτός επιλέγεται σταθερός στο χώρο και το χρόνο και έτσι αποτελεί μια και μοναδική ελεύθερη παράμετρο που επιλέγει ο χρήστης του μοντέλου.
- Η επιλογή του συντελεστή στείρευσης δεν είναι, τελικά, απολύτως αυθαίρετη καθόσον υπαγορεύεται από την ανάγκη λήψης ρεαλιστικών υδρογραφημάτων εισόδου μετά τον επιμερισμό (χωρίς θλάσεις κλπ.).

Για λόγους πληρότητας της παρουσίασης, δίνεται η εξίσωση επιμερισμού του καθοδικού κλάδου του υδρογραφήματος

$$Q_{it} = Q_{pi} \exp(-\eta t) \quad (3.42)$$

όπου Q_{it} είναι η παροχή του υποτμήματος i στο χρόνο t , Q_{pi} η παροχή αιχμής του υποτμήματος i , και η είναι ο συντελεστής στείρευσης του υδρογραφήματος.

Τα παραπάνω υλοποιήθηκαν σε κατάλληλη ρουτίνα επιμερισμού που ενσωματώθηκε στο μοντέλο διόδευσης. Ένα παράδειγμα με δεδομένα ημερήσιας παροχής για διάρκεια πέντε ημερών και χρονικό βήμα προσομοίωσης 216 s παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10: Παράδειγμα επιμερισμούς ημερήσιας παροχής για διάρκεια πέντε ημερών με την απλή μέθοδο επιμερισμού της ΥΔΡΟΓΕΙΟΥ.

3.9.7 Πορεία υπολογισμών του μοντέλου

Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται ανεξάρτητα για κάθε τμήμα υδατορεύματος και κάθε χρονικό βήμα δεδομένων χωριστά. Πριν από την εκκίνηση της προσομοίωσης, γίνεται ανάκτηση δεδομένων και στη συνέχεια πραγματοποιούνται οι ακόλουθοι προκαταρκτικοί υπολογισμοί:

- Εντοπισμός σύνδεσης κλάδων ποταμού (τμήματα υδατορεύματος).
- Υπολογισμός δευτερογενών παραμέτρων των κλάδων χρήσιμων στη διόδευση (παράμετροι σχέσεων παροχής-επιφάνειας υγρής διατομής και πλάτους ελεύθερης επιφάνειας-επιφάνειας υγρής διατομής).
- Αρχικοποίηση παροχής εισόδου και εξόδου του κάθε κλάδου.

Μετά την εκκίνηση της προσομοίωσης και για κάθε χρονική περίοδο του χρονικού βήματος δεδομένων, ακολουθούνται τα εξής βήματα υπολογισμών:

Βήμα 1ο: Επιμερισμός ημερήσιων παροχών στο χρονικό βήμα προσομοίωσης.

Βήμα 2ο: Κυρίως διόδευση ή, αλλιώς, υπολογισμός της παροχής εξόδου σε κάθε κλάδο στο χρονικό βήμα προσομοίωσης.

Βήμα 3ο: Συνάθροιση από το χρονικό βήμα προσομοίωσης στο χρονικό βήμα των δεδομένων.

Στο Βήμα 2 πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί με σειριακό τρόπο στα υποτμήματα του τμήματος που εξετάζεται κάθε φορά.

Οι παραπάνω υπολογισμοί αφορούν το κάθε τμήμα υδατορεύματος χωριστά. Σε ό,τι αφορά στην επίλυση για το σύνολο του δικτύου σημειώνουμε τα εξής:

- Οι υπολογισμοί γίνονται σειριακά, από τους πλέον ανάντη κόμβους του δικτύου (κόμβους κεφαλής) προς τα κατόντη.
- Στις συμβολές ρεμάτων, πρώτα ολοκληρώνονται οι υπολογισμοί σε όλα τα συμβάλλοντα ρέματα και, στη συνέχεια, αυτοί προχωρούν προς τα κατόντη.
- Στους κόμβους συμβολής εφαρμόζεται μόνον η εξίσωση διατήρησης της μάζας.

3.9.8 Δεδομένα μοντέλου

Με βάση την παραπάνω ανάλυση του μοντέλου προκύπτουν και οι απαιτήσεις του σε δεδομένα. Αυτά χωρίζονται σε σταθερά δεδομένα του φυσικού συστήματος (ανεξάρτητα του χρόνου), υδρολογικά δεδομένα (χρονοσειρές ή απλά μεμονωμένες τιμές) και παραμέτρους. Τα σταθερά δεδομένα είναι τα ακόλουθα:

- Αριθμός τμημάτων υδατορεύματος
- Για κάθε τμήμα:
 1. Κόμβος αρχής
 2. Κόμβος τέλους
 3. Μέσος συντελεστής τραχύτητας κατά Manning
 4. Μέση κατά μήκος κλίση
 5. Μήκος
 6. Μέσο πλάτος πυθμένα τυπικής τραπεζοειδούς διατομής
 7. Μέση κλίση πρανών τυπικής τραπεζοειδούς διατομής
 8. Αναμενόμενη μέγιστη παροχή

Τα υδρολογικά δεδομένα υπό μορφή χρονοσειρών είναι

1. Χρονοσειρές πλευρικής εισροής σε κάθε τμήμα
2. Τιμές αρχικής παροχής εισόδου και εξόδου σε κάθε τμήμα

Οι τιμές των παραμέτρων που δίνει ο χρήστης είναι:

1. το χρονικό βήμα προσομοίωσης, και
2. ο συντελεστής στείρευσης της φθίνουσας εκθετικής καμπύλης για τον επιμερισμό της παροχής.

Το εξαγόμενο σε κάθε χρονική περίοδο προσομοίωσης είναι η παροχή εξόδου κάθε τμήματος υδατορεύματος για το χρονικό βήμα των δεδομένων (μετά τη συνάθροιση).

4 Γεωγραφικά δεδομένα και επεξεργασίες

Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ χρησιμοποιεί ως εισόδους διάφορα επίπεδα γεωγραφικής πληροφορίας, σχετικά με την επιφανειακή και υπόγεια υδρολογία της περιοχής μελέτης. Τα επίπεδα αυτά παράγονται στο Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας (ΣΓΠ) και αποθηκεύονται σε μια Βάση Γεωγραφικών Δεδομένων (ΒΓΔ). Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι τύποι των γεωγραφικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται και οι χωρικές επεξεργασίες στο ΣΓΠ, ενώ η οργάνωση των δεδομένων και η δομή της ΒΓΔ, που αποτελούν αντικείμενο της ενότητας εργασίας 1, περιγράφονται στο Τεύχος 1.

4.1 Γεωγραφικά δεδομένα

Τα γεωγραφικά δεδομένα διακρίνονται σε πρωτογενή (πρέπει να οριστούν από τον χρήστη) και παραγόμενα (παράγονται από το ΣΓΠ).

4.1.1 Πρωτογενή γεωγραφικά δεδομένα

Τα πρωτογενή δεδομένα πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της ΒΓΔ (κεφ. 1.2) τις σχετικές με τη γεωμετρία, τα πεδία των πινάκων και την τοπολογία.

Όριο περιοχής μελέτης

Το όριο της περιοχής μελέτης. Δίνεται με μορφή πολύγωνου.

Μοντέλο υψομέτρων

Ένα μοντέλο υψομέτρων της περιοχής μελέτης. Δίνεται σε μορφή ψηφιδωτής διαμέρισης.

Υδροφορείς

Οι υδροφορείς δίνονται με γεωμετρία πολύγωνου και α) δεν επικαλύπτονται, β) δεν τέμνονται και γ) καλύπτονται από ένα πολύγωνο μίας υπολεκάνης απορροής.

Πηγές

Οι πηγές δίνονται με γεωμετρία σημείου.

Γεωτρήσεις

Οι γεωτρήσεις δίνονται με γεωμετρία σημείου.

Σημεία μέτρησης παροχής υδατορευμάτων

Τα σημεία μέτρησης παροχής δίνονται με γεωμετρία σημείου.

Κάλυψη γης, υδροπερατότητα, κλπ.

Η κάλυψη γης, η υδροπερατότητα ή όποια άλλη ιδιότητα ορίζει τις μονάδες υδρολογικής απόκρισης, δίνονται με γεωμετρία πολύγωνου. Τα πολύγωνα κάθε επίπεδου: (α) δεν επικαλύπτονται, (β) δεν τέμνονται, και (γ) καλύπτονται από ένα πολύγωνο μίας υπολεκάνης απορροής. Στον πίνακα δεδομένων πρέπει να δίνεται τουλάχιστον ένας τέτοιος τύπος.

Αρδευτικό δίκτυο

Το αρδευτικό δίκτυο δίνεται με γεωμετρία γραμμής.

4.1.2 Παραγόμενα γεωγραφικά δεδομένα

Διεύθυνση ροής

Η διεύθυνση ροής των επιφανειακών υδάτων παράγεται από το μοντέλο υψομέτρων και αποθηκεύεται με μορφή ψηφιδωτής διαμέρισης.

Συγκέντρωση νερού

Η συγκέντρωση νερού παράγεται από τη διεύθυνση ροής και αποθηκεύεται με τη μορφή ψηφιδωτής διαμέρισης.

Τμήματα υδρογραφικού δικτύου

Τα τμήματα του υδρογραφικού δικτύου προκύπτουν από τη διεύθυνση ροής. Το δίκτυο εξαρτάται από το κατώφλι συγκέντρωσης νερού που ορίζεται από το χρήστη. Τα τμήματα του δικτύου αποθηκεύονται με γεωμετρία γραμμής και έχουν ιδιότητες: (α) από κόμβο, (β) σε κόμβο.

Κόμβοι υδρογραφικού δικτύου

Κάθε κόμβος ορίζει την αρχή ή το τέλος ενός τμήματος του υδρογραφικού δικτύου. Οι κόμβοι έχουν γεωμετρία σημείου.

Υπολεκάνες απορροής

Οι υπολεκάνες απορροής προκύπτουν από το μοντέλο υψομέτρων και τις εξόδους τους. Οι εξόδοι (κόμβοι υδρογραφικού δικτύου, σταθμοί μέτρησης παροχής, άλλες θέσεις) ορίζονται από το χρήστη. Οι υπολεκάνες απορροής έχουν γεωμετρία πολύγωνου και (α) δεν επικαλύπτονται, (β) δεν τέμνονται, και (γ) καλύπτονται από την λεκάνη απορροής.

Λεκάνη απορροής

Η λεκάνη απορροής είναι η ένωση των υπολεκανών απορροής ενός ποταμού και έχει γεωμετρία πολύγωνου.

Μονάδες υδρολογικής απόκρισης

Οι Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης (ΜΥΑ) προκύπτουν από την ένωση των επιπέδων κάλυψης γης, υδροπερατότητας ή όποιων άλλων επιπέδων πληροφορίας μπορούν να τις ορίσουν. Έχουν γεωμετρία πολύγωνου και (α) δεν επικαλύπτονται, (β) δεν τέμνονται, και (γ) καλύπτονται από την λεκάνη απορροής.

Ακμές υδροφορέων

Οι ακμές των υδροφορέων προκύπτουν από τα πολύγωνα των υδροφορέων. Έχουν γεωμετρία γραμμής και ιδιότητες: (α) αριστερό πολύγωνο, (β) δεξί πολύγωνο.

Κέντρα βάρους υδροφορέων

Τα κέντρα βάρους των υδροφορέων χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των αποστάσεων μεταξύ των υδροφορέων.

Τμήματα αρδευτικού δικτύου

Τα τμήματα του αρδευτικού δικτύου προκύπτουν από το αρδευτικό δίκτυο. Κάθε τμήμα έχει ως ιδιότητα τον κόμβο αρχής και τον κόμβο τέλους.

Κόμβοι αρδευτικού δικτύου

Κάθε κόμβος ορίζεται ως αρχή ή τέλος ενός τμήματος του αρδευτικού δικτύου.

4.2 Ονοματολογία

Τα δεδομένα (πρωτογενή ή παραγόμενα) αποθηκεύονται στη Βάση Γεωγραφικών Δεδομένων (ΒΓΔ). Στον σχεδιασμό και την υλοποίηση της ΒΓΔ χρησιμοποιείται η ονοματολογία του Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Ονοματολογία για τα γεωγραφικά δεδομένα.

| Ονομασία | Εξήγηση |
|-------------------------|--|
| Aqueduct_Segment | Τμήμα υδραγωγείου |
| Aqueduct_Node | Κόμβος υδραγωγείου |
| Boundary | Όριο περιοχής μελέτης |
| Borehole | Γεώτρηση |
| GWB_Cell | Κύτταρο υδροφορέα |
| GWB_Cell_Center | Κέντρο βάρους κύτταρου υδροφορέα |
| GWB_Cell_Edge | Ακμή κύτταρου υδροφορέα |
| HRU | Μονάδα υδρολογικής απόκρισης, ΜΥΑ |
| Reservoir | Λίμνη, ταμιευτήρας |
| Land_Cover | Κάλυψη γης |
| Monitoring_Station | Σταθμός μέτρησης μετεωρολογικών μεταβλητών |
| Monitoring_Surface_Flow | Θέση μέτρησης παροχής υδατορεύματος |
| Permeability | Υδατοπερατότητα |
| River_Basin | Λεκάνη απορροής |
| RWB_Segment | Τμήμα υδρογραφικού δικτύου |
| RWB_Node | Κόμβος υδρογραφικού δικτύου |
| Spring | Πηγή |
| Subbasin | Υπολεκάνη απορροής |
| Subbasin_Outlet | Έξοδος υπολεκάνης απορροής |

4.3 Γεωγραφικές επεξεργασίες

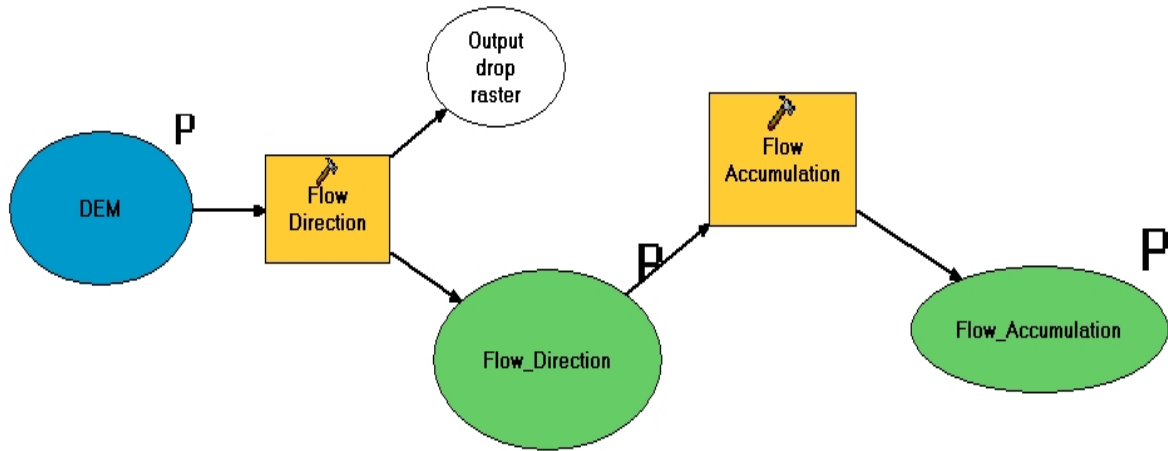
Οι γεωγραφικές επεξεργασίες που εφαρμόζονται πάνω στα δεδομένα καταγράφονται στη συνέχεια. Στα σχήματα ακολουθούνται οι συμβάσεις του Σχήματος 4.1 (input: είσοδος, function: επεξεργασία, output: έξοδος).



Σχήμα 4.1: Συμβάσεις για τις γεωγραφικές επεξεργασίες.

4.3.1 Διεύθυνση ροής - Συγκέντρωση νερού

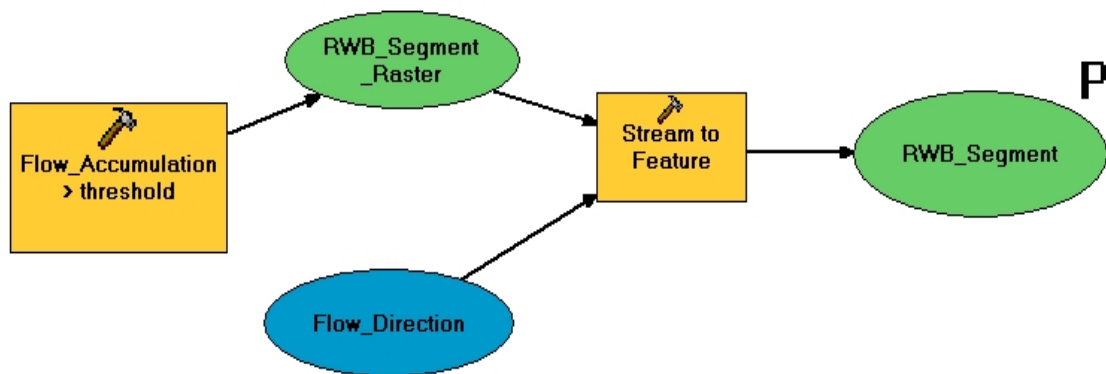
Δίνεται ένα DEM από το χρήστη και παράγονται η διεύθυνση ροής και η συγκέντρωση του νερού στην περιοχή μελέτης.



Σχήμα 4.2: Διεύθυνση ροής - συγκέντρωση νερού.

4.3.2 Τμήματα υδρογραφικού δικτύου

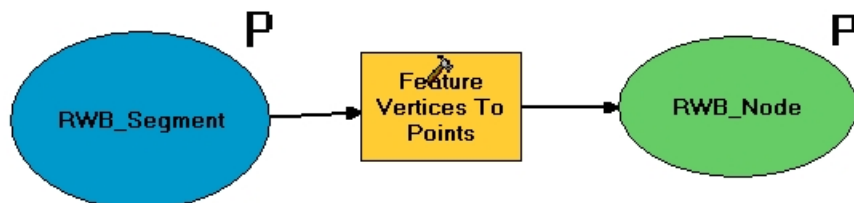
Δίνεται ένα κατώφλι συγκέντρωσης νερού που ορίζει την ελάχιστη περιοχή για να δημιουργηθεί υδατόρευμα.



Σχήμα 4.3: Τμήματα υδρογραφικού δικτύου.

4.3.3 Κόμβοι υδρογραφικού δικτύου

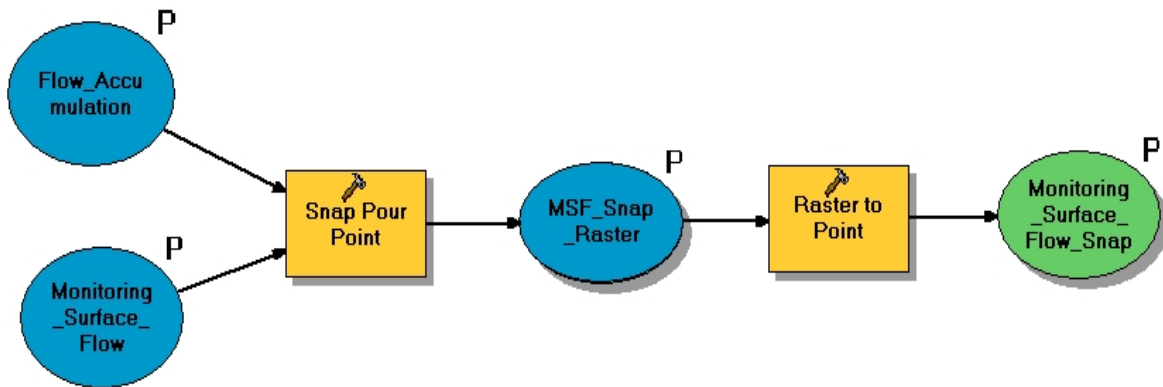
Οι κόμβοι του υδρογραφικού δικτύου προκύπτουν από τα τμήματα του.



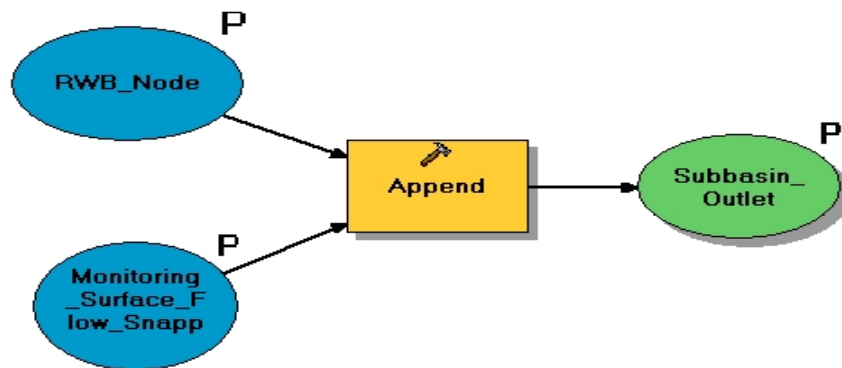
Σχήμα 4.4: Κόμβοι υδρογραφικού δικτύου.

4.3.4 Έξοδοι υπολεκανών απορροής

Οι έξοδοι των υπολεκανών απορροής ορίζονται από την ένωση των κόμβων του υδρογραφικού δικτύου, των σημείων μέτρησης παροχής και όποιων άλλων σημείων ορίζει ο χρήστης. Πριν από την ένωση των διαφόρων επιπέδων γίνεται μία διαδικασία μετατόπισης των σημείων πάνω στην κοίτη των υδατορευμάτων.



Σχήμα 4.5: Μετατόπιση σημείων στις κοίτες των υδατορευμάτων.



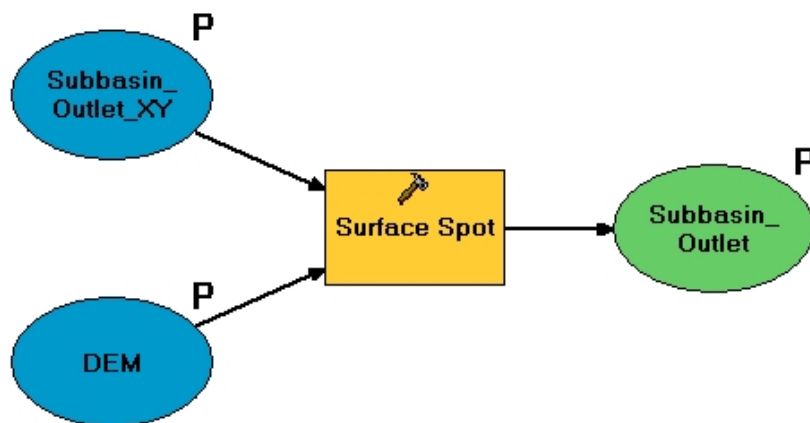
Σχήμα 4.6: Σημεία εξόδου υπολεκανών απορροής.

4.3.5 Συντεταγμένες σημείων εξόδου υπολεκανών απορροής

Οι έξοδοι των υπολεκανών απορροής παίρνουν τις συντεταγμένες x, y (από το σύστημα αναφοράς) και z (από το μοντέλο υψομέτρων).



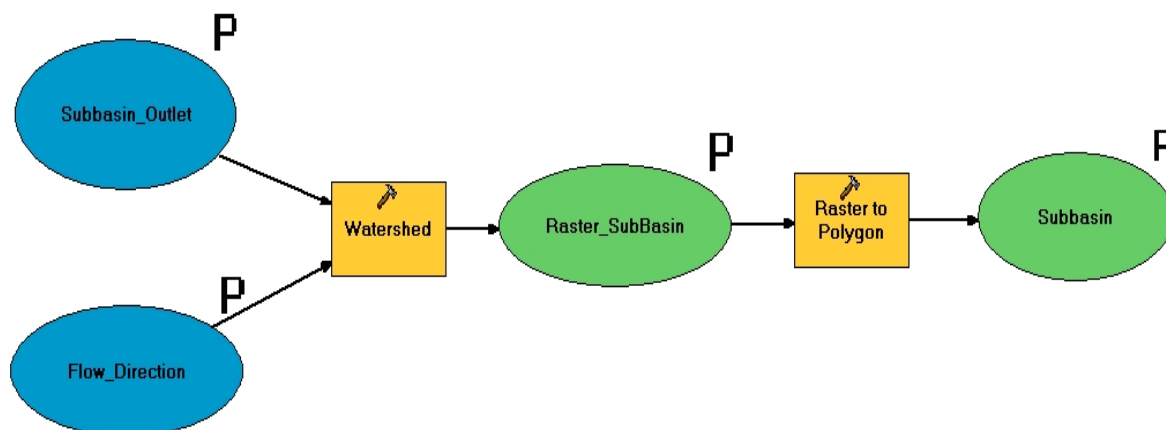
Σχήμα 4.7: Συντεταγμένες x, y στις εξόδους των υπολεκανών απορροής.



Σχήμα 4.8: Υψόμετρο z στις εξόδους των υπολεκανών απορροής.

4.3.6 Υπολεκάνες απορροής

Οι υπολεκάνες απορροής ορίζονται από τις θέσεις εξόδου τους και τη διεύθυνση ροής.



Σχήμα 4.9: Δημιουργία υπολεκανών απορροής.

4.3.7 Λεκάνη απορροής

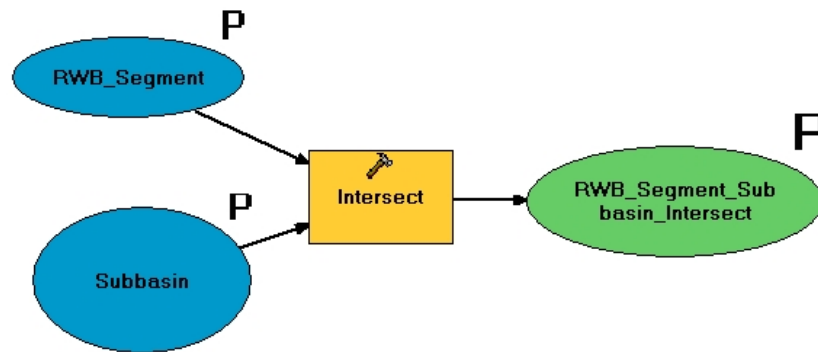
Η λεκάνη απορροής είναι η ένωση των υπολεκανών απορροής.



Σχήμα 4.10: Δημιουργία λεκάνης απορροής.

4.3.8 Τμήματα υδρογραφικού δικτύου και υπολεκάνες απορροής

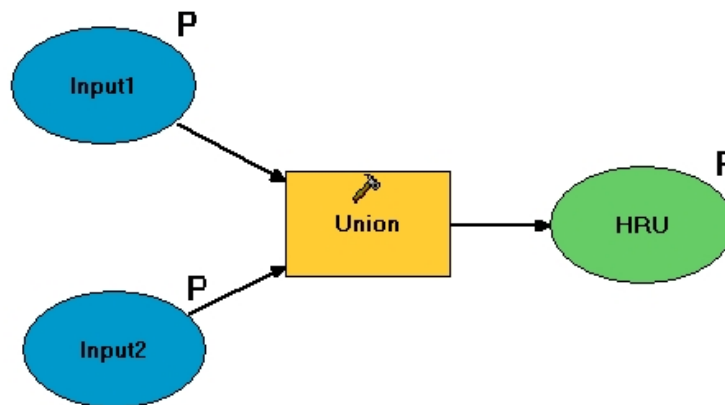
Η τομή των τμημάτων του υδρογραφικού δικτύου με τις υπολεκάνες απορροής δίνει τη σχέση μεταξύ τους (ποιο τμήμα είναι σε ποια λεκάνη).



Σχήμα 4.11: Τμήματα υδρογραφικού δικτύου και υπολεκάνες απορροής.

4.3.9 Μονάδες υδρολογικής απόκρισης

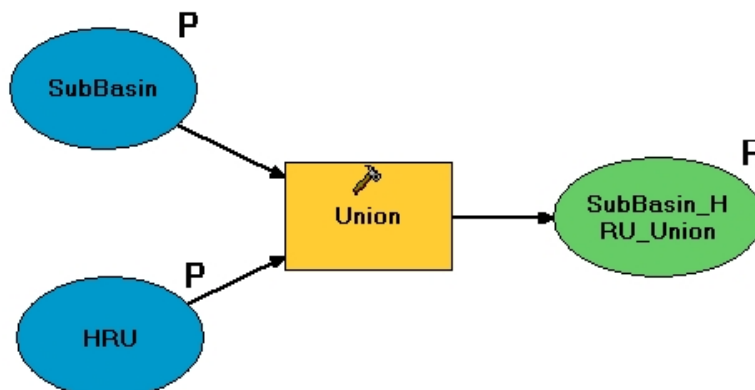
Οι μονάδες υδρολογικής απόκρισης είναι η ένωση δύο ή περισσότερων επιπέδων (input1, input2, ...) που μπορούν να τις ορίσουν σύμφωνα με τα υδρολογικά χαρακτηριστικά (υδατοπερατότητα, κάλυψη γης, κλίση εδάφους, κλπ.).



Σχήμα 4.12: Δημιουργία μονάδων υδρολογικής απόκρισης.

4.3.10 Υπολεκάνες απορροής και μονάδες υδρολογικής απόκρισης

Η ένωση υπολεκανών απορροής και μονάδων υδρολογικής απόκρισης δίνει τη σχέση μεταξύ τους (ποια ΜΥΑ είναι σε ποια υπολεκάνη).



Σχήμα 4.13: Ένωση υπολεκανών απορροής και μονάδων υδρολογικής απόκρισης.

4.3.11 Ακμές κυττάρων υδροφορέα

Οι ακμές των κυττάρων του υδροφορέα προκύπτουν από τα πολύγωνα του υδροφορέα.



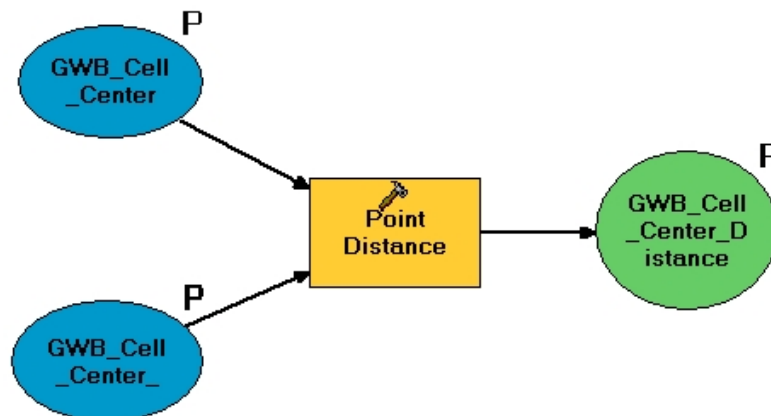
Σχήμα 4.14: Ακμές κυττάρων υδροφορέα.

4.3.12 Αποστάσεις κέντρων βάρους κυττάρων υδροφορέα

Τα κέντρα βάρους των υδροφορέων ορίζονται από τα πολύγωνα των υδροφορέων. Από τα κέντρα βάρους προκύπτουν οι αποστάσεις μεταξύ τους.



Σχήμα 4.15: Ορισμός κέντρων βάρους κυττάρων υδροφορέα.



Σχήμα 4.16: Αποστάσεις κέντρων βάρους κυττάρων υδροφορέα.

4.3.13 Τμήματα αρδευτικού δικτύου

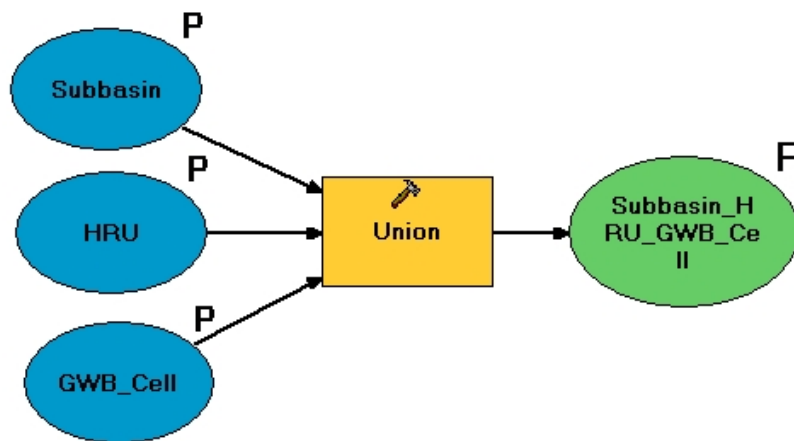
Τα τμήματα αρδευτικού δικτύου ορίζονται από τους κόμβους αρχής και τέλους τους.

4.3.14 Κόμβοι αρδευτικού δικτύου

Οι κόμβοι του αρδευτικού δικτύου προκύπτουν από τα τμήματα του αρδευτικού δικτύου (αρχή ή τέλος κάθε τμήματος).

4.3.15 Ένωση υπολεκάνης απορροής, ΜΥΑ και κύτταρου υδροφορέα

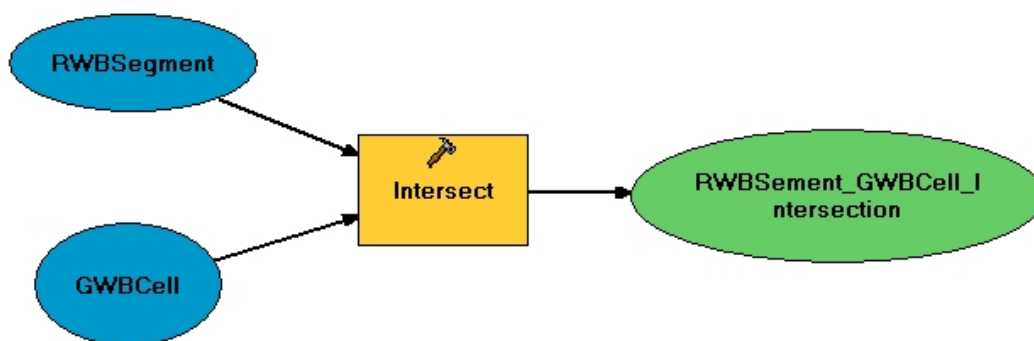
Η ένωση υπολεκάνης απορροής, ΜΥΑ και κυττάρων υδροφορέα δίνει τη σχέση μεταξύ της μονάδας υδρολογικής απόκρισης και των δύο άλλων επιπέδων (η ΜΥΑ σε ποια υπολεκάνη βρίσκεται και ποιο κύτταρο τροφοδοτεί).



Σχήμα 4.17: Υπολεκάνη απορροής, ΜΥΑ και κύτταρο υδροφορέα.

4.3.16 Τομή κύτταρου υδροφορέα και τμημάτων υδρογραφικού δικτύου

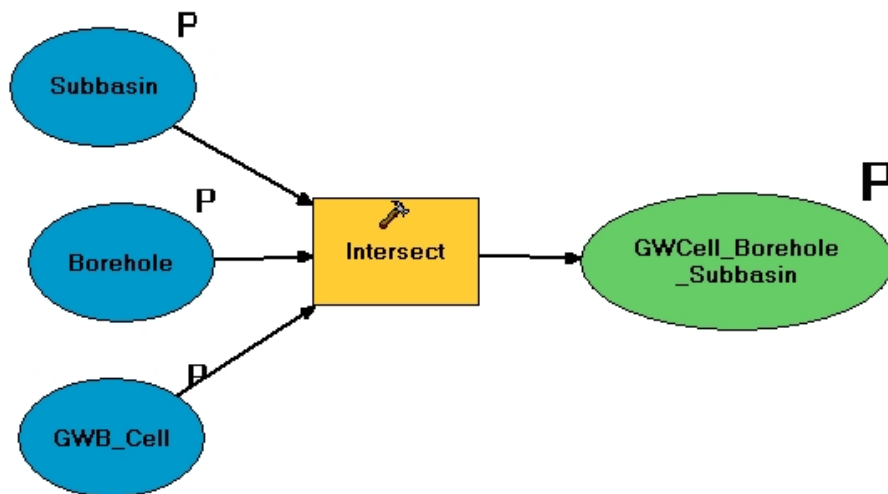
Η τομή κύτταρου υδροφορέα και τμήματος υδρογραφικού δικτύου δίνει τη σχέση μεταξύ των δύο (ποιο μήκος κάθε τμήματος υπόκειται κάθε κυττάρου).



Σχήμα 4.18: Τμήμα υδατορεύματος και κύτταρο υδροφορέα.

4.3.17 Τομή γεώτρησης, κύτταρου υδροφορέα και υπολεκάνης απορροής

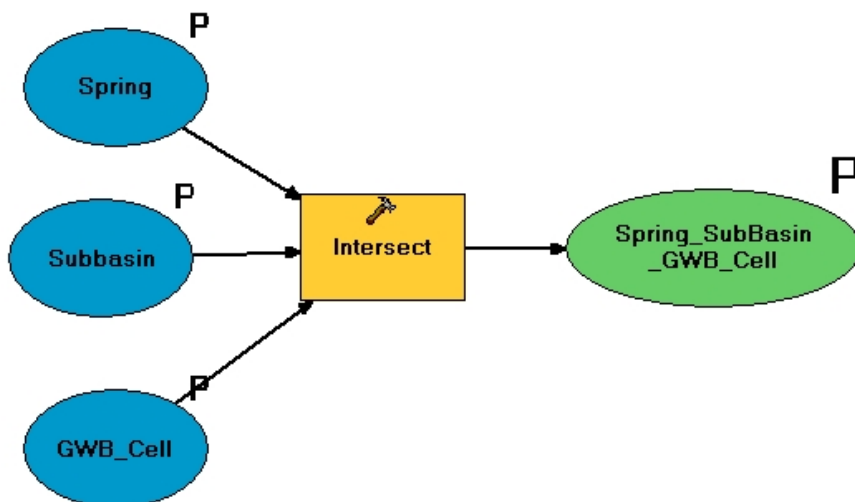
Η τομή γεώτρησης, κύτταρου υδροφορέα και υπολεκάνης δίνει τη σχέση μεταξύ των τριών (ποια γεώτρηση είναι σε ποια υπολεκάνη και σε ποιο κύτταρο).



Σχήμα 4.19: Γεώτρηση, κύτταρο υδροφορέα και υπολεκάνη απορροής.

4.3.18 Τομή πηγής, κύτταρου υδροφορέα και υπολεκάνης απορροής

Η τομή πηγής, κύτταρου υδροφορέα και υπολεκάνης δίνει τη σχέση μεταξύ των τριών (ποια πηγή είναι σε ποια υπολεκάνη και σε ποιο κύτταρο).



Σχήμα 4.20: Πηγή, υπολεκάνη απορροής και κύτταρο υδροφορέα.

5 Εκτίμηση παραμέτρων

5.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων, που εντάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- έξι παραμέτρους για κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης·
- δύο παραμέτρους για κάθε υπόγεια δεξαμενή (υδραυλική αγωγιμότητα, πορώδες)·
- μία παράμετρο για κάθε υδατόρευμα (συντελεστής διήθησης).

Αν και οι εν λόγω παράμετροι έχουν κάποιο φυσικό υπόβαθρο (καθώς εξαρτώνται από τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και του υδροφορέα, αντίστοιχα), είναι εξαιρετικά επισφαλής η απευθείας εκτίμησή τους, με βάση π.χ. τυπικές τιμές. Αντίθετα, ο μόνος τρόπος αντικειμενικού προσδιορισμού τους είναι η έμμεση προσαρμογή τους βάσει ιστορικών παρατηρήσεων, διαδικασία που είναι γνωστή ως βαθμονόμηση. Η εν λόγω διαδικασία μπορεί να αυτοματοποιηθεί, κάτι που προϋποθέτει:

- την επιλογή ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος παρατηρήσεων, βάσει του οποίου ελέγχονται οι αντίστοιχες μεταβλητές απόκρισης του μοντέλου·
- τη διατύπωση ενός ή περισσότερων αριθμητικών κριτηρίων καλής προσαρμογής των μεταβλητών του μοντέλου στις παρατηρήσεις·
- τον προσδιορισμό ενός εύρους διακύμανσης των παραμέτρων·
- τον εντοπισμό της καλύτερης τιμής του μέτρου προσαρμογής ως προς τις άγνωστες παραμέτρους, με εφαρμογή μιας συστηματικής υπολογιστικής διαδικασίας (αλγόριθμος βελτιστοποίησης).

Στην ενότητα 2.3, όπου συζητήθηκαν τα γενικά χαρακτηριστικά του προβλήματος βαθμονόμησης, τέθηκαν δύο θεμελιώδεις στόχοι που αφορούν αφενός στην εξασφάλιση επαρκούς προγνωστικής ικανότητας και αφετέρου στη διατήρηση συνέπειας με τον εννοιολογικό ορισμό των παραμέτρων. Ο πρώτος στόχος υποδηλώνει ότι το μοντέλο, αφού βαθμονομηθεί, αναπαράγει με ικανοποιητική ακρίβεια τις πραγματικές αποκρίσεις του συστήματος για δεδομένες φορτίσεις, ενώ ο δεύτερος στόχος εξασφαλίζει ότι οι παράμετροι που εντοπίζονται πράγματι εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος, και δεν είναι αποτέλεσμα μιας μαθηματικής διαδικασίας τύπου «μαύρου κουτιού», χωρίς δηλαδή φυσικό υπόβαθρο.

Αναμφίβολα, η επίτευξη των παραπάνω στόχων αποτελεί ένα δύσκολο εγχείρημα, δεδομένου ότι το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ αποσκοπεί στην αναπαράσταση σύνθετων υδροσυστημάτων μεγάλης, σχετικά, κλίμακας, με συνδυαστική μοντελοποίηση των επιφανειακών και υπόγειων υδρολογικών διεργασιών αλλά και των ανθρωπογενών αλληλεπιδράσεων. Αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός των παραμέτρων είναι, αναγκαστικά, μεγάλος, που σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα αλλά και αβεβαιότητα των διεργασιών δυσχεραίνουν σημαντικά τη διαδικασία βαθμονόμησής τους.

Για τον λόγο αυτό, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην υλοποίηση ενός καινοτόμου μεθοδολογικού πλαισίου εκτίμησης των παραμέτρων του μοντέλου, οι λειτουργίες του οποίου ολοκληρώθηκαν σε ξεχωριστό υποσύστημα του προγράμματος. Το εν λόγω πλαίσιο αποσκοπεί στη χρήση πολλαπλών μέτρων προσαρμογής, ώστε να είναι εφικτή η αναπαραγωγή διαφορετικών χαρακτηριστικών των μεταβλητών απόκρισης του μοντέλου, καθώς και στη χρήση κατάλληλων υπολογιστικών εργαλείων, που εξασφαλίζουν κατά το δυνατό πιο αποτελεσματική αναζήτηση της βέλτιστης λύσης. Στην

κατεύθυνση αυτή, αναπτύχθηκαν μεθοδολογίες αιχμής, κατάλληλες για ολική και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση (στην πρώτη περίπτωση παράγεται μια μεμονωμένη βέλτιστη λύση, ενώ στη δεύτερη παράγεται ένα σύνολο λύσεων, που περιγράφουν βέλτιστους συμβιβασμούς μεταξύ αντικρουόμενων κριτηρίων). Στις ενότητες 5.2 και 5.3 εξηγείται το μαθηματικό υπόβαθρο των μέτρων προσαρμογής και των αλγορίθμων, αντίστοιχα, που χρησιμοποιεί το υποσύστημα εκτίμησης παραμέτρων, ενώ στην ενότητα 5.4 δίνονται ορισμένες κατευθύνσεις στον χρήστη του προγράμματος, για την πλέον πρόσφορη αξιοποίηση των δυνατοτήτων που παρέχει το εν λόγω υποσύστημα.

5.2 Κριτήρια καλής προσαρμογής

Ο χρήστης του προγράμματος μπορεί να επιλέξει μεταξύ ενός πλήθους αριθμητικών κριτηρίων καλής προσαρμογής, που αναφέρονται σε μία ή περισσότερες μεταβλητές απόκρισης του μοντέλου. Συγκεκριμένα, οι εν λόγω μεταβλητές είναι:

- χρονοσειρές παροχής κατάντη κόμβων του υδρογραφικού δικτύου·
- χρονοσειρές παροχής πηγών·
- χρονοσειρές στάθμης κυττάρων υδροφορέα.

Για κάθε μεταβλητή και κάθε κριτήριο, εισάγεται ένας μη αρνητικός συντελεστής βάρους. Με συνάθροιση των επιμέρους τιμών, προκύπτει ένα καθολικό μέτρο σφάλματος, που αποτελεί τη στοιχική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Συμβατικά, όλα τα μέτρα ορίζονται κατά τρόπο ώστε η λύση του προβλήματος, που αντιστοιχεί στις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων, να βρίσκεται στην κατεύθυνση ελαχιστοποίησης της στοιχικής συνάρτησης. Είναι προφανές ότι με χρήση διαφορετικών συντελεστών βάρους, προκύπτει διαφορετική, κάθε φορά, λύση.

Στη συνέχεια εξηγούνται στα κριτήρια προσαρμογής που υποστηρίζει το υποσύστημα βαθμονόμησης του προγράμματος.

5.2.1 Αποτελεσματικότητα

Συμβολίζοντας με y_i την παρατηρημένη και με $y'_i(\theta)$ την προσομοιωμένη τιμή της μεταβλητής y στο χρονικό βήμα t , με την τελευταία να είναι προφανώς συνάρτηση του διανύσματος παραμέτρων θ^1 , τότε η συνάρτηση προσαρμογής μπορεί να διατυπωθεί ως ένα μέτρο απόστασης μεταξύ των y_i και y'_i , για όλο τον χρονικό ορίζοντα της βαθμονόμησης, που συμβολίζεται με T .

Ένα από τα πλέον συνηθισμένα μέτρα, που τυγχάνει ευρείας χρήσης σε προβλήματα προσαρμογής όχι μόνο υδρολογικών αλλά γενικά μη γραμμικών μοντέλων, είναι η *αποτελεσματικότητα* (efficiency), η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$EFF = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (y_t - y'_t)^2}{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2} \quad (5.1)$$

όπου \bar{y} η μέση τιμή της παρατηρημένης χρονοσειράς. Στις υδρολογικές επιστήμες, αναφέρεται συχνά και ως *δείκτης Nash-Sutcliffe*, από τα ονόματα των δύο γνωστών υδρολόγων που τεκμηρίωσαν την καταλληλότητα του συγκεκριμένου μέτρου σε προβλήματα βαθμονόμησης εννοιολογικών μοντέλων (Nash and Sutcliffe, 1970).

¹ Για λόγους απλούστευσης, θα απαλείφεται στη συνέχεια η διατύπωση ως προς τις παραμέτρους θ .

Από τον ορισμό της προκύπτει ότι η αποτελεσματικότητα είναι αδιάστατο μέτρο προσαρμογής, που συγκρίνει την διασπορά των σφαλμάτων με τη διασπορά των παρατηρήσεων, εκφράζοντας έτσι το ποσοστό της στατιστικής αβεβαιότητας που «εξηγείται» από το μοντέλο. Στην πράξη, ο εν λόγω δείκτης ελέγχει κατά πόσο η προσομοιωμένη χρονοσειρά είναι καλύτερη εκτιμήτρια σε σχέση με την μέση τιμή των παρατηρήσεων. Η θεωρητικά μέγιστη τιμή του είναι μονάδα, που υποδηλώνει τέλεια προσαρμογή του μοντέλου, ενώ δεν υπάρχει κάτω όριο ως προς την ελάχιστη τιμή. Για την αναπαράσταση της απορροής εξόδου μιας λεκάνης, τιμές της τάξης του 0.80-0.90 θεωρούνται πολύ ικανοποιητικές, ενώ τιμές της τάξης του 0.30 θεωρούνται οριακές για την αποδοχή ενός μοντέλου ως αντιπροσωπευτικού του φυσικού συστήματος (Freer *at al.*, 1996). Η μηδενική τιμή υποδηλώνει ότι το μοντέλο αποτελεί ισοδύναμη εκτιμήτρια με την παρατηρημένη μέση τιμή, οπότε η αβεβαιότητα του μοντέλου ταυτίζεται με την υδρολογική αβεβαιότητα, όπως αυτή εκφράζεται από την δειγματική τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων. Τέλος, σε περίπτωση αρνητικής τιμής το μοντέλο θεωρείται εντελώς αναξιόπιστο για προγνώσεις.

Η αποτελεσματικότητα εντάσσεται στην κατηγορία των τετραγωνικών μέτρων σφάλματος. Αυτό προϋποθέτει ότι τα υπόλοιπα του μοντέλου, που δίνονται από τη σχέση $e_i = y_i - y_i'$, είναι τυχαίες μεταβλητές, που ακολουθούν κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή, διατηρούν σταθερή διασπορά και είναι μεταξύ τους ασυσχέτιστα. Εφόσον πληρούνται οι παραπάνω υποθέσεις, τότε η ελαχιστοποίηση του συγκεκριμένου μέτρου οδηγεί στη θεωρητικά βέλτιστη προσαρμογή των προσομοιωμένων αποκρίσεων y_i' στις αντίστοιχες παρατηρήσεις y_i .

5.2.2 Μεροληψία

Μια στοιχειώδης απαίτηση, που συχνά τίθεται στα υδρολογικά μοντέλα, είναι η αναπαραγωγή του ιστορικού υπερετήσιου υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης, που σημαίνει ότι η μέση τιμή της προσομοιωμένης απόκρισης πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στην αντίστοιχη μέση παρατηρημένη τιμή. Ωστόσο, εξαιτίας της μη γραμμικότητας των εν λόγω μοντέλων, η παραπάνω υπόθεση δεν προκύπτει από την ελαχιστοποίηση των κριτηρίων τύπου μέσου τετραγωνικού σφάλματος, όπως η αποτελεσματικότητα. Συνεπώς, για τον έλεγχο της αναπαραγωγής της παρατηρημένης μέσης τιμής εισάγεται ένα μέτρο *μεροληψίας* (bias), που ορίζεται ως:

$$\text{BIAS} = \frac{\bar{y} - \bar{y}'}{\bar{y}} \quad (5.2)$$

όπου \bar{y}' η μέση τιμή της προσομοιωμένης χρονοσειράς. Στην ΥΔΡΟΓΕΙΟ, το μέτρο μεροληψίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνδυαστικά με την αποτελεσματικότητα ή και μεμονωμένα, εφόσον υπάρχουν εκτιμήσεις σχετικά με τη μέση τιμή μιας μεταβλητής, χωρίς να υπάρχει επαρκές δείγμα μετρήσεων ώστε να μπορεί να γίνει βήμα-προς-βήμα σύγκριση των επιμέρους τιμών.

Είναι προφανές ότι αν $\text{EFF} = 1$, τότε $\text{BIAS} = 0$, χωρίς ωστόσο να ισχύει το αντίστροφο. Συνεπώς, ένα μοντέλο ενδέχεται να αναπαράγει με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια τη μέση τιμή της παρατηρημένης απόκρισης, χωρίς αυτό απαραίτητα να συνεπάγεται και καλή προσαρμογή του. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα αναφέρεται το στοιχειώδες μοντέλο $y_i' = \bar{y}$, για το οποίο ισχύουν $\text{BIAS} = 0$ (μηδενική αμεροληψία) αλλά $\text{EFF} = 0$.

Εκτός της μέσης τιμής, στο πρόγραμμα διατυπώνονται μέτρα μεροληψίας ως προς δύο ακόμη στατιστικούς δείκτες, την τυπική απόκλιση και τον συντελεστή μεταβλητότητας, δηλαδή τον λόγο της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή. Θετική τιμή της μεροληψίας υποδηλώνει υπεκτίμηση του αντίστοιχου δείκτη, ενώ αρνητική υποδηλώνει υπερεκτίμησή του.

5.2.3 Σφάλμα αναπαραγωγής μηδενικής ροής

Το σφάλμα των μηδενικών τιμών είναι ένα καινοτόμο μέτρο, που χρησιμοποιεί το υποσύστημα βαθμονόμησης του προγράμματος για να ελέγξει αν το μοντέλο αναπαράγει φαινόμενα διακοπής της ροής ή, αντίστροφα, μηδενίζει αδικαιολόγητα την παροχή ενός ποταμού ή μιας πηγής. Πρόκειται για μια σημαντική πληροφορία, που μάλιστα δεν υπόκειται σε κανενός είδους σφάλμα μέτρησης, όπως συμβαίνει με την παροχή, ειδικά όταν η τελευταία εκτιμάται με βάση αραιές υδρομετρήσεις.

Για την μαθηματική διατύπωση του μέτρου μηδενικών τιμών εισάγεται η ακόλουθη μεταβλητή:

$$z_t = \begin{cases} y_t & \text{αν } y_t' = 0 \\ y_t' & \text{αν } y_t = 0 \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (5.3)$$

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα αναπαραγωγής των μηδενικών τιμών υπολογίζεται ως:

$$e_0 = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{t=1}^T z_t^2} \quad (5.4)$$

όπου T_0 ο αριθμός των χρονικών βημάτων κατά τα οποία το μοντέλο είτε δεν αναπαράγει την παρατηρημένη μηδενική τιμή ($y_t' > 0, y_t = 0$) είτε μηδενίζει την παροχή, ενώ κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα ($y_t' = 0, y_t > 0$).

5.2.4 Σφάλμα αναπαραγωγής τάσης

Μια χαρακτηριστική δυσχέρεια των συνδυαστικών υδρολογικών μοντέλων, ειδικά όταν δεν υπάρχουν μετρήσεις στάθμης ώστε να μπορεί να ελεγχθεί η δίαιτα του υδροφορέα βάσει αντικειμενικών κριτηρίων προσαρμογής, είναι η μη ρεαλιστική αναδιανομή των υπόγειων υδατικών πόρων στα επιμέρους κύτταρα. Έτσι, το μοντέλο τείνει είτε να αποθηκεύσει νερό στις δεξαμενές είτε να ταπεινώσει πλήρως τη στάθμη άλλων δεξαμενών, καθώς με κάτι τέτοιο φαίνεται να επιτυγχάνει ευκολότερη αναπαραγωγή των παρατηρημένων αποκρίσεων σε άλλες θέσεις του συστήματος. Κατά συνέπεια, οι χρονοσειρές αποθήκευσης (ή στάθμης) παρουσιάζουν μια εικόνα θετικής ή αρνητικής τάσης που είναι ασύμβατη με τη φυσική του συστήματος, δεδομένου ότι πρόκειται για υδρολογικές μεταβλητές, που οφείλουν να ακολουθούν τη γενική υδρολογική δίαιτα του συστήματος, που εξαρτάται από τη χρονική κατανομή των βροχοπτώσεων.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στο πρόγραμμα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ υλοποιήθηκε ένα εμπειρικό μέτρο ποιότητος, μέσω του οποίου ελέγχεται η υπερετήσια τάση ανύψωσης ή ταπείνωσης της στάθμης των υπόγειων δεξαμενών, που δεν πρέπει να είναι υπερβολικά μεγάλη. Η ανίχνευση τάσης σε μια χρονοσειρά $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ γίνεται μέσω του δείκτη Kendall, που ορίζεται ως:

$$k = \frac{4p}{n(n-1)} - 1 \quad (5.5)$$

όπου p ο αριθμός των περιπτώσεων κατά τις οποίες ισχύει $x_i > x_{i+1}$. Η ύπαρξη θετικής ή αρνητικής τάσης εξαρτάται από το πρόσημο του δείκτη k . Η τιμή 1 υποδηλώνει ότι οι τιμές της χρονοσειράς συνεχώς αυξάνουν, ενώ η τιμή -1 υποδηλώνει ότι οι τιμές μειώνονται σταθερά. Τέλος, η μηδενική τιμή υποδηλώνει ότι οι τιμές εναλλάσσονται σταθερά, δηλαδή η τάση είναι μηδενική. Βεβαίως, μια μηνιαία υδρολογική χρονοσειρά, όπως η στάθμη υπόγειου νερού, δεν πρέπει να παρουσιάζει ούτε έντονα θετική ούτε έντονα αρνητική αλλά ούτε και μηδενική τάση. Για τον λόγο αυτό, στο πρόγραμμα τίθεται ένα εμπειρικό όριο k_0 (με τυπικές τιμές 0.25-0.35), που όταν η απόλυτη τιμή του δείκτη Kendall το ξεπερνά, τότε θεωρείται ύπαρξη απαράδεκτα υψηλής (θετικής ή αρνητικής) τάσης στη χρονοσειρά. Η τιμή αυτή τέθηκε με το σκεπτικό ότι, λόγω της περιοδικότητας των υδρολογικών

διεργασιών, υπάρχει μια εποχιακή μεταβλητότητα, με συνέπεια τους ορισμένους μήνες του έτους η στάθμη του υπόγειου νερού να ανυψώνεται και τους υπόλοιπους να ταπεινώνεται. Τελικά, ο έλεγχος της τάσης γίνεται μέσω ενός όρου ποινής, που ορίζεται ως:

$$e_T = \begin{cases} k & \text{αν } |k| > k_0 \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (5.6)$$

Επισημαίνεται ότι το παραπάνω σφάλμα δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για εικονικά κύτταρα που αντιπροσωπεύουν συγκέντρωση των υπόγειων διαφυγών προς τη θάλασσα, τα οποία εξ ορισμού παρουσιάζουν θετική τάση, όπως και για κύτταρα που αντιπροσωπεύουν τη λειτουργία πηγών. Ομοίως, δεν έχει νόημα η χρήση του σε κύτταρα που επικοινωνούν με τα τελευταία, η δίαιτα των οποίων μπορεί να ελεγχθεί με πολύ μεγαλύτερη αξιοπιστία από παρατηρημένα υδρογραφήματα.

5.3 Εργαλεία βελτιστοποίησης

5.3.1 Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βαθμονόμησης

Το πρόβλημα εκτίμησης των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου μπορεί να τυποποιηθεί και να αντιμετωπιστεί με αυτόματες υπολογιστικές τεχνικές, που υλοποιούν μια συστηματική αναζήτηση του πλέον κατάλληλου συνδυασμού παραμέτρων, που βελτιστοποιεί το επιμέρους κριτήρια προσαρμογής. Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος είναι η ακόλουθη:

$$\min \mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{g}[w_1 f_1(\boldsymbol{\theta}), w_2 f_2(\boldsymbol{\theta}), \dots, w_m f_m(\boldsymbol{\theta})], \boldsymbol{\theta} \in \Theta \quad (5.7)$$

όπου $\mathbf{g}(\cdot)$ η στοχική συνάρτηση του προβλήματος, η οποία περιλαμβάνει m το πλήθος αριθμητικά κριτήρια $f_j(\boldsymbol{\theta})$, w_j συντελεστές βάρους των κριτηρίων, $\boldsymbol{\theta}$ το n -διάστατο διάνυσμα παραμέτρων του μοντέλου και $\Theta \subset \mathcal{R}^n$ ο εφικτός χώρος, εντός του οποίου πραγματοποιείται η αναζήτηση των τιμών των παραμέτρων. Συνήθως, ο εφικτός χώρος ορίζεται από δύο διανύσματα ακραίων τιμών $\boldsymbol{\theta}_{\min}$ και $\boldsymbol{\theta}_{\max}$, που εκφράζουν τα επιτρεπόμενα όρια διακύμανσης των τιμών των παραμέτρων. Στην ΥΔΡΟΓΕΙΟ (όπως και στα περισσότερα αντίστοιχα προγράμματα), το εύρος αυτό προσδιορίζεται από τον χρήστη, ακολουθώντας τις αρχές που αναπτύσσονται στο εδάφιο 5.4.1.

Το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με δύο τρόπους, ανάλογα με τη διατύπωση της στοχικής συνάρτησης. Εφόσον όλα τα κριτήρια συναθροιστούν σε μια ενιαία έκφραση, που σημαίνει ότι η στοχική συνάρτηση λαμβάνει τη μορφή:

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{j=1}^m w_j f_j(\boldsymbol{\theta}) \quad (5.8)$$

τότε ζητούμενο είναι ο εντοπισμός της ελάχιστης τιμής του βαθμωτής ποσότητας $\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta})$ ως προς τις παραμέτρους $\boldsymbol{\theta}$. Πρόκειται για ένα τυπικό πρόβλημα *ολικής βελτιστοποίησης* (global optimization), που στο πρόγραμμα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ αντιμετωπίζεται με τον αλγόριθμο που περιγράφεται, συνοπτικά, στο εδάφιο 5.3.2. Από την επίλυσή του προκύπτει ένα βέλτιστο σύνολο παραμέτρων $\boldsymbol{\theta}^*$, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επιχειρησιακή χρήση του μοντέλου ως προγνωστικού εργαλείου.

Εναλλακτικά, η στοχική συνάρτηση μπορεί να είναι διανυσματική, που σημαίνει ότι αποτελείται από επιμέρους συνιστώσες οι οποίες περιλαμβάνουν σταθμισμένα κριτήρια. Στην περίπτωση αυτή, το πρόβλημα βελτιστοποίησης θεωρείται *πολυκριτηριακό* (multiobjective optimization), και ο χειρισμός του γίνεται με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο εδάφιο 5.3.4, και αποτελεί γενίκευση του προηγούμενου αλγορίθμου. Αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης είναι όχι μία μεμονωμένη αλλά ένα σύνολο λύσεων, οι οποίες ονομάζονται *μη κυριαρχούμενες* (non-dominated) ή *Pareto βέλτιστες*, και περιγράφουν πρόσφορους συμβιβασμούς των κριτηρίων, όπως εξηγείται στο εδάφιο 5.3.3. Μια τέτοια

προσέγγιση παρέχει καλύτερη εποπτεία του χώρου αναζήτησης, επιτρέποντας στον χρήστη να διερευνήσει την αλληλεπίδραση των κριτηρίων και να εντοπίσει τυχόν σφάλματα στη δομή του μοντέλου ή τα δεδομένα του.

5.3.2 Ο εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτωσης-απλόκου

Ο *εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτωσης-απλόκου* (Ευστρατιάδης, 2001· Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2002· Rozos *et al.*, 2004) επιλύει προβλήματα μη γραμμικής βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, τα οποία παρουσιάζουν σημαντικές δυσχέρειες που οφείλονται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του χώρου αναζήτησης (ύπαρξη τοπικών ακροτάτων σε πολλαπλές κλίμακες, ασυνέχειες, γεωμετρικές ανωμαλίες όπως μακρόστενες χαράδρες, πλατιές κοιλάδες, αυχένες, κλπ.). Πρόκειται για μια ευρετική τεχνική, στην οποία επιχειρείται η σύζευξη διαφορετικών μεθοδολογικών προσεγγίσεων καθώς και ορισμένων πρωτότυπων στοιχείων. Ενσωματώνοντας στρατηγικές τοπικής και ολικής αναζήτησης σε ένα ενιαίο αλγοριθμικό σχήμα, εξασφαλίζεται ευελιξία κινήσεων, με σκοπό τον αποτελεσματικό χειρισμό των ποικίλων γεωμετρικών ιδιομορφιών, ταυτόχρονα με τη δυνατότητα ταχείας διερεύνησης των κυρτών περιοχών των εν λόγω επιφανειών.

Στην ΥΔΡΟΓΕΙΟ έχει ενσωματωθεί η πλέον πρόσφατη εκδοχή του αλγορίθμου, που βασίζεται στις ακόλουθες θεμελιώδεις διαδικασίες:

- μια διαδικασία *εξελικτικής αναζήτησης* (evolutionary search)¹, για την παράλληλη διερεύνηση του εφικτού χώρου από έναν πληθυσμό σημείων·
- ένα σύνολο κανόνων εξέλιξης του πληθυσμού, που χρησιμοποιούν ένα τροποποιημένο σχήμα *κατερχόμενο απλόκου* (downhill simplex)² για την παραγωγή απογόνων, καθώς και διαδικασίες *μετάλλαξη*³ (mutation)·
- μια στρατηγική *προσομοιωμένης ανόπτωσης* (simulated annealing)⁴, μέσω της οποίας ρυθμίζεται ο βαθμός τυχαιότητας ως προς την αξιολόγηση την καταλληλότητας των λύσεων που παράγονται κατά την διαδικασία αναζήτησης.

¹ Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (Goldberg, 1989· Michalewicz, 1996) ακολουθούν το πρότυπο των φυσικών εξελικτικών διεργασιών, χρησιμοποιώντας πληθυσμούς λύσεων που βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά τους καθώς εξελίσσονται, με εφαρμογή των λεγόμενων γενετικών τελεστών (επιλογή, διασταύρωση, μετάλλαξη).

² Πρόκειται για μια κλασική τεχνική αναζήτησης τοπικών ακροτάτων (Nelder and Mead, 1965), που βασίζεται σε διαδοχικούς γεωμετρικούς μετασχηματισμούς ενός συνόλου $n + 1$ εφικτών σημείων, που αντιπροσωπεύουν τις κορυφές ενός απλόκου στο n -διάστατο χώρο. Το απλόκο διερευνά το πεδίο αναζήτησης, πραγματοποιώντας συγκεκριμένες κινήσεις (ανάκλαση ως προς τη χειρότερη κορυφή, επέκταση στην κατεύθυνση της ανάκλασης, συμπίεση προς το κεντροειδές του, συρρίκνωση γύρω από τη καλύτερη κορυφή).

³ Ο όρος προέρχεται από τους γενετικούς αλγορίθμους και υποδηλώνει τυχαίες μεταβολές που λαμβάνουν χώρα σε μικρό ποσοστό του πληθυσμού, επιτρέποντας τη μετάβαση σε απομακρυσμένες, σε σύγκριση με τον τρέχοντα πληθυσμό, περιοχές του πεδίου αναζήτησης.

⁴ *Ανόπτωση* (annealing) ονομάζεται η φυσική διεργασία ψύξης των μετάλλων, που συνεπάγεται ελαχιστοποίηση της κινητικής ενέργειας των μορίων τους. Κατά τη διαδικασία ψύξης, επιτρέπεται η μετάβαση του συστήματος σε καταστάσεις υψηλότερης ενέργειας, ακολουθώντας έναν πιθανοτικό κριτήριο που στη στατιστική μηχανική αναφέρεται ως νόμος του Boltzman. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του συστήματος, τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα αποδοχής τέτοιων καταστάσεων. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η υπερπήδηση των τοπικών ενεργειακών ακροτάτων, προς όφελος της απόκτησης μιας τέλει κρυσταλλικής δομής. Αναγκαία προϋπόθεση για κάτι τέτοιο είναι ο αργός ρυθμός ψύξης, διαφορετικά η διαδικασία καταλήγει σε μια άμορφη μάζα, που αντιστοιχεί σε κάποιο τοπικό ενεργειακό ακρότατο. Στις αρχές της παραπάνω διεργασίας βασίζεται η τεχνική της *προσομοιωμένης ανόπτωσης*, που εισήγαγαν στη βελτιστοποίηση μη γραμμικών συναρτήσεων οι Kirkpatrick *et al.* (1983).

Η υπολογιστική διαδικασία ξεκινά με την παραγωγή ενός τυχαίου πληθυσμού σημείων, ομοιόμορφα κατανομημένων στο πεδίο αναζήτησης. Ο πληθυσμός διατηρεί σταθερό μέγεθος, το οποίο ορίζει ο χρήστης, και σε καμία περίπτωση δεν επιτρέπεται να ξεπεράσει τα επιτρεπόμενα όρια του εφικτού χώρου. Με βάση τον αρχικό πληθυσμό υπολογίζεται η αρχική «θερμοκρασία» του συστήματος, ως η διαφορά μεταξύ της μέγιστης από την ελάχιστη τιμή της στοχικής συνάρτησης στον πληθυσμό. Ο ρόλος της θερμοκρασίας είναι αντίστοιχος με αυτόν της φυσικής διεργασίας ανόπτησης. Στα αρχικά στάδια της αναζήτησης η τιμή της θερμοκρασίας είναι μεγάλη, επιτρέποντας μια πιο συχνή αποδοχή μη βέλτιστων βημάτων και, συνακόλουθα, μεγαλύτερη διασπορά του πληθυσμού, ενώ μειώνεται σταδιακά, καθώς η διαδικασία οδηγείται προς τις πλέον πρόσφορες περιοχές του εφικτού χώρου, όπου και επικεντρώνεται η έρευνα, ώστε η διαδικασία σύγκλισης να μην είναι υπερβολικά αργή.

Η εξέλιξη των λύσεων γίνεται κατά στάδια, που με βάση την ορολογία των γενετικών αλγορίθμων ονομάζονται *γενιές* (generations). Σε κάθε γενιά, ένα (συνήθως) ή περισσότερα μέλη του πληθυσμού αντικαθίσταται από νέα σημεία, που καλούνται *απόγονοι* (offspring). Αν και ο αλγόριθμος αναζητά βελτιωμένες λύσεις, όταν δεν μπορεί να εντοπίσει τέτοιες αποδέχεται λύσεις που μπορεί να είναι χειρότερες από τις προηγούμενες, προς όφελος της διερεύνησης εκτενέστερων περιοχών του εφικτού χώρου. Η γέννηση νέων λύσεων γίνεται ως εξής:

Από τον τρέχοντα πληθυσμό λαμβάνονται, με τυχαία επιλογή, $n + 1$ σημεία, που διαμορφώνουν ένα *απλόκο*. Ζητούμενο είναι ένα νέο σημείο (απόγονος) που θα αντικαταστήσει τη συμβατικά χειρότερη κορυφή. Η τελευταία ορίζεται ως εκείνη για την οποία μεγιστοποιείται η τιμή του μέτρου ποινής:

$$y(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x}) + u T \quad (5.9)$$

όπου u τυχαίος ομοιόμορφος αριθμός στο διάστημα $[0, 1]$ και T η τρέχουσα θερμοκρασία. Ο όρος $g(\mathbf{x})$, δηλαδή η στοχική συνάρτηση, αποτελεί την προσδιοριστική συνιστώσα του μέτρου ποινής, ενώ ο όρος $u T$ την στοχαστική του συνιστώσα. Η επίδραση της τελευταίας περιορίζεται με τη μείωση της θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα στα προχωρημένα στάδια της εξελικτικής διαδικασίας η πορεία αναζήτησης να είναι σχεδόν πάντοτε στην κατεύθυνση μείωσης της τιμής της στοχικής συνάρτησης, όπως συμβαίνει με μια τεχνική τοπικής βελτιστοποίησης.

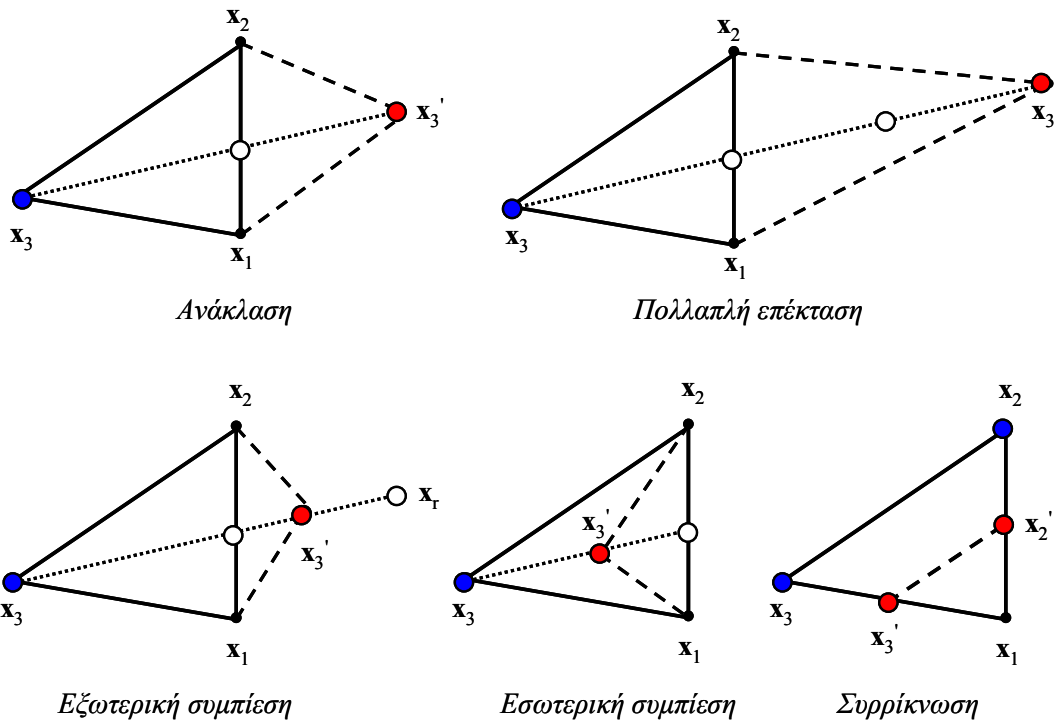
Καταρχήν, επιχειρείται ο εντοπισμός μιας βελτιωμένης λύσης, με βάση την παρακάτω ακολουθία κινήσεων του απλόκου:

- ανάκλαση του απλόκου, ως προς τη συμβατικά χειρότερη κορυφή του·
- διαδοχικές επεκτάσεις προς την κατεύθυνση της ανάκλασης, για όσο διάστημα εντοπίζονται λύσεις που υπερτερούν σε σχέση με την αντικειμενικά καλύτερη κορυφή του απλόκου (δηλαδή αυτή για την οποία ελαχιστοποιείται η τιμή της στοχικής συνάρτησης)·
- εξωτερική συμπίεση μεταξύ του κεντροειδούς¹ του απλόκου και του σημείου ανάκλασης, εφόσον η τιμή της στοχικής συνάρτησης στο τελευταίο είναι χειρότερη σε σύγκριση με την αντικειμενικά καλύτερης κορυφή·
- εσωτερική συμπίεση μεταξύ της συμβατικά χειρότερης κορυφής και του κεντροειδούς του απλόκου, εφόσον η τιμή της συνάρτησης $y(\mathbf{x})$ στο σημείο ανάκλασης ξεπερνά την αντίστοιχη τιμή στη συμβατικά χειρότερη κορυφή·
- συρρίκνωση του απλόκου γύρω από την αντικειμενικά καλύτερη κορυφή του, εφόσον η τιμή της συνάρτησης $y(\mathbf{x})$ στο σημείο ανάκλασης ξεπερνά την αντίστοιχη τιμή στο σημείο εσωτερικής συμπίεσης.

Όλες οι παραπάνω κινήσεις, παράγουν ένα μεμονωμένο νέο σημείο, με εξαίρεση την τελευταία που παράγει n το πλήθος απογόνους, καθώς αντικαθίστανται όλες οι κορυφές του απλόκου εκτός από την

¹ Ορίζεται ως το κέντρο βάρους όλων των κορυφών του απλόκου, πλην της συμβατικά χειρότερης.

αντικειμενικά καλύτερη. Σε αντίθεση με την αυθεντική μέθοδο κατερχόμενου απλόκου, η επιλογή της προς αντικατάσταση κορυφής δεν βασίζεται στην τιμή της στοχικής συνάρτησης αλλά στο μέτρο ποιότητος, που εμπεριέχει και τον στοχαστικό όρο $u T$. Επιπλέον, τα μήκη των εκάστοτε βημάτων δεν είναι αυστηρά καθορισμένα, αλλά θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές, που ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή. Οι μετασχηματισμοί του απλόκου, που περιγράφηκαν προηγουμένως, απεικονίζονται στο γραφικό παράδειγμα του Σχήματος 5.1.



Σχήμα 5.1: Δυνατοί μετασχηματισμοί ενός απλόκου στον χώρο των δύο διαστάσεων. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα νέα σημεία που γεννώνται (απόγονοι), ενώ με μπλε τα σημεία που αντικαθίστανται. Το σημείο x_1 αντιστοιχεί στην αντικειμενικά καλύτερη κορυφή, ενώ το x_3 στη συμβατικά χειρότερη.

Αν καμία από τις προηγούμενες κινήσεις του απλόκου δεν οδηγήσει στην παραγωγή μιας καλύτερης λύσης, τότε το άπλοκο «αναρριχάται» προς την κατεύθυνση της ανάκλασης, εκτελώντας μια σειρά από βήματα μεγιστοποίησης (αντί ελαχιστοποίησης) της στοχικής συνάρτησης, στην προσπάθειά του να υπερπηδήσει το τρέχον τοπικό ακρότατο στο οποίο έχει εγκλωβιστεί. Αν ούτε τότε υπάρξει επιτυχία, τότε η νέα λύση παράγεται μέσω μετάλλαξης. Η συνάρτηση μετάλλαξης γεννά τυχαίες συντεταγμένες ως εξής:

$$x_i = \mu_i \pm v \sigma_i \tag{5.10}$$

όπου μ_i η μέση τιμή του πληθυσμού για τη συντεταγμένη i , σ_i η αντίστοιχη τυπική απόκλιση και v τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή. Το πρόσημο $+$ ή $-$ επιλέγεται τυχαία, με συχνότητα 50%. Η παραπάνω διαδικασία αποσκοπεί στη γέννηση απομακρυσμένων, σε σχέση με το μέσο όρο του πληθυσμού, σημείων, και συνεπώς εξασφαλίζει μεγαλύτερη διασπορά λύσεων που είναι επιθυμητή για την αποτελεσματικότερη διερεύνηση του εφικτού χώρου.

Η αυτορύθμιση της θερμοκρασίας γίνεται με την εφαρμογή δύο ελέγχων. Στο πέρας κάθε γενιάς ελέγχεται αν η τρέχουσα τιμή της ξεπερνά την ποσότητα ζ ($g_{\max} - g_{\min}$), όπου g_{\max} η μέγιστη και g_{\min} η ελάχιστη τιμή της στοχικής συνάρτησης στον πληθυσμό, ενώ όποτε εντοπίζεται μία βελτιωμένη λύση (και συνεπώς ένα τοπικό ακρότατο), η θερμοκρασία μειώνεται ελαφρά κατά έναν συντελεστή λ . Τα ζ

και λ είναι παράμετροι εισόδου του αλγορίθμου, με τυπικές τιμές 2 και 0.99, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές εξασφαλίζουν ότι η θερμοκρασία του συστήματος, που χρησιμοποιείται στα διάφορα στάδια επιλογής, δεν είναι υπερβολικά μεγάλη σε σχέση με τα μεγέθη του πληθυσμού (που θα είχε ως συνέπεια μεγάλο βαθμό τυχαιότητας), ενώ μειώνεται με βραδύ ρυθμό, εμποδίζοντας την πρόωρη σύγκλιση σε κάποιο μη αποδεκτό τοπικό ακρότατο.

Η εξελικτική διαδικασία ολοκληρώνεται με δύο τρόπους:

- όταν η σχετική βελτίωση της τιμής της στοχικής συνάρτησης από γενιά σε γενιά γίνει μικρότερη από κάποια ανοχή (κριτήριο σύγκλισης)·
- όταν ξεπεραστεί ένας προβλεπόμενος αριθμός δοκιμών (κριτήριο τερματισμού).

Η ανοχή (εκφρασμένη ως ποσοστό) και ο μέγιστος αριθμός δοκιμών αποτελούν επίσης παραμέτρους εισόδου του αλγορίθμου. Στις περισσότερες εφαρμογές, το δεύτερο κριτήριο είναι αυτό που οδηγεί στον τερματισμό της διαδικασίας, καθώς η πολυπλοκότητα του προβλήματος και ο μεγάλος αριθμός παραμέτρων δεν επιτρέπουν την επίτευξη σύγκλισης, παρά μόνο μετά από εξαιρετικά μεγάλο αριθμό δοκιμών.

5.3.3 Συνοπτική θεωρία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης

Σε προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων, τα οποία μάλιστα είναι αντικρουόμενα ή δεν αποτιμώνται στην ίδια μονάδα μέτρησης, δεν είναι δυνατή η αντικειμενική σύγκριση λύσεων με βάση ένα βαθμωτό μέτρο επίδοσης, καθώς η στοχική συνάρτηση είναι διανυσματική. Αν υποθεθούν δύο σημεία \mathbf{a} , \mathbf{b} με τιμές κριτηρίων $\mathbf{f}(\mathbf{a}) = \{f_1(\mathbf{a}), \dots, f_m(\mathbf{a})\}$ και $\mathbf{f}(\mathbf{b}) = \{f_1(\mathbf{b}), \dots, f_m(\mathbf{b})\}$, τότε ορίζεται η λεγόμενη σχέση *κυριαρχίας* (dominance) μεταξύ τους ως εξής:

Το \mathbf{a} κυριαρχεί ισχυρώς ως προς το \mathbf{b} αν ισχύει $f_i(\mathbf{a}) < f_i(\mathbf{b})$ για κάθε κριτήριο $i \leq m$

Το \mathbf{a} κυριαρχεί ασθενώς ως προς το \mathbf{b} αν ισχύει $f_i(\mathbf{a}) \leq f_i(\mathbf{b})$ για κάθε κριτήριο $i \leq m$ (5.11)

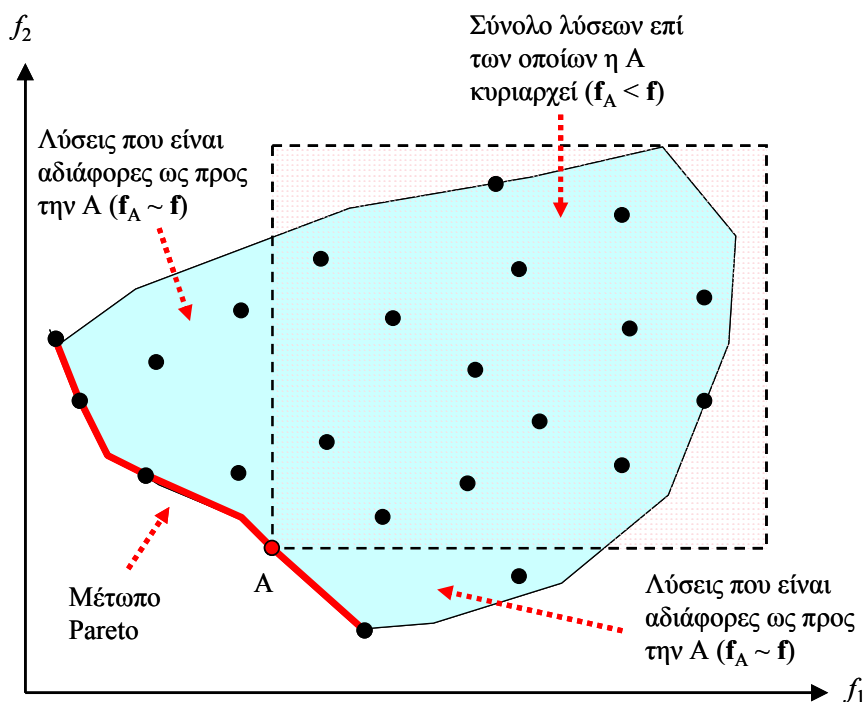
Το \mathbf{a} είναι αδιάφορο ως προς το \mathbf{b} αν ισχύει $f_i(\mathbf{a}) \leq f_i(\mathbf{b})$ για κάποια κριτήρια $i \leq m$

Η έννοια της κυριαρχίας επιτρέπει τον χαρακτηρισμό μιας λύσης ως βέλτιστης, σύμφωνα με τον ακόλουθο ορισμό:

Ένα εφικτό σημείο $\mathbf{x}^ \in X$ είναι βέλτιστο εφόσον υπάρχει κανένα άλλο εφικτό σημείο $\mathbf{x} \in X$ τέτοιο ώστε $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{f}(\mathbf{x}^*)$, δηλαδή δεν υπάρχει εφικτό σημείο που κυριαρχεί επ' αυτού.*

Ο παραπάνω ορισμός συνεπάγεται ότι σε ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης υπάρχουν άπειρες (εφόσον το πεδίο αναζήτησης είναι συνεχές) βέλτιστες λύσεις, που περιγράφουν πρόσφορους συμβιβασμούς μεταξύ των κριτηρίων. Οι λύσεις αυτές ονομάζονται *Pareto βέλτιστες* ή *μη κατώτερες* (non-inferior) ή *μη κυριαρχούμενες* (non-dominated), και η απεικόνισή τους στο πεδίο τιμών των κριτηρίων καλείται *μέτωπο Pareto* (Pareto front). Η έννοια του μετώπου υποδηλώνει ότι, κατά τη μετάβαση από μια Pareto βέλτιστη λύση σε μια άλλη με σκοπό τη βελτίωση ενός κριτηρίου, αναγκαστικά θα υπάρξει επιδείνωση ενός τουλάχιστον άλλου κριτηρίου, όπως φαίνεται στο γραφικό παράδειγμα του Σχήματος 5.2.

Η έννοια της κυριαρχίας διαφοροποιεί σε σημαντικό βαθμό τη γενική στρατηγική των εξελικτικών αλγορίθμων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, σε σχέση με τις μεθόδους αναζήτησης του ολικού ακροτάτου βαθμωτών συναρτήσεων. Πράγματι, αντί να επιδίδεται η σύγκλιση του πληθυσμού σε ένα μεμονωμένο σημείο, όπου ελαχιστοποιείται η τιμή της συνάρτησης, ζητείται η προσέγγιση του μετώπου Pareto και η όσο το δυνατό πιο ομοιόμορφη διασπορά του πληθυσμού σε αυτό. Επιπλέον, κάθε φορά που παράγεται μια νέα λύση, η επίδοσή της αποτιμάται με βάση τη θέση του εν λόγω σημείου στο πεδίο τιμών και τη σχέση κυριαρχίας του ως προς τα υπόλοιπα μέλη του πληθυσμού.



Σχήμα 5.2: Απεικόνιση του μετώπου Pareto σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο κριτηρίων.

5.3.4 Ο πολυκριτηριακός εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου

Ο πολυκριτηριακός εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου (Efstratiadis and Koutsoyiannis 2005· Ευστρατιάδης, 2006) αποτελεί ένα νέο σχήμα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, που αποσκοπεί στην παραγωγή αντιπροσωπευτικών μη κατωτέρων λύσεων από το συνολικό μέτωπο Pareto ή τμήμα αυτού, που προσδιορίζει ο χρήστης. Για την εφαρμογή του στο πρόγραμμα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ απαιτείται η ενεργοποίηση της επιλογής πολυκριτηριακής αναζήτησης, ο καθορισμός των κριτηρίων (προκύπτουν με συνάθροιση επιμέρους μέτρων προσαρμογής) και ο προσδιορισμός του επιθυμητού εύρους τιμών τους. Επειδή όλα τα μέτρα προσαρμογής διατυπώνονται ως συναρτήσεις ποινής, ο χρήστης καλείται να ορίσει άνω όρια των εν λόγω ποινών, που υποδηλώνουν αν ένα σύνολο παραμέτρων είναι αποδεκτό ή όχι (ανεξάρτητα αν είναι Pareto βέλτιστο). Στην περίπτωση που δεν θεσπίζονται τέτοια όρια, ο αλγόριθμος αναζητά συνδυασμούς παραμέτρων που εκτείνονται σε όλο το μήκος του μετώπου.

Η υπολογιστική διαδικασία περιλαμβάνει δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση ή *φάση αποτίμησης*, ορίζεται ένα βαθμωτό μέτρο ποινής, που εξαρτάται από την θέση κάθε σημείου στο πεδίο τιμών, αλλά και την θέση όλων των υπόλοιπων μελών του πληθυσμού σε σχέση με το εν λόγω σημείο. Δηλαδή, για την αποτίμηση της καταλληλότητας συγκρίνεται η επίδοση όλων των σημείων μεταξύ τους και σε σχέση με όλα τα κριτήρια. Η συνάρτηση ποινής περιλαμβάνει δύο όρους. Ο πρώτος χρησιμοποιεί την έννοια της κυριαρχίας, λαμβάνοντας υπόψη τις κυρίαρχες, κυριαρχούμενες και αδιάφορες λύσεις ως προς το εκάστοτε σημείο αναφοράς. Από την άλλη πλευρά, ο δεύτερος όρος της υποδηλώνει την αποδοχή ή όχι της συγκεκριμένης λύσης, με βάση τα εξωτερικά άνω όρια που θέτει ο χρήστης. Στόχος είναι η απόρριψη συνόλων παραμέτρων με ακραία επίδοση, δηλαδή εξαιρετικά καλή ως προς ορισμένα κριτήρια προσαρμογής αλλά πολύ κακή ως προς τα υπόλοιπα.

Η διαδικασία αποτίμησης αποσκοπεί στη δημιουργία μιας υβριδικής επιφάνειας απόκρισης, πάνω στην οποία πραγματοποιείται η αναζήτηση νέων λύσεων για την τρέχουσα γενιά, δηλαδή η παραγωγή των απογόνων. Η επιφάνεια αυτή αναδιαμορφώνεται σε κάθε γενιά, αφού με την αντικατάσταση έστω και ενός μέλους της προηγούμενης γενιάς αλλάζει η ταξινόμηση των σημείων στο πεδίο τιμών, με βάση την έννοια της κυριαρχίας. Με τον τρόπο αυτό, προκύπτει ένα συνεχές πεδίο, επί του οποίου

υλοποιείται η διαδικασία αναζήτησης, δηλαδή η παραγωγή απογόνων, που αποτελεί ζητούμενο της δεύτερης φάσης του αλγορίθμου, η οποία καλείται *φάση εξέλιξης*. Οι υπολογιστικές διαδικασίες χρησιμοποιούν αρκετά από τα στοιχεία του εξελικτικού αλγορίθμου ανόπτησης-απλόκου, αλλά επιφέρουν και κάποιες τροποποιήσεις, ώστε να εμποδιστεί η σύγκλιση των σημείων γύρω από ένα ακρότατο. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται η διατήρηση μιας επιθυμητής διασποράς σημείων, ώστε ο τελικός πληθυσμός να περιλαμβάνει ομοιόμορφα καταναμημένες λύσεις του προβλήματος, που είναι ταυτόχρονα Pareto βέλτιστες και αποδεκτές, από την πλευρά του χρήστη.

5.4 Κατευθυντήριες αρχές εφαρμογής του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

Παρουσιάζεται ένα πλαίσιο γενικών αρχών, που βοηθούν τον χρήστη στη διαδικασία σχηματοποίησης και, στη συνέχεια, εκτίμησης των παραμέτρων ενός υδροσυστήματος, με χρήση του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ. Το πλαίσιο αυτό εγγυάται την διατήρηση του επιθυμητού επιπέδου λεπτομέρειας, που ταυτόχρονα εξασφαλίζει ικανοποιητική προγνωστική ικανότητα του μοντέλου (όπως αυτή αποτιμάται με βάση τα διάφορα αριθμητικά κριτήρια προσαρμογής) και φυσική συνέπεια, όσον αφορά στις τιμές των παραμέτρων και την αναπαράσταση των διεργασιών που δεν ελέγχονται από μετρήσεις.

5.4.1 Η σχέση σχηματοποίησης, παραμετροποίησης και βαθμονόμησης

Στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ (και ειδικά στην περιγραφή των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών) υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ των επιπέδων σχηματοποίησης και παραμετροποίησης. Η πρώτη αναφέρεται στη διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου και των υπολεκάνων, ενώ η δεύτερη στη διαμόρφωση των μονάδων υδρολογικής απόκρισης. Όσον αφορά στα υπόγεια νερά, η σχηματοποίηση και παραμετροποίηση του πεδίου ροής ταυτίζεται, αφού σε κάθε κύτταρο μπορούν, θεωρητικά, να τεθούν διαφορετικές τιμές παραμέτρων υδραυλικής αγωγιμότητας και πορώδους.

Η σχηματοποίηση ενός υδροσυστήματος καθορίζεται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- τη χωρική ετερογένεια των βροχοπτώσεων·
- τις ανάγκες της μελέτης (σε ποιες, δηλαδή, θέσεις της λεκάνης επιδιώκεται η αναπαράσταση των διεργασιών και σε ποιες θέσεις υπάρχουν μετρήσεις, ώστε να μπορεί να ελεγχθεί η επίδοση του μοντέλου)
- τους περιορισμούς στον υπολογιστικό φόρτο της προσομοίωσης.

Από την άλλη πλευρά, η παραμετροποίηση οφείλει να είναι όσο το δυνατό πιο φειδωλή, ώστε να μην χρησιμοποιούνται περισσότερες παράμετροι σε σχέση με αυτές που μπορούν να υποστηρίξουν η διαθέσιμη πληροφορία για το υδροσύστημα, αντικειμενική (μετρήσεις παροχής και στάθμης) και υποκειμενική (υδρολογική εμπειρία). Διαφορετικά, η διαδικασία βελτιστοποίησης λειτουργεί ως ένας μηχανισμός μαύρου κουτιού, προσαρμόζοντας τις τιμές των παραμέτρων στις μετρημένες αποκρίσεις και παράγοντας τις υπόλοιπες αποκρίσεις του μοντέλου με τρόπο που δεν ανταποκρίνεται στη διαίτα των φυσικών διεργασιών που αυτές αναπαριστούν. Επιπλέον, η χρήση μεγάλου αριθμού παραμέτρων δυσχεραίνει τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, δεδομένου ότι η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του πεδίου αναζήτησης αυξάνει ραγδαία με την αύξηση της διάστασης του προβλήματος.

Η διεθνής εμπειρία καταδεικνύει ότι στα μηνιαία μοντέλα βροχής-απορροής, που βαθμονομούνται με μοναδικό κριτήριο την προσαρμογή του προσομοιωμένου στο παρατηρημένο υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης, αρκούν μόλις πέντε έως έξι παράμετροι για μια ικανοποιητική αναπαραγωγή των χαρακτηριστικών του υδρογραφήματος (Beven, 1989· Kuczera and Mroczkowski, 1998· Wagener *et al.*, 2001). Η εμπειρική αυτή διαπίστωση μπορεί να γενικευτεί για σύνθετα υδρολογικά μοντέλα, όπως η ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, στα οποία προσομοιώνονται πολύ περισσότερες διεργασίες και, ως εκ τούτου, εμπλέκονται πολύ περισσότερες παράμετροι. Στην περίπτωση αυτή, το πλήθος των παραμέτρων

μπορεί να θεωρηθεί ότι αυξάνει αναλογικά με το πλήθος των κριτηρίων ελέγχου. Συνεπώς, σε ένα πρόβλημα της τάξης των 100 παραμέτρων, απαιτούνται 15-20 διαφορετικά κριτήρια προσαρμογής, όπως αυτά που περιγράφονται στην ενότητα 5.2, ώστε να επιτευχθεί ευστάθεια. Τα τελευταία χρόνια, η υδρολογική κοινότητα έχει δώσει μεγάλη έμφαση σε ζητήματα που αφορούν στην πρόσφορη αξιοποίηση των δεδομένων και των υπολογιστικών εργαλείων, στα πλαίσια μιας πολυκριτηριακής προσέγγισης του προβλήματος βαθμονόμησης (Kuczera and Mroczkowski, 1998· Gupta *et al.* 1998· Seibert and McDonnell, 2002· Madsen, 2003· Vrugt *et al.*, 2003· Tang *et al.*, 2006).

Στη βάση των παραπάνω, το πρόγραμμα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ παρέχει ένα πλήθος επιλογών, ώστε να μπορούν να ελεγχθούν διαφορετικές αποκρίσεις του μοντέλου και διαφορετικά χαρακτηριστικά των εν λόγω αποκρίσεων. Επιπλέον, με τη θέσπιση των εμπειρικών συναρτήσεων ποινής που αναφέρονται στην αναπαραγωγή φαινομένων στέρησης και τάσης, είναι δυνατή η επέκταση των ελέγχων σε αποκρίσεις που δεν μπορούν να προσαρμοστούν σε μετρήσεις πεδίου (π.χ. στάθμες κυττάρων). Μια άλλη δυνατότητα του προγράμματος είναι η ομαδοποίηση των παραμέτρων, που επιτρέπει την υιοθέτηση κοινών τιμών στην περίπτωση που ο χρήστης κρίνει ότι κάποιες συνιστώσες του μαθηματικού μοντέλου του υδροσυστήματος, αν και έχουν μοντελοποιηθεί χωριστά, επηρεάζονται από κοινά χαρακτηριστικά της λεκάνης.

5.4.2 Καθορισμός ορίων παραμέτρων

Κατά τη διατύπωση του προβλήματος βαθμονόμησης, ο χρήστης καλείται να ορίσει τη γεωμετρία του πεδίου αναζήτησης, που δίνεται με τη μορφή ενός επιθυμητού εύρους διακύμανσης των παραμέτρων. Τα τελευταία εκφράζουν είτε μαθηματικά όρια τιμών (π.χ. 0 έως 1, για τους αδιάστατους συντελεστές στέρησης) είτε εύλογα όρια, που προκύπτουν με βάση την εννοιολογική ερμηνεία των παραμέτρων, σε σχέση με τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Για παράδειγμα, σε μια μονάδα υδρολογικής απόκρισης που αναπτύσσεται πάνω σε έντονα διαπερατό υπόβαθρο, είναι εύλογο να τεθεί αρκετά υψηλότερο άνω όριο για τον συντελεστή στέρησης της κατείσδυσης (π.χ. της τάξης του 40-60%) σε σχέση με μια μονάδα που αναπτύσσεται πάνω από αδιαπέρατους σχηματισμούς, οπότε η εν λόγω παράμετρος δύσκολα μπορεί να ξεπερνά την τιμή 10%.

Επισημαίνεται ότι ο ορθολογικός χειρισμός των ορίων αποτελεί έναν από τους κρισιμότερους παράγοντες επιτυχίας της βαθμονόμησης, αφού όχι μόνο εξασφαλίζει συμβατότητα των παραμέτρων με τη φυσική τους ερμηνεία αλλά μπορεί να επιτύχει δραστικό περιορισμό του πεδίου αναζήτησης, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλών διαστάσεων. Συνήθως, κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης ο χρήστης διαφοροποιεί τα όρια του πεδίου των παραμέτρων, ώστε να «κατευθύνει» την αναζήτηση προς την επιθυμητή πορεία, διευκολύνοντας έτσι τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Βεβαίως, κάτι τέτοιο προϋποθέτει σημαντική εμπειρία από την πλευρά του χρήστη.

5.4.3 Η έννοια της ημιαυτόματης βαθμονόμησης

Η ημιαυτόματη βαθμονόμηση υποδηλώνει μια διαδραστική προσέγγιση που επιδιώκει την επέμβαση του χρήστη στη διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων, ώστε να «κατευθύνει» την αναζήτηση προς τις πλέον πρόσφορες περιοχές του πεδίου ορισμού τους. Πρόκειται για έναν συνδυασμό της παραδοσιακής χειρωνακτικής βαθμονόμησης και της πλήρως αυτοματοποιημένης προσέγγισης, με τη χρήση αλγορίθμων ολικής βελτιστοποίησης (Boyle *et al.*, 2000).

Δύο είναι οι βασικοί λόγοι που προτιμάται μια τέτοια στρατηγική βαθμονόμησης αντί μιας πλήρως αυτοματοποιημένης μεθόδου:

- εξαιτίας των πολλαπλών πηγών αβεβαιότητας (δομικά σφάλματα μοντέλου, άγνοια διεργασιών, σφάλματα δεδομένων, αρχικών συνθηκών, κλπ.), μια αυτοματοποιημένη διαδικασία δεν εγγυάται

τον εντοπισμό μιας λύσης που να εξασφαλίζει επαρκή προγνωστική ικανότητα του μοντέλου, σε συνδυασμό με ρεαλιστικές τιμές των παραμέτρων του·

- εξαιτίας της πολυπλοκότητας του μαθηματικού προβλήματος βελτιστοποίησης (μεγάλος αριθμός παραμέτρων και κριτηρίων), είναι εξαιρετικά δυσχερής η προσέγγιση μιας ικανοποιητικής λύσης.

Παρόλο που η ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ παρέχει εξελεγμένα υπολογιστικά εργαλεία βελτιστοποίησης, δεν είναι λογικό να αναμένει κανείς ότι αρκεί μία μεμονωμένη αναζήτηση, έστω και αν σε αυτή επιτραπεί η εκτέλεση ενός μεγάλου αριθμού δοκιμών, για τον αυτόματο υπολογισμό των κατάλληλων τιμών των παραμέτρων. Αντίθετα, προτείνεται μια υβριδική διαδικασία διαδοχικών βημάτων, που βασίζεται στις ακόλουθες αρχές:

- σε πρώτο στάδιο, επιδιώκεται μια τμηματική αντιμετώπιση του προβλήματος, με βελτιστοποίηση ενός μικρού, σχετικά, αριθμού παραμέτρων, που επηρεάζουν συγκεκριμένες και όσο το δυνατόν καλύτερα ελεγχόμενες διεργασίες (κατά προτεραιότητα τις επιφανειακές, σε σχέση με τις υπόγειες)·
- στα αρχικά στάδια δίνεται έμφαση στα χονδροειδή σφάλματα, εξασφαλίζοντας έτσι μια γενικά καλή εικόνα όλων των πτυχών του μοντέλου·
- όσο μικρότερη είναι η συνεισφορά της βασικής ροής, που προέρχεται από τις εκροές των πηγών, στο υδατικό ισοζύγιο, τόσο πιο «ανεξάρτητες» καθίστανται οι παράμετροι του επιφανειακού μοντέλου σε σχέση με αυτές του υπόγειου, και συνεπώς μπορούν να βαθμονομηθούν σχετικά αυτόνομα·
- επειδή οι ποινές που αναφέρονται στην τάση των χρονοσειρών στάθμης των υπόγειων νερών επηρεάζουν δραστικά τη συνολική δίαίτα του υδροφορέα, είναι προτιμητέο να ελεγχθούν κατά προτεραιότητα, σε σχέση με τις παρατηρήσεις παροχής των πηγών ή στάθμης·
- όταν η βελτιστοποίηση αδυνατεί να αναπαράξει τα παρατηρημένα υδρογραφήματα μεμονωμένων πηγών, ο χρήστης πρέπει να επαναπροσδιορίσει τις αρχικές στάθμες των γειτονικών κυττάρων, ώστε να διαφοροποιήσει την τοπική χωρική κατανομή των υπόγειων νερών·
- όταν η διαδικασία βελτιστοποίησης οδηγεί σε τιμές παραμέτρων που δεν είναι συμβατές με την εννοιολογική τους ερμηνεία, και εφόσον έχει αποκλειστεί η περίπτωση σημαντικών σφαλμάτων στα δεδομένα εισόδου, απορρίπτεται η τρέχουσα λύση και δοκιμάζεται μια άλλη διατύπωση του προβλήματος βαθμονόμησης, με αλλαγή π.χ. των ορίων των παραμέτρων ή των συντελεστών βάρους των κριτηρίων·
- όταν οι βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων είναι πολύ κοντά ή πάνω στα όρια του πεδίου αναζήτησης, τα εν λόγω όρια διευρύνονται και επαναλαμβάνεται η επίλυση του προβλήματος, καθώς υπάρχει το ενδεχόμενο να βρεθεί μια καλύτερη λύση εκτός του τρέχοντος εφικτού χώρου·
- λύσεις που παρουσιάζουν ακραία συμπεριφορά όσον αφορά στην ανταγωνιστικότητα των κριτηρίων, δηλαδή παρουσιάζουν πολύ καλή επίδοση ως προς ορισμένα μέτρα προσαρμογής και πολύ κακή ως προς τα υπόλοιπα απορρίπτονται, ανεξάρτητα αν το σταθμισμένο αποτέλεσμα της στοχικής συνάρτησης φαίνεται ικανοποιητικό.

Αναμφίβολα, η παραπάνω στρατηγική απαιτεί σημαντικό φόρτο εργασίας και προϋποθέτει την πολύπλευρη αξιοποίηση της κρίσης και εμπειρίας του μηχανικού. Μια τέτοια στρατηγική υιοθετήθηκε για το τη μοντελοποίηση του υδροσυστήματος Δυτικής Θεσσαλίας, που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6, και ιδιαίτερα στο εδάφιο 6.4.3.

6 Εφαρμογή στο υδροσύστημα Δυτικής Θεσσαλίας

6.1 Περιοχή μελέτης

6.1.1 Οριοθέτηση υδροσυστήματος

Σύμφωνα με το συμβατικό του έργου, οι περιοχές πιλοτικής εφαρμογής των αποτελεσμάτων της έρευνας είναι ο Νομός Καρδίτσας και η Νήσος Κάλυμνος. Οι εφαρμογές αυτές αποσκοπούν στον έλεγχο και την αξιολόγηση των προϊόντων που αναπτύσσονται (από πλευράς μεθοδολογιών και λογισμικού), και μάλιστα σε συστήματα υδατικών πόρων με εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά, τόσο ως προς την υδροκλιματικό καθεστώς και την κλίμακα των έργων όσο και ως προς το θεσμικό-διοικητικό πλαίσιο της διαχείρισής τους.

Αναμφίβολα, η ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ προσφέρεται για την προσομοίωση σύνθετων υδροσυστημάτων, στα οποία αναπαριστά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υδρολογικών διεργασιών, αλλά και τις επιπτώσεις των ανθρώπινων επεμβάσεων (έργα αξιοποίησης των υδατικών πόρων και καθεστώς λειτουργίας τους) στο επιφανειακό και υπόγειο υδατικό δυναμικό τους. Είναι προφανές ότι ο έλεγχος του συγκεκριμένου μοντέλου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την περιοχή της Καρδίτσας, ενώ έχει μάλλον περιορισμένο νόημα για ένα μικρό νησί, όπου μάλιστα δεν υπάρχουν καθόλου μετρήσεις επιφανειακών υδατικών πόρων. Αντίθετα, στην περιοχή της Καρδίτσας λειτουργούν αρκετοί υδρομετρικοί σταθμοί, με σημαντικότερο αυτόν του Αλή Εφέντη στον Πηνειό, κοντά στην εκβολή του Ενιπέα που είναι το κύριο υδατόρευμα της περιοχής. Ωστόσο, η συγκεκριμένη θέση ελέγχει την απορροή όχι μόνο του υδρογραφικού δικτύου του Νομού Καρδίτσας αλλά της συνολικής ανάντη λεκάνης του Πηνειού, η οποία περιλαμβάνει και τον Νομό Τρικάλων. Για τον λόγο αυτό, η περιοχή εφαρμογής του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, όπως προκύπτει από την διαμόρφωση του φυσικού συστήματος, καλύπτει μια αρκετά μεγαλύτερη της συμβατικής έκτασης, που θα αναφέρεται στην συνέχεια ως υδροσύστημα Δυτικής Θεσσαλίας.

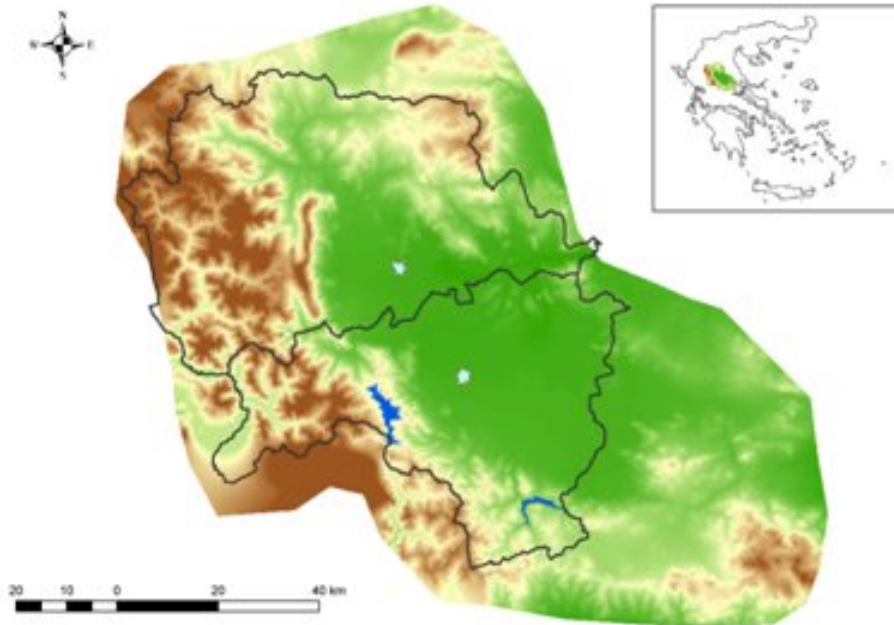
Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά η πορεία των εργασιών και τα αποτελέσματα από την προσαρμογή του μοντέλου στο εν λόγω υδροσύστημα. Η προσαρμογή αναφέρεται σε μια περίοδο 20 υδρολογικών ετών (Οκτώβριος 1972-Σεπτέμβριος 1993), για την οποία υπήρχαν επαρκή γεωγραφικά και υδρολογικά δεδομένα για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου, με έμφαση στις μετρήσεις επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων. Αναλυτικότερη παρουσίαση όλων των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη γίνεται στην εργασία του Τέγου (2005).

6.1.2 Συνοπτική περιγραφή της περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης εκτείνεται στο δυτικό τμήμα της Θεσσαλίας, που οριοθετείται από την λεκάνη απορροής ανάντη του υδρομετρικού σταθμού Αλή Εφέντη στον Πηνειό (Σχήμα 6.1). Τα φυσικά όρια της λεκάνης είναι τα Χαλκοδόνια όρη στα ανατολικά, το όρος Ζάρκο στα βορειανατολικά, τα όρη Χάσια και Αντιχάσια στα βόρεια, το Κερκότιον όρος (Κόζιακας) στα δυτικά, και το όρος Τυμφρηστός στα νότια. Η συνολική έκταση της λεκάνης είναι 6087.5 km², με μέγιστο υψόμετρο +2203 m και ελάχιστο +46 m.

Στα κεντρικά και ανατολικά της περιοχής μελέτης εκτείνονται οι αρδευόμενες πεδινές περιοχές των Νομών Καρδίτσας και Τρικάλων που ανήκουν στη λεκάνη. Εκτός από τον Πηνειό, που είναι το κύριο

υδατόρευμα, αναπτύσσεται ένα αρκετά πολύπλοκο υδρογραφικό δίκτυο από παραποτάμους που συμβάλλουν σε αυτόν, σημαντικότεροι από τους οποίους είναι ο Καλέτζης, ο Πάμισος, ο Ληθαίος, ο Φαρσαλιώτης και ο Ενιπέας. Επιπλέον, στην περιοχή έχει διαμορφωθεί ένα σύνθετο δίκτυο από κανάλια και χωμάτινες τάφρους, που κατά την ξηρή περίοδο εξυπηρετεί την επιφανειακή άρδευση των παρακείμενων αγροτεμαχίων, ενώ την υγρή περίοδο λειτουργεί ως αποστραγγιστικό δίκτυο.



Σχήμα 6.1: Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της Δυτικής Θεσσαλίας, όπου απεικονίζονται τα όρια των νομών Τρικάλων και Καρδίτσας και οι ταμιευτήρες Πλαστήρα και Σμοκόβου.

Η εξυπηρέτηση των αρδευτικών αναγκών γίνεται από επιφανειακά και υπόγεια νερά. Ειδικότερα, ο Νομός Καρδίτσας, σε ένα σημαντικό ποσοστό της αρδεύσιμης έκτασής τους, εξυπηρετείται από τον ταμιευτήρα Πλαστήρα, που εκτρέπει το σύνολο των υδατικών πόρων της υπολεκάνης του Ταυρωπού (παραπόταμος του Αχελώου) προς τη Θεσσαλική πεδιάδα. Οι εκροές του ταμιευτήρα κατευθύνονται προς τον υδροηλεκτρικό σταθμό, και στη συνέχεια σε μια αναρρυθμιστική λίμνη που βρίσκεται στο Δήμο Μητρόπολης. Από την τελευταία ξεκινούν τέσσερις διαφορετικοί αγωγοί. Ο πρώτος εξυπηρετεί το κύριο αρδευτικό έργο του Πλαστήρα, έκτασης 150000 στρεμμάτων, που περιλαμβάνει αρδεύσιμες εκτάσεις των Δήμων Καρδίτσας, Μητρόπολης, Κάμπου και Ιθώμης. Ο δεύτερος μεταφέρει νερό μέσω άντλησης προς τρία ορεινά χωριά του δήμου Πλαστήρα (Μεσενικόλας, Μορφοβούνι, Μοσχάτο), τα οποία βρίσκονται στα δυτικά της αναρρυθμιστικής λίμνης, αρδεύοντας εκτάσεις 3000 στρεμμάτων. Ο τρίτος εξυπηρετεί με απευθείας άντληση δύο χωριά του δήμου Μητρόπολης που δεν εντάσσονται στο κύριο αρδευτικό έργο του Πλαστήρα (Ξυνονέρι, Ρούσσο). Τέλος, ο τέταρτος αγωγός είναι ένα τεχνητό κανάλι, που έχει διανοιχτεί περιμετρικά του αρδευτικού δικτύου του Πλαστήρα (νότια του αρδευτικού δικτύου), εξυπηρετώντας τους Δήμους Παλαμά, Ιτάμου, Καλιφονίου, Άρνης και Φύλλου. Στη συνέχεια, η περίσσεια νερού οδηγείται μέσω του Πηνειού στο Νομό Λάρισας. Η υπόλοιπη περιοχή, που ανήκει στον ΤΟΕΒ Θεσσαλιώτιδος και περιλαμβάνει τους δήμους Σοφάδων, Ταμασίου και Μενελαίδος εξυπηρετείται από κρατικές και ιδιωτικές γεωτρήσεις, καθώς και από τα επιφανειακά νερά του Σοφαδίτικου, του Φαρσαλιώτη και του Ενιπέα.

Κατά την περίοδο προσαρμογής του μοντέλου (1973-1993), η λειτουργία του παραπάνω δικτύου ελήφθη υπόψη με ορισμένες αναγκαίες απλοποιητικές παραδοχές. Αντίθετα, δεν προσομοιώθηκε η λειτουργία των δύο ταμιευτήρων του Νομού Καρδίτσας, δηλαδή του Πλαστήρα και του Σμοκόβου, καθώς ο μεν πρώτος βρίσκεται εκτός της περιοχής μελέτης (ανήκει υδρολογικά στη λεκάνη του

Αγελώου) ενώ ο δεύτερος ξεκίνησε να λειτουργεί μόλις το 2002, πολύ αργότερα δηλαδή από την περίοδο ελέγχου του μοντέλου. Βεβαίως, οι ιστορικές εκροές από τη λίμνη Πλαστήρα, που εξυπηρετούν τις αρδευτικές ανάγκες της περιοχής, εισάγονται με τη μορφή γνωστής εξωτερικής προσφοράς νερού, με βάση την σχηματοποίηση που εξηγείται στο υποκεφάλαιο 6.3.

6.2 Δεδομένα και επεξεργασίες

6.2.1 Γεωγραφικά δεδομένα

Τα πρωτογενή γεωγραφικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων της περιοχής και δύο επίπεδα καταναμημένης πληροφορίας, που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (βλ. 6.3.3). Το πρώτο αναφέρεται στην περατότητα των πετρωμάτων, που περιλαμβάνει τέσσερις τύπους (περατά, προσχωματικά, ημιπερατά, αδιαπεράτα), τα οποία ομαδοποιήθηκαν σε τρεις κατηγορίες. Το δεύτερο αναφέρεται στις χρήσεις γης, ο καθορισμός των οποίων στηρίχθηκε σε εργασία της υπηρεσίας του εθνικού κτηματολογίου του ΥΠΕΧΩΔΕ (1993). Με βάση τη συγκεκριμένη χαρτογράφηση, δημιουργήθηκαν τρεις κατηγορίες:

- αρδευόμενες εκτάσεις, που περιλαμβάνει περιοχές μόνιμων αρδευόμενων εκτάσεων, λιβάδια και αγροτικές δασικές περιοχές
- περιοχές χαμηλής βλάστησης, όπου αναπτύσσονται φυσικοί βοσκότοποι, εκτάσεις με αραιή και σκληροφυλλική βλάστηση, θάμνοι και χερσότοποι
- δασικές εκτάσεις, όπου αναπτύσσονται δάση πλατύφυλλων, κωνοφόρων και μικτά.

6.2.2 Υδρολογικά δεδομένα

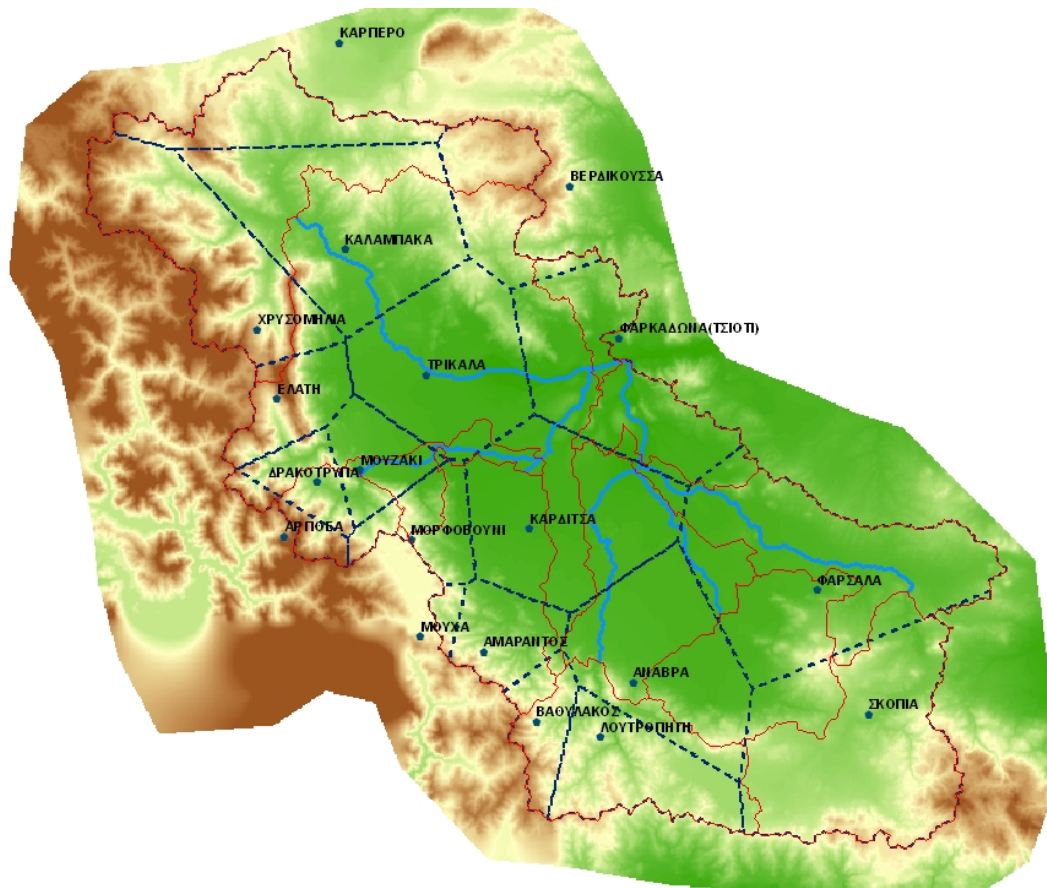
Τα πρωτογενή υδρολογικά δεδομένα αναφέρονται σε δείγματα βροχομετρικών, μετεωρολογικών και υδρομετρικών σταθμών της περιοχής μελέτης, που χρησιμοποιήθηκαν για την κατάρτιση χρονοσειρών επιφανειακής βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής στις υπολεκάνες (είσοδοι μοντέλου), και παροχής σε διάφορες θέσεις του υδρογραφικού δικτύου, για τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Οι επεξεργασίες των δεδομένων έγιναν με το λογισμικό ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ, που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του έργου (Κοζάνης κ.ά., 2005).

Η εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης βασίστηκε στα μηνιαία δεδομένα 19 βροχομετρικών σταθμών, οι θέσεις των οποίων φαίνονται στο Σχήμα 6.2. Τα σημειακά δείγματα, που ελήφθησαν από την υδρολογική διερεύνηση των Κουτσόγιαννη κ.ά. (2001), ολοκληρώθηκαν στην επιφάνεια των 12 υπολεκάνων στις οποίες χωρίστηκε η λεκάνη. Η επιφανειακή ολοκλήρωση έγινε με τη μέθοδο Thiessen, και ακολούθησε υψομετρική αναγωγή, θεωρώντας κοινή βροχοβαθμίδα για όλη τη λεκάνη.

Η δυνητική εξατμοδιαπνοή, που θεωρήθηκε κοινή για όλες τις υπολεκάνες, εκτιμήθηκε με τη μέθοδο Penman-Monteith, με βάση τα μέσα μηνιαία μετεωρολογικά δεδομένα του σταθμού Τρικάλων (μέσες, μέγιστες και ελάχιστες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας, σχετική υγρασία, σχετική ηλιοφάνεια, ταχύτητα ανέμου). Στον Πίνακα 6.1 δίνονται τα αποτελέσματα, σε μέση μηνιαία κλίμακα.

Πίνακας 6.1: Μηνιαία ύψη δυνητικής εξατμοδιαπνοής (mm).

| Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αυγ. | Σεπ. | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. |
|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 23.8 | 33.4 | 52.2 | 95.5 | 135.0 | 178.0 | 182.2 | 155.5 | 111.6 | 57.4 | 27.6 | 20.3 |



Σχήμα 6.2: Βροχομετρικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη και πολύγωνα Thiessen.

Στη Δυτική Θεσσαλία υπάρχουν αρκετοί υδρομετρικοί σταθμοί σε θέσεις θεμελίωσης φραγμάτων, σε θέσεις του Πηνειού ποταμού καθώς και σε ορισμένους παραποτάμους του. Ωστόσο, ορισμένοι από αυτούς θεωρούνται πολύ χαμηλής αξιοπιστίας. Μετά από διερεύνηση, οι θέσεις μέτρησης παροχής που επιλέχθηκαν για τη συγκεκριμένη μελέτη είναι του Αλή Εφέντη και της Σαρακήνας στον Πηνειό, του Μουζακίου στον Πάμισο, του Κέδρου στο Σοφαδίτη και της Αμπελιάς στον Ενιπέα (Πίνακας 6.2). Ο σημαντικότερος όλων είναι του Αλή Εφέντη, που βρίσκεται στα σύνορα των νομών Καρδίτσας και Λάρισας, στη συμβολή του Πηνειού με τον Ενιπέα, και ελέγχει το μεγαλύτερο ποσοστό της απορροής του υδροσυστήματος. Προηγούμενες μελέτες (Κουτσογιάννης κ.ά., 1988· Κουτσογιάννης κ.ά., 2001) κατέδειξαν ότι στο σύνολο των σταθμών (ειδικά στην Αμπελιά και τη Σαρακήνα) παρατηρούνται αρκετά προβλήματα, με αποτέλεσμα τα δείγματα που χρησιμοποιούνται να περιέχουν σφάλματα, άλλοτε μεμονωμένα και άλλοτε συστηματικά.

Πίνακας 6.2: Υδρομετρικοί σταθμοί περιοχής Δυτικής Θεσσαλίας.

| Σταθμός | Υδατόρευμα | Υπηρεσία | Περίοδος μετρήσεων | Μέση παροχή (m ³ /s) |
|------------|------------|----------|--------------------|---------------------------------|
| Μουζάκι | Πάμισος | ΥΠΕΧΩΔΕ | 10/1985-9/1993 | 2.76 |
| Αλή Εφέντη | Πηνειός | ΥΠΕΧΩΔΕ | 10/1972-9/1993 | 35.82 |
| Αμπελιά | Ενιπέας | ΥΠΕΧΩΔΕ | 3/1974-5/1993 | 2.23 |
| Κέδρος | Σοφαδίτης | ΥΠΕΧΩΔΕ | 10/1972-9/1982 | 4.85 |
| Σαρακήνα | Πηνειός | ΥΠΕΧΩΔΕ | 10/1972-2/1985 | 11.36 |

6.2.3 Υδρογεωλογικά δεδομένα

Τα υδρογεωλογικά δεδομένα αναφέρονται σε πιεζομετρικές παρατηρήσεις, που ελήφθησαν από μελέτη της Γαλλικής εταιρίας SOGREAH, που εκπονήθηκε τη περίοδο 1971-1978. Στα πλαίσια της παραπάνω μελέτης, εγκαταστάθηκαν 40 γεωτρήσεις παρατηρήσεις της στάθμης και καταγράφηκαν οι μέσες μηνιαίες τιμές τους. Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία 11 γεωτρήσεων, που φαίνονται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3: Θέσεις παρατήρησης στάθμης υδροφορέα που χρησιμοποιήθηκαν στη βαθμονόμηση.

| Όνομασία | Θέση γεώτρησης | Κύτταρο | Περίοδος μετρήσεων | Μέση στάθμη (m) |
|----------|-------------------------|---------|--------------------|-----------------|
| G406 | Παλιοκλήσι Καρδίτσας | 16 | 10/1972-5/1978 | 98.8 |
| D1 | Μεγάρχη Τρικάλων | 6 | 10/1972-3/1985 | 134.4 |
| D22 | Φήκη Τρικάλων | 0 | 10/1972-1/1983 | 128.8 |
| G402 | Ζηλευτή Τρικάλων | 13 | 10/1972-2/1984 | 93.9 |
| G403 | Αγναντερό Καρδίτσας | 22 | 10/1972-2/1984 | 95.6 |
| D41 | Νέο Μοναστήρι Φθιώτιδας | 28 | 10/1972-3/1984 | 114.7 |
| D34 | Γεφύρια Καρδίτσας | 32 | 10/1972-1/1984 | 103.7 |
| D30 | Καλλίθηρο Καρδίτσας | 18 | 10/1972-4/1978 | 134.6 |
| PZ4 | Κυνέλη Σοφάδων | 21 | 5/1973-2/1984 | 96.7 |
| G501 | Πατούλια Τρικάλων | 40 | 10/1972-2/1977 | 94.1 |
| G506 | Βλοχός Καρδίτσας | 41 | 10/1972-1/1984 | 85.1 |

6.2.4 Διαχειριστικά δεδομένα

Στην περιοχή της Δυτικής Θεσσαλίας αναπτύσσεται ένα εκτεταμένο δίκτυο αρδευτικών και αποστραγγιστικών καναλιών, η λεπτομερής αποτύπωση του οποίου ξεφεύγει από τους σκοπούς της μελέτης. Όσον αφορά στις γεωτρήσεις, μόνο στο Νομό Καρδίτσας λειτουργούν περίπου 150 κρατικές, οι οποίες ανήκουν σε Τοπικούς Οργανισμούς Εγγείων Βελτιώσεων (ΤΟΕΒ), ενώ ο αριθμός των ιδιωτικών εκτιμάται στις 7000. Είναι προφανές ότι η αναζήτηση αναλυτικών στοιχείων θα ήταν μια εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία, με αμφίβολη χρησιμότητα όσον αφορά στην αξιοποίησή τους στο μοντέλο. Συνεπώς, επιλέχθηκε μια διαφορετική προσέγγιση, που βασίζεται στην ομαδοποίηση των υδατικών αναγκών, με βάση τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις ανά κοινότητα του νομού και τις πηγές υδροδότησης των αντίστοιχων εκτάσεων.

Τα πρωτογενή δεδομένα ελήφθησαν από το αρχείο καλλιεργειών του Υπουργείου Γεωργίας (Τμήμα Υδρογεωλογίας και Μαθηματικών Ομοιωμάτων) της Δυτικής Θεσσαλίας, και αναφέρονται στα είδη καλλιεργειών και τις εκτάσεις, ανά κοινότητα, των νομών Καρδίτσας και Τρικάλων. Στη συνέχεια, οι καλλιεργούμενες εκτάσεις συναθροίστηκαν στους αρδευτικούς κόμβους, που προέκυψαν από την ομαδοποίηση των κοινοτήτων, με βάση τη σχηματοποίηση που περιγράφεται στο εδάφιο 6.3.5. Για κάθε είδος καλλιέργειας και για κάθε κόμβο, εκτιμήθηκαν οι θεωρητικές ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό για τα έτη 1972, 1982 και 1993, με χρήση του λογισμικού ΔΙΨΟΣ, που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του έργου (Ρόζος, 2005). Για όλες τις καλλιέργειες, θεωρήθηκε κοινή ημερομηνία σποράς η 20η Απριλίου. Για τα συγκεκριμένα έτη, υπολογίστηκαν οι συνολικές ανάγκες κάθε κόμβου, αθροίζοντας τις επιμέρους ανάγκες κάθε καλλιέργειας, ενώ για τα υπόλοιπα ενδιάμεσα έτη, οι υδατικές ανάγκες εκτιμήθηκαν μέσω γραμμικής παρεμβολής.

Άλλα διαχειριστικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη ήταν οι ιστορικές απολήψεις από τον ταμιευτήρα Πλαστήρα, που θεωρήθηκαν ως τεχνητή προσφορά νερού στο υδροσύστημα, και η υδρευτική ζήτηση για την περιοχή της Καρδίτσας, που τέθηκε ίση με $2.0 \text{ hm}^3/\text{μήνα}$.

6.3 Σχηματοποίηση υδροσυστήματος

6.3.1 Γενικές αρχές

Με τον όρο σχηματοποίηση νοείται η διαμόρφωση των τεσσάρων κύριων θεματικών επιπέδων του μοντέλου, δηλαδή του υδρογραφικού δικτύου, των μονάδων υδρολογικής απόκρισης, του υδροφορέα και του σχήματος αναπαράστασης της διαχείρισης των υδατικών πόρων της περιοχής μελέτης.

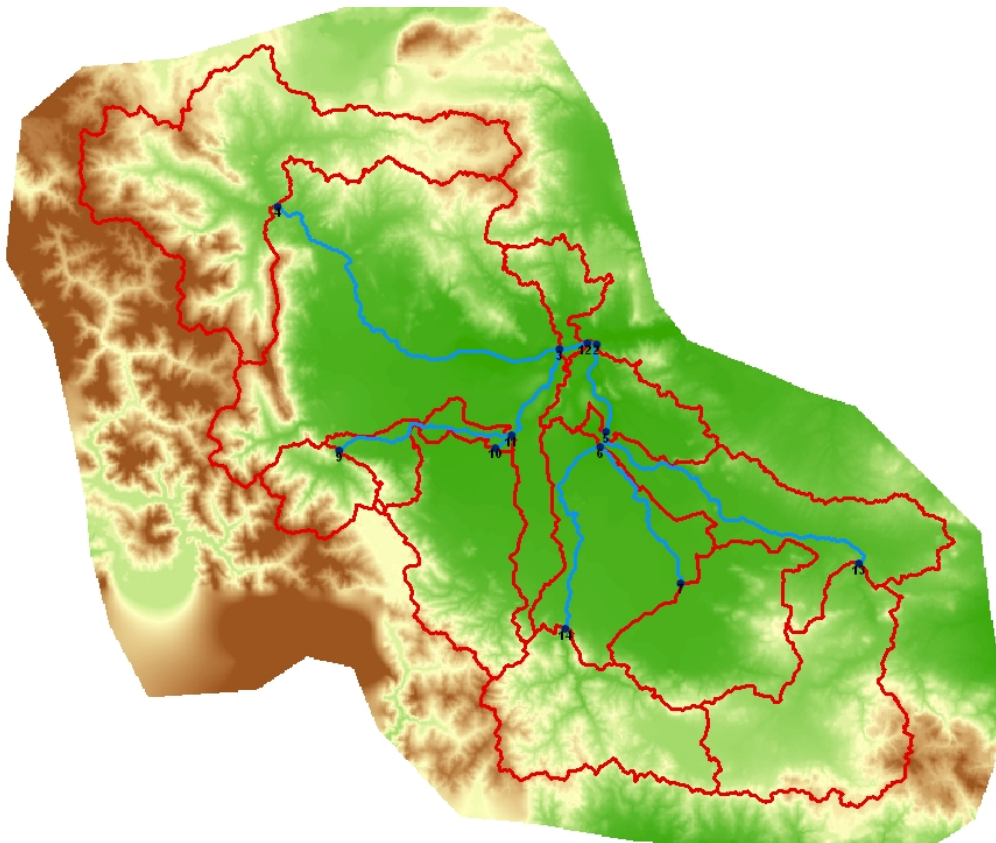
Η λεπτομέρεια της σχηματοποίησης καθορίστηκε από τη διαθέσιμη πληροφορία, σε συνδυασμό με την απαίτηση περιορισμού του υπολογιστικού φόρτου του μοντέλου, που εξασφαλίζει μια ρεαλιστική αναπαράσταση της λειτουργίας του συστήματος. Συνεπώς, όσον αφορά στο υδρογραφικό δίκτυο, ελήφθησαν υπόψη όλοι οι υδρομετρικοί σταθμοί της περιοχής, που αποτελούν τα σημεία ελέγχου των επιφανειακών υδατικών πόρων. Η διακριτοποίηση του υδροφορέα βασίστηκε στο μέσο πιεζομετρικό χάρτη της περιοχής, και ήταν πιο λεπτομερής στα πεδινά τμήματα όπου υπήρχαν παρατηρήσεις στάθμης, οι οποίες αξιοποιήθηκαν στη διαδικασία συνδυαστικής εκτίμησης των παραμέτρων του επιφανειακού και υπόγειου μοντέλου. Τέλος, για την αναπαράσταση της διαχείρισης των υδατικών πόρων, υιοθετήθηκε μια αδρομερής προσέγγιση, σύμφωνα με την οποία η περιοχή διαχωρίστηκε σε αρδευόμενες ζώνες, όπου έγινε συνάθροιση των υδατικών αναγκών των επιμέρους κοινοτήτων σε εννοιολογικούς κόμβους ζήτησης. Επιπλέον, ελήφθησαν υπόψη ορισμένες ιδιαιτερότητες του συστήματος, όπως η διάκριση της θερινής και χειμερινής κατανομής των εκροών του ταμιευτήρα Πλαστήρα, που επηρεάζει σημαντικά το υδατικό ισοζύγιο της περιοχής.

6.3.2 Υδρογραφικό δίκτυο - Υπολεκάνες

Η σχηματοποίηση του υδρογραφικού δικτύου βασίστηκε σε μια επαναληπτική διαδικασία. Αρχικά, παρήχθη ένα πολύ λεπτομερές δίκτυο, με βάση το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων της περιοχής και υιοθετώντας ένα μικρό κατώφλι συγκέντρωσης της απορροής. Με τον τρόπο αυτό, προέκυψε ένας πολύ μεγάλος αριθμός υπολεκανών, ανάντη όλων των κόμβων συμβολής. Στο παραπάνω δίκτυο τοποθετήθηκαν οι υδρομετρικοί σταθμοί, και αναζητήθηκε μια μεγαλύτερη τιμή κατωφλίου, ώστε οι ανάντη κόμβοι των υδατορευμάτων να ταυτίζονται με τις θέσεις των σταθμών (Σαρακήνα για τον Πηνειό, Μουζάκι για τον Πάμισο, Αμπελιά για τον Ενιπέα, Κέδρος για τον Σοφαδίτη). Με την διαδικασία αυτή διαμορφώθηκε η τελική διάταξη των κόμβων και κλάδων του υδρογραφικού δικτύου, που απεικονίζεται στον χάρτη του Σχήματος 6.3 και περιλαμβάνει 13 κόμβους και 12 υπολεκάνες απορροής. Πέντε από τις υπολεκάνες αναπτύσσονται ανάντη των ακραίων κόμβων του υδρογραφικού δικτύου, και συνεπώς δεν διασχίζονται από υδατορεύματα. Τα χαρακτηριστικά των υπολεκανών δίνονται στον Πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικά λεκανών απορροής.

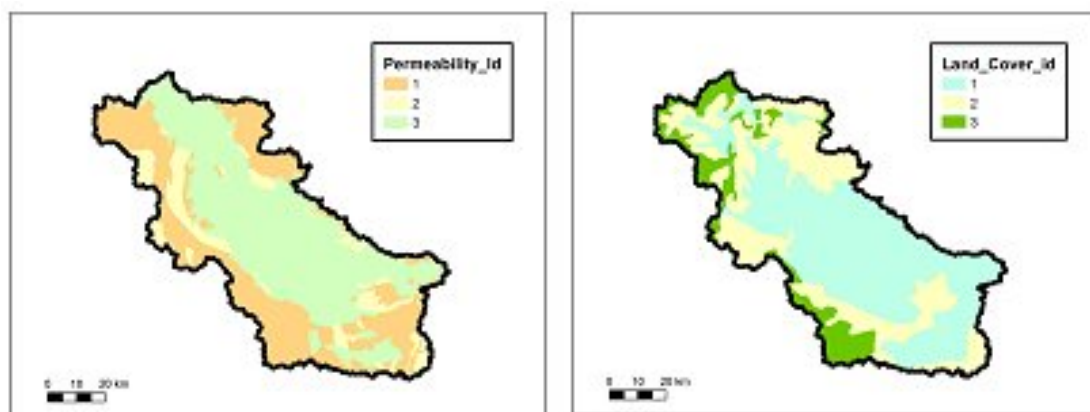
| α/α | Περιγραφή | Κατάντη κόμβος | Έκταση (km ²) |
|-----|---|----------------|---------------------------|
| 1 | Ενιπέα (μεταξύ συμβολής με Φαρσαλιώτη και Πηνειό) | 2 | 204.2 |
| 2 | Πηνειού (μεταξύ Σαρακήνας και συμβολής με Πάμισο) | 3 | 1565.2 |
| 3 | Πηνειού (ανάντη υδρομετρικού σταθμού Σαρακήνας) | 4 | 1023.6 |
| 4 | Ενιπέα (μεταξύ Αμπελιάς και συμβολής με Φαρσαλιώτη) | 5 | 486.0 |
| 5 | Φαρσαλιώτη (ανάντη συμβολής με Σοφαδίτη) | 6 | 479.6 |
| 6 | Φαρσαλιώτη (ανάντη λεκάνη) | 7 | 425.2 |
| 7 | Παμίσου (ανάντη υδρομετρικού σταθμού Μουζακίου) | 9 | 152.7 |
| 8 | Καλέτζη (ανάντη λεκάνη) | 10 | 453.2 |
| 9 | Καλέτζη (ανάντη συμβολής με Πάμισο) | 11 | 130.9 |
| 10 | Πηνειού (μεταξύ συμβολής με Πάμισο και Αλή Εφέντη) | 12 | 116.9 |
| 11 | Ενιπέα (ανάντη υδρομετρικού σταθμού Αμπελιάς) | 13 | 593.3 |
| 12 | Σοφαδίτη (ανάντη υδρομετρικού σταθμού Κέδρου) | 14 | 456.5 |



Σχήμα 6.3: Υδρογραφικό δίκτυο, υπολεκάνες και αρίθμηση κόμβων.

6.3.3 Μονάδες υδρολογικής απόκρισης

Οι μονάδες υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ), που συνιστούν την παραμετροποίηση του επιφανειακού συστήματος, δημιουργήθηκαν από την ένωση των τριών τύπων περατότητας με τους τρεις τύπους χρήσεων γης. Συνεπώς, προέκυψαν 9 ΜΥΑ, που απεικονίζεται στον χάρτη του Σχήματος 6.4. Τα χαρακτηριστικά των ΜΥΑ δίνονται στον Πίνακα 6.5.



Σχήμα 6.4: Επίπεδα πληροφορίας (αριστερά περατότητα, δεξιά χρήσεις γης) που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό των μονάδων υδρολογικής απόκρισης.

Πίνακας 6.5: Χαρακτηριστικά μονάδων υδρολογικής απόκρισης.

| α/α | Περατότητα εδαφών | Χρήση γης | Έκταση (km ²) |
|-----|-------------------|-----------------|---------------------------|
| 1 | Αδιαπέρατα | Αρδευόμενη | 599.9 |
| 2 | Αδιαπέρατα | Χαμηλή βλάστηση | 1159.4 |
| 3 | Αδιαπέρατα | Δασώδης | 676.3 |
| 4 | Περατά | Αρδευόμενη | 156.2 |
| 5 | Περατά | Χαμηλή βλάστηση | 450.7 |
| 6 | Περατά | Δασώδης | 144.8 |
| 7 | Ημιπερατά | Αρδευομένη | 2466.1 |
| 8 | Ημιπερατά | Χαμηλή βλάστηση | 439.7 |
| 9 | Ημιπερατά | Δασώδης | 173.6 |

6.3.4 Υδροφορέας - Πηγές

Η σχηματοποίηση του μοντέλου υπόγειων νερών περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση του υδροφορέα σε πολυγωνικά κύτταρα και την τοποθέτηση των πηγών.

Η διακριτοποίηση του υδροφορέα στηρίχθηκε σε μελέτη της SOGREAH, και ειδικότερα στον πιεζομετρικό χάρτη της πεδινής έκτασης της περιοχής μελέτης. Με βάση τις αρχές του εδαφίου 3.6.1, χαράχθηκαν τα κύτταρα του υπόγειου υδροφορέα, με τις ακμές παράλληλα προς τις ισοδυναμικές γραμμές του χάρτη (Σχήμα 6.5). Ορίστηκαν 50 κύτταρα, όπου τα 41 αντιστοιχούν σε πραγματικές χωρικές ενότητες, ενώ τα υπόλοιπα είναι εικονικά και αναπαριστούν ειδικές διεργασίες. Πιο συγκεκριμένα, τα περιμετρικά κύτταρα 44, 45 και 46 προσομοιώνουν τις εισροές από τους ανάντη ορεινούς υδροφορείς, ενώ το κύτταρο 47 προσομοιώνει την εκφόρτιση του συστήματος προς την Ανατολική Θεσσαλία. Τέλος, οι δεξαμενές των κυττάρων 48, 49 και 50 προσομοιώνουν τη λειτουργία των κύριων πηγών, που αναπτύσσονται στα όρια των υπολεκανών Καλαμπάκας και Τρικάλων (πηγές Μεγάλου και Μικρού Κεφαλόβρυσου), στην περιοχή Μουρκάνι (όπου πηγάζει ο ανάντη κλάδος του Πηνειού) και στους πρόποδες του Κόζιακα, κοντά στα χωριά Πρόδρομος και Γοργύρη.

Στο Πίνακα 6.6 φαίνονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη (έκταση, αρχική στάθμη) των κυττάρων. Για τα κύτταρα στα οποία υπήρχαν γεωτρήσεις με παρατηρήσεις πιεζομετρίας (βλ. Πίνακα 6.3), η αρχική τους στάθμη θεωρήθηκε ίση με την τελευταία παρατηρημένη τιμή πριν την έναρξη της προσομοίωσης (Σεπτέμβριος 1972), παρόλο που τα δύο μεγέθη αντιπροσωπεύουν διαφορετικές χωρικές κλίμακες. Τέλος, οι αρχικές στάθμες των πηγών τέθηκαν ίσες με το υψόμετρο εκφορτίσής τους.



Σχήμα 6.5: Διακριτοποίηση υδροφορέας Δυτικής Θεσσαλίας με βάση τον πιεζομετρικό χάρτη της πεδινής περιοχής (αριστερά), αριθμηση κυττάρων και γεωτρήσεων παρατήρησης (δεξιά).

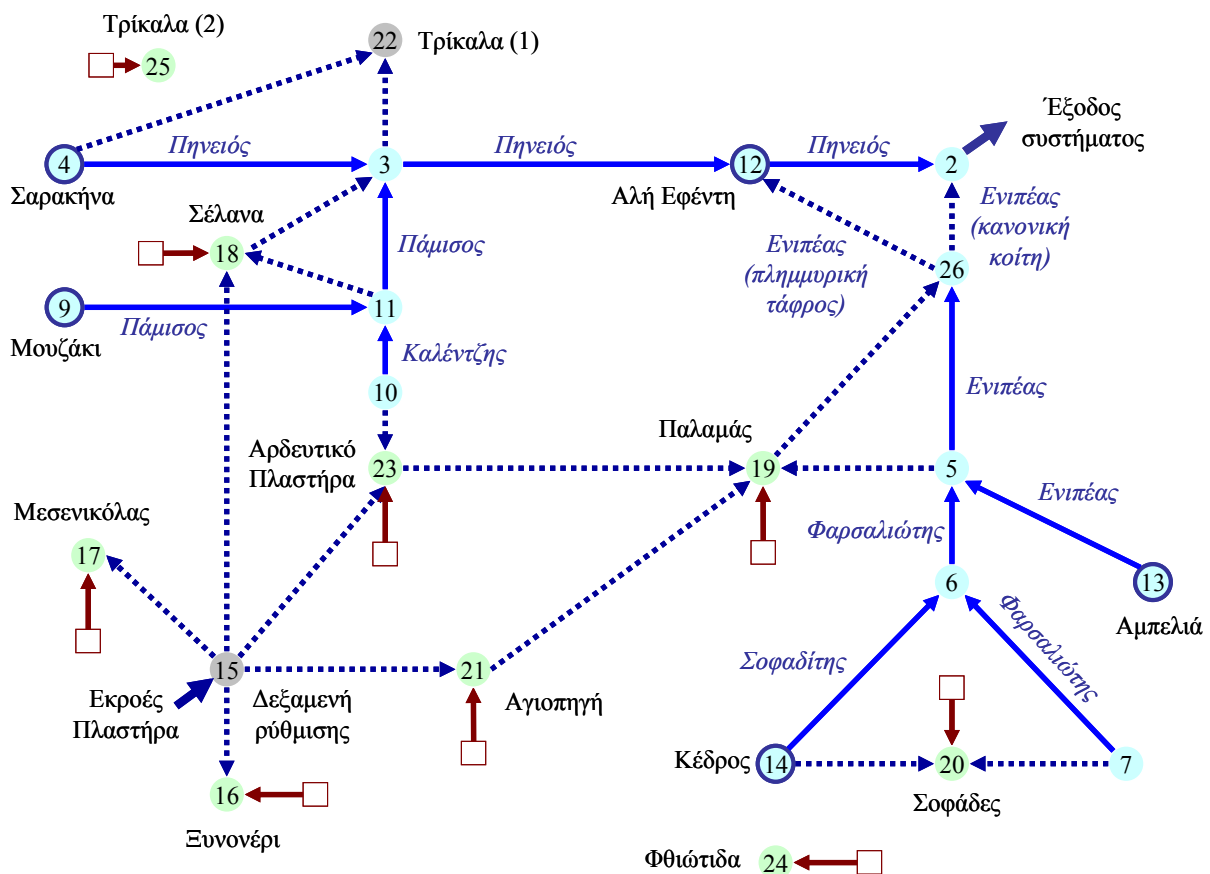
Πίνακας 6.6: Χαρακτηριστικά μεγέθη κυττάρων υδροφορέα (με αστερίσκο σημειώνονται τα κύτταρα για τα οποία υπάρχουν παρατηρήσεις στάθμης).

| α/α | Έκταση (km ²) | Αρχική στάθμη (m) | α/α | Έκταση (km ²) | Αρχική στάθμη (m) |
|-------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|
| 1 ^(*) | 23.0 | 125.5 | 26 | 63.4 | 103.0 |
| 2 | 30.1 | 125.0 | 27 | 41.7 | 126.5 |
| 3 | 19.9 | 130.0 | 28 | 28.0 | 105.0 |
| 4 | 16.2 | 130.0 | 29 ^(*) | 23.7 | 116.0 |
| 5 | 44.4 | 125.0 | 30 | 9.3 | 110.0 |
| 6 | 69.9 | 125.0 | 31 | 15.6 | 107.0 |
| 7 ^(*) | 72.5 | 131.6 | 32 | 31.0 | 115.0 |
| 8 | 59.2 | 125.0 | 33 ^(*) | 52.0 | 106.3 |
| 9 | 32.9 | 124.0 | 34 | 26.6 | 120.0 |
| 10 | 18.3 | 128.0 | 35 | 38.2 | 116.0 |
| 11 | 31.9 | 115.0 | 36 | 45.7 | 110.0 |
| 12 | 19.0 | 110.0 | 37 | 59.8 | 100.0 |
| 13 | 46.7 | 100.0 | 38 | 73.4 | 95.0 |
| 14 ^(*) | 50.7 | 93.6 | 39 | 59.6 | 90.0 |
| 15 | 52.5 | 140.0 | 40 | 91.5 | 90.0 |
| 16 | 41.8 | 126.0 | 41 ^(*) | 124.9 | 94.0 |
| 17 ^(*) | 47.5 | 99.0 | 42 ^(*) | 187.0 | 84.7 |
| 18 | 43.3 | 95.0 | 43 | 89.8 | 80.0 |
| 19 ^(*) | 63.1 | 135.0 | 44 | 321.8 | 140.0 |
| 20 | 63.1 | 125.0 | 45 | 46.0 | 165.0 |
| 21 | 102.4 | 110.0 | 46 | 187.8 | 130.0 |
| 22 ^(*) | 91.0 | 97.0 | 47 | 195.7 | 75.0 |
| 23 ^(*) | 76.9 | 97.4 | 48 | 0.0 | 125.0 |
| 24 | 33.3 | 125.0 | 49 | 0.0 | 140.0 |
| 25 | 27.0 | 120.0 | 50 | 0.0 | 145.0 |

6.3.5 Σχήμα διαχείρισης υδατικών πόρων

Για την περιγραφή της διαχείρισης των υδατικών πόρων απαιτείται η διαμόρφωση μιας σχηματικής διάταξη του υδροσυστήματος, που περιλαμβάνει το ενοποιημένο δίκτυο των υδατορευμάτων, των κόμβων ζήτησης και των τεχνικών έργων απόληξης από επιφανειακά και υπόγεια νερά (ομάδες γεωτρήσεων) και μεταφοράς νερού (υδραγωγεία). Η διάταξη αυτή φαίνεται στο Σχήμα 6.6, όπου απεικονίζονται οι κόμβοι του δικτύου (με την αρίθμησή τους) και οι δυνατές διαδρομές του νερού, φυσικές (υδατορεύματα) και τεχνητές (υδραγωγεία).

Η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε αρδευόμενες ζώνες, που αναπαρίστανται ως κόμβοι αρδευτικής ζήτησης, και απεικονίζονται με ανοιχτό πράσινο χρώμα. Στο Νομό Καρδίτσας πραγματοποιήθηκε σχετικά λεπτομερής (σε επίπεδο ΤΟΕΒ) περιγραφή του διαχειριστικού συστήματος και σύνδεση των αρδευτικών κόμβων (Πλαστήρας, Ξυνονέρι, Αγιοπηγή, Μεσενικόλας, Παλαμάς, Σέλανα, Σοφάδες) με το δίκτυο των ανοιχτών αγωγών που μεταφέρουν το νερό από τον ταμιευτήρα Πλαστήρα. Στο Νομό Τρικάλων θεωρήθηκαν δύο κόμβοι απόληξης. Ο πρώτος περιλαμβάνει τις παραποτάμιες περιοχές, οι οποίες αναπτύσσονται πάνω από τα αντίστοιχα κύτταρα του υδροφορέα που γειτνιάζουν με τον Πηνειό και χρησιμοποιούν τόσο επιφανειακά όσο και υπόγεια νερά (κόμβος 22), ενώ ο δεύτερος (κόμβος 25) περιλαμβάνει τα πιο απομακρυσμένα κύτταρα, που εξυπηρετούνται αποκλειστικά από γεωτρήσεις. Τέλος, το μικρό τμήμα του υδροσυστήματος που εκτείνεται στο Νομό Φθιώτιδας, και περιλαμβάνει το οροπέδιο της Ξυνιάδας, θεωρήθηκε επίσης ως μεμονωμένος κόμβος (κόμβος 24), που εξυπηρετείται μόνο από γεωτρήσεις.



Σχήμα 6.6: Σχηματοποίηση λειτουργίας υδροσυστήματος, όπου απεικονίζονται τα υδατορεύματα (με κανονική γραμμή), τα υδραγωγεία (με διακεκομμένη γραμμή), οι κόμβοι (με την αρίθμησή τους) και οι ομάδες γεωτρήσεων (τετράγωνα).

Για όλους τους αρδευτικούς κόμβους ορίστηκαν οι αντίστοιχοι στόχοι, και οι σχετικές υδατικές ανάγκες διατυπώθηκαν με τη μορφή χρονοσειρών ζήτησης που μεταβάλλονται διαχρονικά. Επιπλέον, στον κόμβο 15 ορίστηκε ένας σταθερός στόχος κατανάλωσης, ίσος με 2.0 hm³/μήνα, που αντιστοιχεί στις υδρευτικές ανάγκες της πόλης της Καρδίτσας και των γύρω περιοχών.

Σε κάθε κύτταρο του υδροφορέα τοποθετήθηκε μια εικονική γεώτρηση, η δυναμικότητα της οποίας θεωρήθηκε ανάλογη της έκτασης του κυττάρου και της συνολικής ζήτησης κάθε αρδευτικού κόμβου. Στη συνέχεια, οι γεωτρήσεις ομαδοποιήθηκαν με βάση τον αντίστοιχο αρδευτικό κόμβο που εξυπηρετούν. Τα χαρακτηριστικά των ομάδων γεωτρήσεων δίνονται στον Πίνακα 6.7.

Πίνακας 6.7: Χαρακτηριστικά ομάδων γεωτρήσεων.

| α/α | Ομάδα γεωτρήσεων | Κατάντη κόμβος | Δυναμικότητα (m ³ /s) |
|-----|------------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Πλαστήρας | 23 | 2.2 |
| 2 | Ξυνονέρι | 16 | 0.5 |
| 3 | Μεσενικόλας | 17 | 0.2 |
| 4 | Σέλινα | 18 | 17.8 |
| 5 | Παλαμάς | 19 | 24.7 |
| 6 | Σοφάδες | 20 | 44.3 |
| 7 | Αγιοπηγή | 21 | 8.8 |
| 8 | Τρίκαλα | 22 | 94.0 |
| 9 | Φθιώτιδα | 24 | 19.9 |
| 10 | Τρίκαλα | 25 | 10.0 |

Τα χαρακτηριστικά των τεχνικών έργων που απαιτεί το μοντέλο είναι η παροχτευτικότητα και το μοναδιαίο κόστος. Για όλες τις γεωτρήσεις τέθηκε κοινή τιμή κόστους, ίση με 1. Όσον αφορά στα αρδευτικά υδραγωγεία, θεωρήθηκε μια μεγάλη τιμή παροχτευτικότητας (30 m³/s) και μηδενική τιμή μοναδιαίου κόστους, με εξαίρεση τα εικονικά υδραγωγεία που αναπαριστούν απευθείας απόληψη από το υδρογραφικό δίκτυο, για τα οποία θεωρήθηκε μια μικρή τιμή κόστους, ίση με 0.1, ώστε να εμποδίζεται η αδικαιολόγητη εκτροπή νερού και κυκλοφορία του στο αρδευτικό δίκτυο.

Η σχηματοποίηση που περιγράφεται παραπάνω αποτελεί προϊόν μιας διαδραστικής διαδικασίας, που έγινε σε συνδυασμό με τη βαθμονόμηση. Κατά τις προκαταρκτικές δοκιμές, διαπιστώθηκαν ορισμένα προβλήματα, που είχαν ως αποτέλεσμα την κακή αναπαραγωγή της παρατηρημένης απορροής στη θέση Αλή Εφέντη (κόμβος 12). Ειδικότερα, κατά τη χειμερινή περίοδο διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο υποεκτιμά την απορροή στο συγκεκριμένο κόμβο, ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο με τις υπόλοιπες θέσεις ελέγχου. Το γεγονός αυτό αποδόθηκε σε κάποιο συστηματικό σφάλμα, καθώς δεν ήταν δυνατό να βρεθεί συνδυασμός παραμέτρων που να μπορεί να αναπαράξει τις μετρήσεις παροχής των χειμερινών μηνών, χωρίς να διαταράξει την παρατηρημένη διαίτα της απορροής των υπόλοιπων εποχών του έτους και των υπόλοιπων θέσεων ελέγχου. Μετά από διερεύνηση, προέκυψε ότι το πρόβλημα οφείλεται στον τρόπο διαχείρισης των εκροών από τον ταμιευτήρα Πλαστήρα. Τους θερινούς μήνες, οι εκροές διοχετεύονται, μέσω της αναρρυθμιστικής δεξαμενής (κόμβος 15), προς τις διάφορες αρδευόμενες περιοχές. Αντίθετα, οι χειμερινές εκροές διοχετεύονται αποκλειστικά στον Καλέτζη, και μέσω αυτού στον Πηνεϊό, ανάντη του Αλή Εφέντη. Η ιδιαιτερότητα αυτή αντιμετωπίστηκε με την εισαγωγή του κλάδου 18-3, που μεταφέρει νερό από τον αρδευτικό κόμβο Σελάνων στον Πηνεϊό, με ένα πολύ μικρό αρνητικό κόστος. Συνεπώς, κατά τους χειμερινούς μήνες, το μοντέλο κατανομής των απολήψεων επιλέγει τη συγκεκριμένη διαδρομή ως τη βέλτιστη από πλευράς κόστους, ενώ κατά τη θερινή περίοδο επιλέγει κατά προτεραιότητα την κάλυψη των αρδευτικών στόχων, για τους οποίους το μοντέλο θέτει ένα εικονικό αρνητικό όφελος, η τιμή του οποίου υπερβαίνει (κατ' απόλυτη τιμή) το αθροιστικό κόστος/όφελος μεταφοράς του νερού στο δίκτυο.

Μια άλλη ιδιαιτερότητα, που επίσης εντοπίστηκε εκ των υστέρων (λόγω της αδυναμίας του μοντέλου να αναπαράξει ορισμένες ιδιαίτερα υψηλές αιχμές), αφορά στη διαχείριση των πλημμυρών του Ενιπέα. Ο Ενιπέας συναντιέται με τον Πηνειό στην έξοδο του υδροσυστήματος (κόμβος 2), λίγες δεκάδες μέτρα κατάντη της γέφυρας του Αλή Εφέντη, όπου βρίσκεται ο ομώνυμος υδρομετρικός σταθμός (κόμβος 12). Στα τελευταία μέτρα της διαδρομής του υπάρχουν αποστραγγιστικές τάφροι κάθετα στη διατομή του, έτσι ώστε στην περίπτωση που αυτός πλημμυρίσει, η επιπλέον παροχή να διοχετευτεί όχι πλέον κατάντη αλλά λίγο ανάντη του υδρομετρικού σταθμού. Συνεπώς, στην τελική χάραξη του υδροσυστήματος, η έξοδος του Ενιπέα θεωρήθηκε ξεχωριστός κόμβος (κόμβος 26), κατάντη του οποίου δημιουργήθηκαν δύο διαδρομές, με την πρώτη να αναπαριστά τη φυσική κοίτη και τη δεύτερη το σύνολο των αποστραγγιστικών τάφρων, που καταλήγουν στον κόμβο Αλή Εφέντη. Για τη φυσική κοίτη (αγωγός 26-2) θεωρήθηκε παροχευτικότητα ίση με $10 \text{ m}^3/\text{s}$ και μηδενικό μοναδιαίο κόστος, ενώ για την πλημμυρική κοίτη (αγωγός 26-12) θεωρήθηκε μια μεγάλη τιμή παροχευτικότητας ($1000 \text{ m}^3/\text{s}$) και μια μικρή τιμή μοναδιαίου κόστους. Με τον τρόπο αυτό, σε συνήθειες συνθήκες, τα νερά του Ενιπέα οδηγούνται στην έξοδο του συστήματος, δηλαδή κατάντη του Αλή Εφέντη, ενώ στην περίπτωση που η παροχή του ποταμού υπερβεί την τιμή των $10 \text{ m}^3/\text{s}$, η περίσσεια διοχετεύεται ανάντη του Αλή Εφέντη, και συνεπώς προσμετράται στην απορροή του.

6.4 Εκτίμηση παραμέτρων μοντέλου

6.4.1 Παράμετροι και δεδομένα ελέγχου

Η προσαρμογή του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ έγινε για 20 υδρολογικά έτη, από τον Οκτώβριο του 1972 μέχρι το Σεπτέμβριο του 1993. Πρόκειται για ένα αντιπροσωπευτικό ιστορικό δείγμα της λεκάνης, καθώς περιλαμβάνει αλληλουχία υγρών και ξηρών υδρολογικών περιόδων. Επίσης, στη συγκεκριμένη περίοδο αποτυπώνεται μια μεγάλη αυξητική τάση της αρδευτικής ζήτησης και των υπόγειων απολήψεων, που είχε ως συνέπεια τη σημαντική ταπείνωση της στάθμης του υδροφορέα σε μεγάλα τμήματα της πεδινής περιοχής. Ο χρονικός ορίζοντας ελέγχου χωρίστηκε σε δύο ίσες χρονικές ενότητες, που αναφέρονται στις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης.

Για τη δεδομένη σχηματοποίηση, το μοντέλο περιλαμβάνει 164 μεταβλητές προς βελτιστοποίηση, που αναφέρονται:

- στις $6 \times 9 = 54$ παραμέτρους του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας (6 για κάθε μία από τις 9 μονάδες υδρολογικής απόκρισης)·
- στους 12 συντελεστές διήθησης των υδατορευμάτων·
- στις $2 \times 49 = 98$ παραμέτρους του μοντέλου υπόγειας υδρολογίας (υδραυλική αγωγιμότητα και πορώδες κυττάρων).

Για την απλοποίηση του προβλήματος, θεωρήθηκαν ενιαία η χωρητικότητα κατακράτησης και το πορώδες. Όσον αφορά στους συντελεστές διήθησης, θεωρήθηκαν τέσσερις από αυτούς μη μηδενικοί, στον Πηνειό (στο τμήμα ανάντη του Αλή Εφέντη), τον Ενιπέα και τον Σοφαδίτη, στα δύο τμήματα ανάντη της συμβολής με τον Φαρσαλιώτη (η επιλογή έγινε με βάση τις εκτιμήσεις της SOGREAH). Συνεπώς, ο τελικός αριθμός των μεταβλητών ελέγχου ήταν της τάξης των 100.

Η διαδικασία αναζήτησης στα πλαίσια του αλγορίθμου βελτιστοποίησης προϋποθέτει τον ορισμό ενός επιτρεπόμενου εύρους διακύμανσης των τιμών των μεταβλητών ελέγχου. Αρχικά, ο καθορισμός τους βασίστηκε στη φυσική ερμηνεία των παραμέτρων. Ωστόσο, κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης, τα όρια αυτά μεταβλήθηκαν πολλές φορές, με σκοπό την όσο το δυνατό καλύτερη διερεύνηση του χώρου αναζήτησης για την εύρεση της ολικά βέλτιστης λύσης.

Για το έλεγχο της προσαρμογής του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν 16 δείγματα μετρημένων τιμών. Πρόκειται για τις μέσες μηνιαίες παροχές των υδρομετρικών σταθμών Αλή Εφέντη, Κέδρου, Μουζακίου, Αμπελιάς και Σαρακήνας, καθώς και στις παρατηρήσεις στάθμης σε 11 γεωτρήσεις που εκτείνονται σε όλη την πεδινή περιοχή μελέτης. Τα περισσότερα δείγματα δεν καλύπτουν όλη την περίοδο ελέγχου. Για παράδειγμα, στον σταθμό του Κέδρου υπάρχουν μετρήσεις μόνο στη περίοδο της βαθμονόμησης, ενώ στο Μουζάκι μόνο την περίοδο της επαλήθευσης.

Στις αποκρίσεις του μοντέλου περιλαμβάνονται οι εκροές των τριών πηγών του υδροσυστήματος. Σύμφωνα με μελέτη του ΙΓΜΕ, η μέση μηνιαία παροχή των πηγών Κεφαλόβρυσου είναι της τάξης των $2 \text{ m}^3/\text{s}$, ωστόσο εξαιτίας της συνεχούς ταπείνωσης της στάθμης που παρατηρείται στην περιοχή, η υδροφορία τους διακόπηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1980. Όσον αφορά στις πηγές Μουργκακίου και Προδρόμου-Γοργυρίου, δεν υπάρχουν στοιχεία παροχής.

6.4.2 Διαμόρφωση στοχικής συνάρτησης

Για την επιτυχή αναπαράσταση ενός τόσο σύνθετου υδροσυστήματος, όπως της Δυτικής Θεσσαλίας, που περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό παραμέτρων, απαιτείται η χρήση πολλαπλών κριτηρίων ελέγχου, που αναφέρονται σε διάφορες αποκρίσεις του μοντέλου. Το πρόγραμμα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ παρέχει ένα ευρύ φάσμα μέτρων προσαρμογής, που αξιοποιήθηκαν στο σύνολό τους στα πλαίσια της συγκεκριμένης εφαρμογής. Συγκεκριμένα, διαμορφώθηκε μια σύνθετη στοχική συνάρτηση, που περιλαμβάνει τις ακόλουθες συνιστώσες:

- την αποτελεσματικότητα (συντελεστές Nash-Suttcliffe) των χρονοσειρών μέσης μηνιαίας παροχής στις 5 θέσεις μέτρησης κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου (Αλή Εφέντη, Μουζάκι, Κέδρος, Αμπελιά, Σαρακήνα)
- τη μεροληψία αναπαραγωγής της δειγματικής μέσης τιμής, στις παραπάνω θέσεις
- τη μεροληψία αναπαραγωγής της εκτιμημένης μέσης τιμής στις πηγές Κεφαλόβρυσου
- την αποτελεσματικότητα των χρονοσειρών στάθμης στις 11 γεωτρήσεις που εκτείνονται στο πεδινό τμήμα του υδροφορέα
- μέτρα ποινής για την εμφάνιση τάσης στα υπόγεια κύτταρα, για τα οποία δεν υπάρχουν μετρήσεις.

Τα παραπάνω σταθμίστηκαν σε μια ενιαία αριθμητική έκφραση, χρησιμοποιώντας κατάλληλους συντελεστές βάρους, που τέθηκαν με τρόπο ώστε να δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην αναπαραγωγή των παροχών, που είναι και το πρωτεύον μέτρο ελέγχου της προγνωστικής αξιοπιστίας του μοντέλου. Οι συντελεστές διαφοροποιήθηκαν κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης, μέχρι να βρεθούν τιμές που εξασφαλίζουν το επιθυμητό αποτέλεσμα για τα διάφορα κριτήρια.

6.4.3 Περιγραφή της διαδικασίας βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε σταδιακά, με συνδυασμό των αυτομάτων υπολογιστικών εργαλείων που παρέχει το πρόγραμμα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ και της ανθρώπινης κρίσης. Στόχος ήταν η επίτευξη καλής προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου, η οποία εξασφαλίζεται όχι μόνο από ένα καλό αποτέλεσμα του μέτρου επίδοσης για την περίοδο βαθμονόμησης αλλά και για την περίοδο επαλήθευσης, ταυτόχρονα με εύλογες τιμές παραμέτρων, που είναι συμβατές με την εννοιολογική τους ερμηνεία.

Εξαιτίας της μεγάλης διάστασης του πεδίου αναζήτησης, ήταν πρακτικά αδύνατη η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του συνόλου των παραμέτρων, καθώς για τον δεδομένο πληθυσμό αναζήτησης, ο αλγόριθμος εγκλωβιζόταν γρήγορα σε τοπικά ακρότατα. Από την άλλη πλευρά, αν χρησιμοποιούσαμε μεγαλύτερο μέγεθος πληθυσμού, θα απαιτούνταν τάξεις μεγέθους περισσότερες δοκιμές, κάτι που συνεπάγεται απαράδεκτα υψηλό υπολογιστικό φόρτο. Για το λόγο αυτό, η βελτιστοποίηση έγινε σε στάδια, ως εξής:

Αρχικά, εκτιμήθηκαν οι παράμετροι του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας, με έμφαση σε αυτές που επηρεάζουν σημαντικά την επιφανειακή απορροή, ώστε να επιτευχθεί μια λύση τέτοια που να προσαρμόζεται ικανοποιητικά στα πέντε ιστορικά υδρογραφήματα, με έμφαση στο υδρογράφημα του υδρομετρικού σταθμού Αλή Εφέντη, που ελέγχει το μεγαλύτερο μέρος των επιφανειακών υδατικών πόρων του υδροσυστήματος. Όπως εξηγείται στο εδάφιο 6.3.5, η διαδικασία της βαθμονόμησης συνέβαλε και στην καλύτερη κατανόηση του συστήματος, καθώς βοήθησε στον εντοπισμό ορισμένων σφαλμάτων στη σχηματοποίηση, που αφορούν στη διαχείριση των χειμερινών εκροών του ταμιευτήρα Πλαστήρα και την αναπαράσταση της λειτουργίας του κατάντη τμήματος του Ενιπέα, στην περίπτωση που πραγματοποιούνται πλημμύρες.

Στη συνέχεια, με γνωστές, πλέον, τις παραμέτρους του επιφανειακού μοντέλου που καθορίζουν τις φορτίσεις των υπόγειων δεξαμενών (κατείσδυση, διήθηση, άντληση), εκτιμήθηκαν οι παράμετροι υδραυλικής αγωγιμότητας και η παράμετρος που αντιστοιχεί στο ενιαίο πορώδες του υπόγειου συστήματος, με στόχο την αναπαραγωγή των παρατηρημένων χρονοσειρών στάθμης. Στα τελευταία περίπτωση, ο έλεγχος της πιεζομετρίας ήταν λιγότερο αυστηρός, δεδομένης της πολυπλοκότητας του συστήματος αλλά και της αδρομερούς προσέγγισης που υιοθετήθηκε και αφορά στην ταύτιση των τοπικών παρατηρήσεων στάθμης με την μεταβλητή του μοντέλου που αναφέρεται στα κύτταρα. Επισημαίνεται ότι το υπόγειο σύστημα, όπως σχηματοποιήθηκε, έχει μια φυσική ιδιομορφία λόγω της κυκλοειδούς μορφής του, και η διαδικασία της βαθμονόμησης έγινε κατά περιοχή, επιλέγοντας τις σχετικές παραμέτρους υδραυλικής αγωγιμότητας και μεταβάλλοντας, κάποιες φορές, τις αρχικές στάθμες των δεξαμενών, ώστε να εξασφαλιστεί ροή συμβατή με την παρατηρημένη πιεζομετρία.

Εκτός των παρατηρήσεων στάθμης, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ελαχιστοποίηση των μέτρων ποινής, που αναφέρονται στην εμφάνιση τάσης όσον αφορά στη στάθμη των υπόγειων δεξαμενών. Ιδιαίτερα στα περιμετρικά κύτταρα, που αναπαριστούν την κατείσδυση στους ορεινούς και ημιορεινούς όγκους, το μοντέλο προσπαθούσε να συγκεντρώσει νερά, προκειμένου να προσαρμοστεί στις παρατηρημένες στάθμες της πεδινής ζώνης. Μέρος του προβλήματος αποδόθηκε στην απουσία πηγών στο μοντέλο, που θα αναρρύθμιζαν την κατείσδυση στα ανάντη τμήματα της λεκάνης. Μετά από επίσκεψη στο νομό Τρικάλων, εντοπίστηκαν οι πηγές Προδρόμου-Γοργυρίου, οι οποίες δεν αναφέρονταν σε προηγούμενες τεχνικές μελέτες και συμπεριλήφθηκαν στο υδροσύστημα. Η προσθήκη των πηγών, σε συνδυασμό με τη θέσπιση των ποινών τάσης, παρόλο που δυσκόλεψε τη διαδικασία βαθμονόμησης, βοήθησε στην επίτευξη μιας εύλογης δίαιτας των υπόγειων νερών.

6.4.4 Βελτιστοποιημένες παράμετροι

Στο Πίνακα 6.8 δίνονται οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας, που διαφοροποιούνται για κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ). Επιχειρώντας να δώσουμε μια φυσική ερμηνεία των τιμών αυτών, μπορούμε να πούμε τα εξής:

- Η μεγαλύτερη σε έκταση ΜΥΑ που είναι η 7 (ημιπερατά πετρώματα- αρδευόμενες εκτάσεις) έχει μικρό συντελεστή άμεσης απορροής, μικρή δεξαμενή εδαφικής υγρασίας και μικρή τιμή συντελεστή στείρευσης της κατείσδυσης. Η πλημμυρική ροή λόγω κορεσμού φαίνεται ότι είναι η κυρίαρχη συνιστώσα της απορροής. Παρά τις μικρές κλίσεις των αρδευόμενων πεδινών εκτάσεων, που θα είχαν ως συνέπεια τη συγκέντρωση της απορροής, άρα τη διαμόρφωση μεγάλων δεξαμενών αποθήκευσης υγρασίας, παρατηρείται το ακριβώς αντίθετο. Μια ερμηνεία που μπορεί να δοθεί είναι η επίδραση του αποστραγγιστικού δικτύου, που κατά τη διάρκεια ισχυρών επεισοδίων βροχής λειτουργεί, στην πράξη, ως αντιπλημμυρικό έργο.
- Τα αδιαπέρατα πετρώματα (ΜΥΑ 1, 2, 3) παρουσιάζουν μικρούς συντελεστές άμεσης απορροής και μικρούς συντελεστές στείρευσης κατείσδυσης, που είναι φυσικό λόγω της ιδιομορφίας των πετρωμάτων αυτών.

- Οι δασικές εκτάσεις (ΜΥΑ 3, 6, 9) χαρακτηρίζονται από μεγάλες χωρητικότητες δεξαμενών εδαφικής υγρασίας, που αιτιολογείται από την αυξημένη δυνατότητα κατακράτησης νερού.
- Τα περατά πετρώματα (ΜΥΑ 4, 5, 6) εμφανίζουν μεγάλους συντελεστές στείρευσης κατείσδυσης.

Οι βέλτιστες τιμές των συντελεστών διήθησης ήταν 7.9% στον Πηνειό, 5.0% στον Ενιπέα, 8.7% στον ανάντη κλάδο του Σοφαδίτη και 11.4% στον κατάντη κλάδο του, πριν τη συμβολή του με τον Φαρσαλιώτη. Πρόκειται για σημαντικές απώλειες νερού, που επιβεβαιώνουν τις εμπειρικές εκτιμήσεις της SOGREAH (1978).

Πίνακας 6.8: Βέλτιστες τιμές παραμέτρων μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας.

| ΜΥΑ | Συντελεστής άμεσης απορροής | Χωρητικότητα εδαφικής υγρασίας (mm) | Κατώφλι παραγωγής υποδερμικής ροής | Συντελεστής στείρευσης υποδερμικής ροής | Συντελεστής στείρευσης κατείσδυσης |
|-----|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---|------------------------------------|
| 1 | 0.034 | 700.0 | 0.837 | 0.470 | 0.308 |
| 2 | 0.013 | 789.2 | 0.128 | 0.117 | 0.082 |
| 3 | 0.048 | 428.8 | 0.213 | 0.335 | 0.106 |
| 4 | 0.405 | 796.0 | 0.562 | 0.531 | 0.418 |
| 5 | 0.200 | 322.9 | 0.350 | 0.538 | 0.254 |
| 6 | 0.029 | 713.8 | 0.655 | 0.441 | 0.500 |
| 7 | 0.034 | 289.0 | 0.318 | 0.373 | 0.060 |
| 8 | 0.072 | 602.7 | 0.448 | 0.633 | 0.033 |
| 9 | 0.107 | 838.2 | 0.636 | 0.680 | 0.370 |

Όσον αφορά στις παραμέτρους του μοντέλου υπόγειας υδρολογίας, αναφέρονται στο πορώδες του υδροφορέα (ενιαίο για όλη τη λεκάνη) και την υδραυλική αγωγιμότητα των κυττάρων του. Η βέλτιστη τιμή του πορώδους προέκυψε ίση με 13.7%, που είναι αρκετά υψηλή, υποδηλώνοντας ότι μεγάλες μεταβολές της στάθμης αντιστοιχούν σε μεγάλες μεταβολές των αποθεμάτων. Οι υψηλές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, και συνεπώς ταχύτητες ροής των υπόγειων νερών, εμφανίζονται στα ανάντη του υδροφορέα (περιοχή Τρικάλων), καθώς και στα κατάντη κύτταρα, κοντά στην έξοδο του υδροσυστήματος. Αντίθετα, μικρές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας εμφανίζονται στην υπόλοιπη περιοχή (Καρδίτσα, Φθιώτιδα), όπου και μειώνονται οι ταχύτητες υπόγειας ροής σε σύγκριση με τη βόρεια περιοχή. Αυτό είναι συμβατό με τις παρατηρήσεις των υδρογεωλόγων, όπως φαίνεται και από το πιεζομετρικό χάρτη του Σχήματος 6.5, αριστερά.

Αν και, λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος (αβεβαιότητες σχηματοποίησης, αδρή περιγραφή διεργασιών, σφάλματα μετρήσεων), δεν είναι δυνατό να δοθεί πλήρης ερμηνεία για κάθε παράμετρο του μοντέλου, φαίνεται γενικά να υπάρχει συμβατότητα των βελτιστοποιημένων τιμών με τα γενικά χαρακτηριστικά της λεκάνης. Το γεγονός αυτό τεκμηριώνει τις αρχές ανάπτυξης του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, δηλαδή την εξασφάλιση φυσικής συνέπειας με ταυτόχρονη διατήρηση μιας φειδωλής παραμετροποίησης.

6.4.5 Βελτιστοποιημένες χρονοσειρές απόκρισης

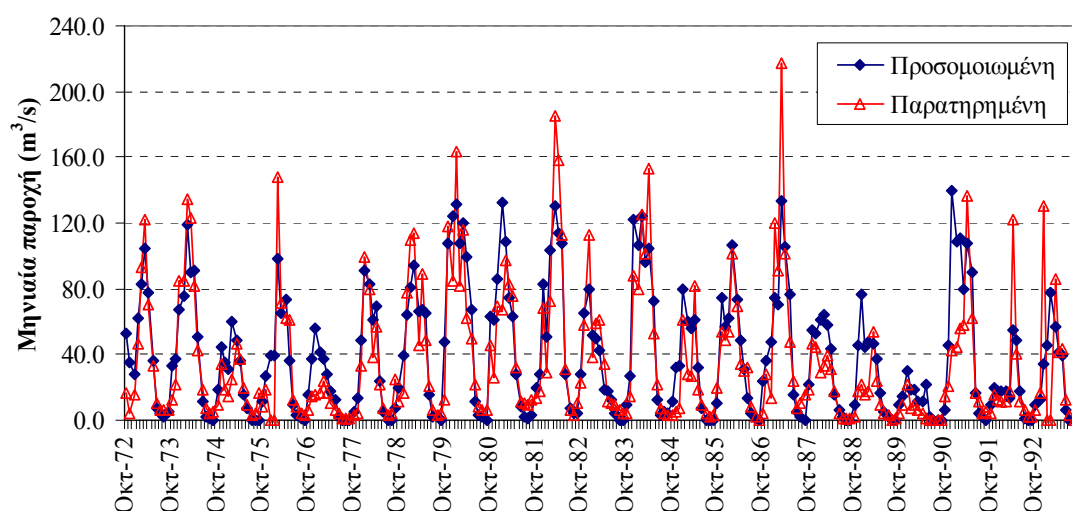
Οι χρονοσειρές απόκρισης, βάσει των οποίων γίνεται ο έλεγχος της προσαρμογής του μοντέλου, αναφέρονται στις παροχές κατάντη των πέντε υδρομετρικών σταθμών, στην παροχή των πηγών Κεφαλόβρυσου και τη στάθμη 11 κυττάρων. Στον Πίνακα 6.9 δίνονται τα αποτελέσματα για τα πέντε υδρογραφήματα, όσον αφορά στο κριτήριο αποτελεσματικότητας, για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης, ενώ η γραφική σύγκριση των παρατηρημένων και προσομοιωμένων τιμών γίνεται στα Σχήματα 6.7 έως 6.11.

Πίνακας 6.9: Βέλτιστες τιμές αποτελεσματικότητας για τα υδρογραφήματα στις πέντε θέσεις ελέγχου.

| Θέση ελέγχου | Περίοδος βαθμονόμησης | Περίοδος επαλήθευσης |
|--------------|-----------------------|----------------------|
| Αλή Εφέντη | 0.810 | 0.612 |
| Σαρακίνα | 0.374 | 0.839 |
| Μουζάκι | – | 0.577 |
| Αμπελιά | 0.385 | 0.241 |
| Κέδρος | 0.687 | – |

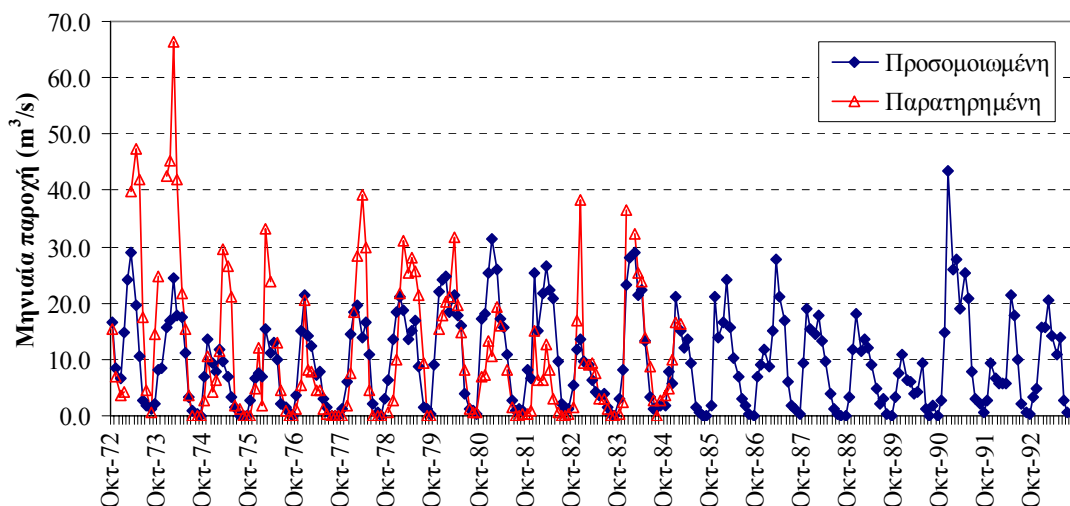
Επιχειρώντας μια συνολική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που αφορούν στην αναπαραγωγή των παρατηρημένων χρονοσειρών παροχής μπορούμε να πούμε τα εξής:

- Το μοντέλο αναπαράγει με αρκετά μεγάλη ακρίβεια το υδρογράφημα στη θέση του υδρομετρικού σταθμού Αλή Εφέντη στον Πηνειό (Σχήμα 6.7), κάτι που αποτέλεσε τον πρωτεύοντα στόχο της βαθμονόμησης. Αυτό τεκμηριώνεται από την υψηλή τιμή του δείκτη αποτελεσματικότητας κατά την περίοδο βαθμονόμησης (81.0%) και την αρκετά ικανοποιητική τιμή του κατά την περίοδο επαλήθευσης (61.2%). Υπενθυμίζεται ότι η θέση αυτή βρίσκεται πολύ κοντά στην έξοδο του υδροσυστήματος, και συνεπώς επηρεάζεται σημαντικά από την εξωτερική προσφορά νερού που προέρχεται από τις εκροές του ταμιευτήρα Πλαστήρα, τις απολήψεις που πραγματοποιούνται κατά τη θερινή περίοδο και τη δίαιτα των πλημμυρών του Ενιπέα.



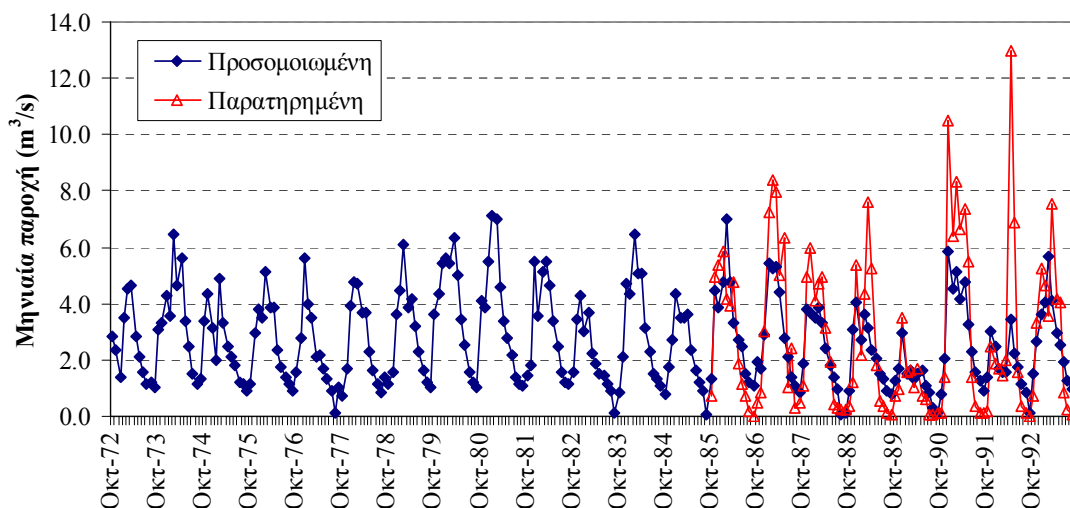
Σχήμα 6.7: Παρατηρημένη και προσομοιωμένη μέση μηνιαία παροχή στη θέση Αλή Εφέντη.

- Η αναπαραγωγή των παρατηρημένων παροχών στη Σαρακίνα χαρακτηρίζεται μέτρια, όπως φαίνεται από τη χαμηλή τιμή του μέτρου αποτελεσματικότητας κατά την περίοδο βαθμονόμησης, που φτάνει στο 37.4%. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 6.8, οι πλέον έντονες αποκλίσεις εμφανίζονται την εαρινή περίοδο των ετών 1972, 1973, 1974, 1975 και 1977, που αιτιολογείται όχι μόνο από τη μειωμένη αξιοπιστία των μετρήσεων του σταθμού αλλά και από το γεγονός ότι στην εκτίμηση των κατακρημνίσεων δεν έχει ληφθεί υπόψη η συνεισφορά της τήξης του χιονιού. Όσον αφορά στην επαλήθευση, η αποτελεσματικότητα του μοντέλου φτάνει στα υψηλά επίπεδα του 83.9%, ωστόσο το μήκος της δείγματος είναι σχετικά μικρό (Οκτώβριος 1982-Φεβρουάριος 1985). Επισημαίνεται ότι, παρά τα προβλήματα που εμφανίζει, ο συγκεκριμένος σταθμός συμπεριλήφθηκε στη σχηματοποίηση γιατί ελέγχει την ανάντη ορεινή λεκάνη του Πηνειού, που είναι πρακτικά αδιατάρακτη από ανθρωπογενείς επεμβάσεις.



Σχήμα 6.8: Παρατηρημένη και προσομοιωμένη μέση μηνιαία παροχή στη θέση Σαρακίνα.

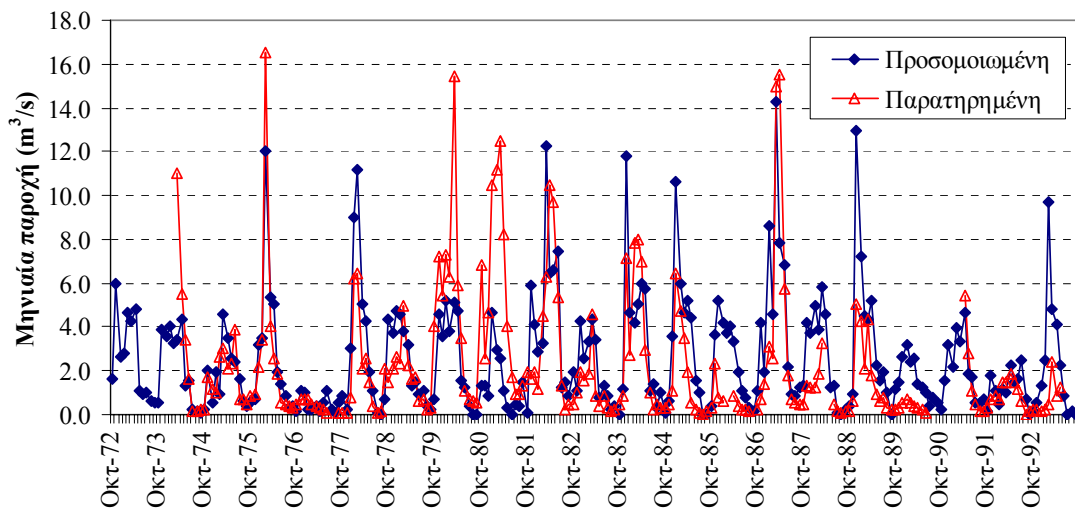
- Ο έλεγχος της προσαρμογής του μοντέλου στη θέση Μουζάκι του Παμίσου (Σχήμα 6.9) αναφέρεται αποκλειστικά στην περίοδο επαλήθευσης, και συνεπώς δεν «κατευθύνεται» από τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Για το λόγο αυτό, πρόκειται για μια σημαντική πληροφορία, που αποτελεί τεκμήριο της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου. Για την εν λόγω περίοδο, η τιμή του δείκτη αποτελεσματικότητας φτάνει στο 57.7%, και χαρακτηρίζεται σχετικά ικανοποιητική. Μάλιστα, η τιμή του δείκτη επηρεάζεται δραστικά από την αδυναμία αναπαραγωγής των έντονων αιχμών της εαρινής περιόδου των ετών 1990 και 1991 (κυρίως), που, όπως και στην περίπτωση της Σαρακίνας, μπορεί να αποδοθεί στη συνεισφορά του χιονιού, η οποία δεν έχει ληφθεί υπόψη στο μοντέλο, χωρίς να αποκλείεται να πρόκειται για κάποιο σφάλμα στα δεδομένα (στον Αλή Εφέντη, δεν παρατηρούνται αντίστοιχα έντονες αιχμές).



Σχήμα 6.9: Παρατηρημένη και προσομοιωμένη μέση μηνιαία παροχή στη θέση Μουζάκι.

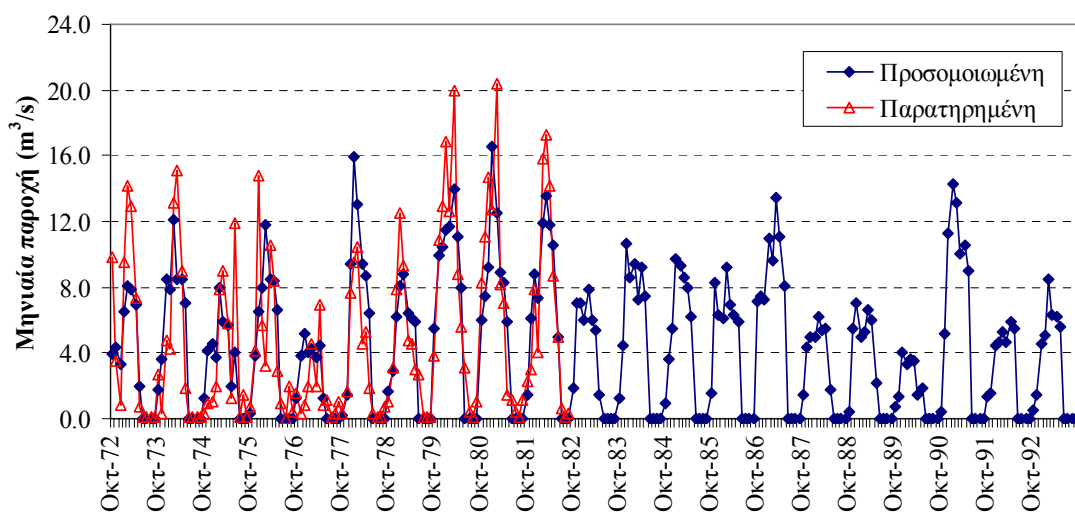
- Η προσαρμογή του μοντέλου στη θέση Αμπελιά του Ενιπέα (Σχήμα 6.10) αποτέλεσε εξαρχής μία από τις πλέον δύσκολες συνιστώσες της διαδικασίας βαθμονόμησης, εξαιτίας των πολλαπλών σφαλμάτων που χαρακτηρίζουν τα πρωτογενή δείγματα στα οποία στηρίχθηκε η κατάρτιση της παρατηρημένης χρονοσειράς μέσης μηνιαίας παροχής. Εύλογα λοιπόν προέκυψαν οι αρκετά

χαμηλές τιμές του δείκτη αποτελεσματικότητας, τόσο κατά την περίοδο βαθμονόμησης (38.5%) όσο και κατά την περίοδο επαλήθευσης (28.1%).



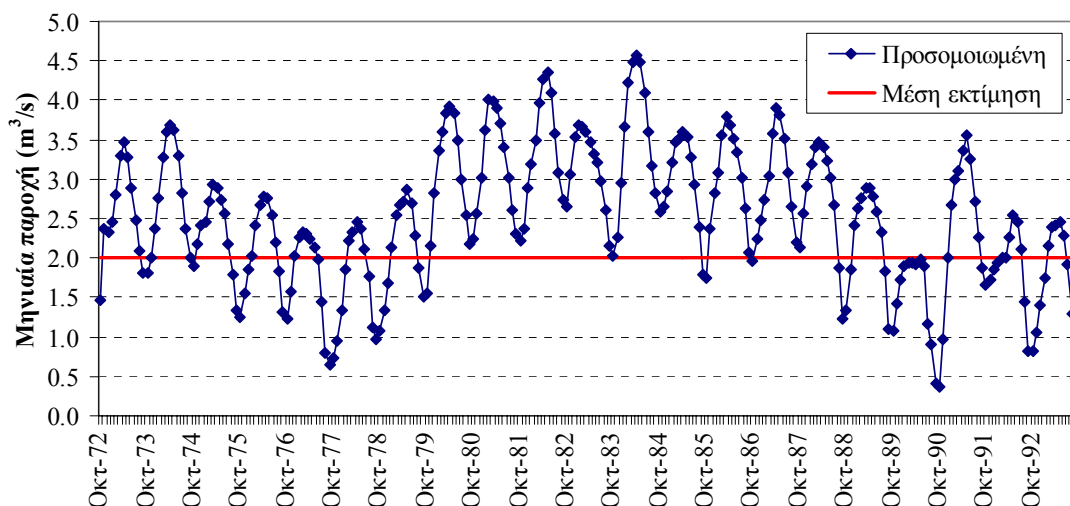
Σχήμα 6.10: Παρατηρημένη και προσομοιωμένη μέση μηνιαία παροχή στη θέση Αμπελιά.

- Τέλος, η προσαρμογή του μοντέλου στη θέση Κέδρος του Σοφαδίτη (Σχήμα 6.11) κρίνεται αρκετά καλή για την περίοδο βαθμονόμησης, με τον μέτρο αποτελεσματικότητας να φτάνει στα επίπεδα του 68.7%. Για την περίοδο επαλήθευσης δεν υπάρχουν μετρήσεις, καθώς στο διάστημα εκείνο κατασκευαζόταν το φράγμα Σμοκόβου, λίγο ανάντη του υδρομετρικού σταθμού.



Σχήμα 6.11: Παρατηρημένη και προσομοιωμένη μέση μηνιαία παροχή στη θέση Κέδρος.

Μια άλλη συνιστώσα ελέγχου του μοντέλου αναφέρεται στην αναπαραγωγή μιας μέσης εκτίμησης της παροχής των πηγών Κεφαλόβρυσου, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν υδρομετρικά στοιχεία που να επιτρέπουν την κατάρτιση πλήρων χρονοσειρών. Η μέση προσομοιωμένη τιμή ανέρχεται σε $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$, και είναι απόλυτα συνεπής με τη χονδροειδή εκτίμηση του ΙΓΜΕ, που αναφέρει τιμή της τάξης των $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$. Επιπλέον, όπως διακρίνουμε στο Σχήμα 6.12, εμφανίζεται μια σαφής τάση μείωσης της παροχής στο τέλος της περιόδου επαλήθευσης, στοιχείο το οποίο επιβεβαιώνεται στη μελέτη του ΙΓΜΕ, όπου αναφέρεται ότι οι πηγές στερεύουν προς τα τέλη της δεκαετίας του 1980.



Σχήμα 6.12: Μέση εκτίμηση και προσομοιωμένη μέση μηνιαία παροχή πηγών Κεφαλόβρυσου.

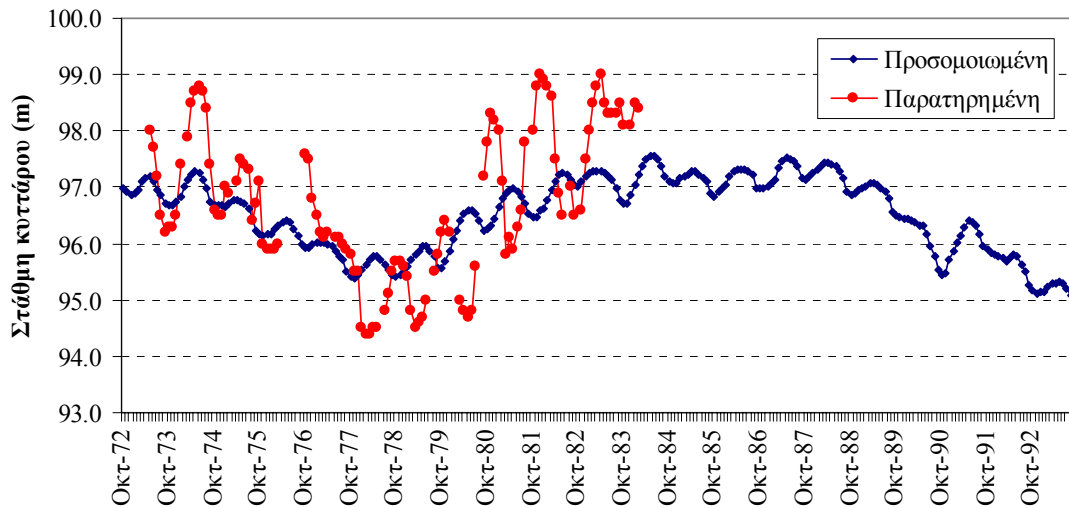
Η τελευταία κατηγορία δεδομένων ελέγχου αφορά στις χρονοσειρές στάθμης των 11 κυττάρων της πεδινής περιοχής, οι τιμές των οποίων θεωρείται ότι αντιπροσωπεύονται από τις παρατηρήσεις στις αντίστοιχες γεωτρήσεις. Βεβαίως, κάτι τέτοιο δεν είναι απόλυτα σωστό, δεδομένου ότι μια γεώτρηση καταγράφει τη διαίτα του υδροφορέα σε μικρή χωρική κλίμακα, αρκετά μικρότερη από την τυπική έκταση των κυττάρων. Κατά συνέπεια, ζητούμενο της βαθμονόμησης είναι όχι τόσο η ακριβής προσαρμογή των αποκρίσεων του μοντέλου στα ιστορικά δείγματα αλλά η αναπαραγωγή των γενικών χαρακτηριστικών της διαίτας του υδροφορέα για την περίοδο ελέγχου, όπως αυτή αποτυπώνεται από τις ιστορικές παρατηρήσεις στάθμης.

Στα Σχήματα 6.13 έως 6.16 παρουσιάζονται τέσσερα αντιπροσωπευτικά διαγράμματα, στα οποία συγκρίνονται οι προσομοιωμένες και παρατηρημένες στάθμες αντίστοιχων κυττάρων, που εκτείνονται σε διαφορετικές περιοχές του υδροφορέα. Γενικά, το μοντέλο παρακολουθεί με ικανοποιητική ακρίβεια τη διαίτα του υδροφορέα, παρόλο που δεν επιτυγχάνει αντίστοιχα μεγάλη διακύμανση στις στάθμες. Αυτό βεβαίως οφείλεται στη διαφορετική χωρική κλίμακα της μέτρησης σε σχέση με την μεταβλητή του μοντέλου.

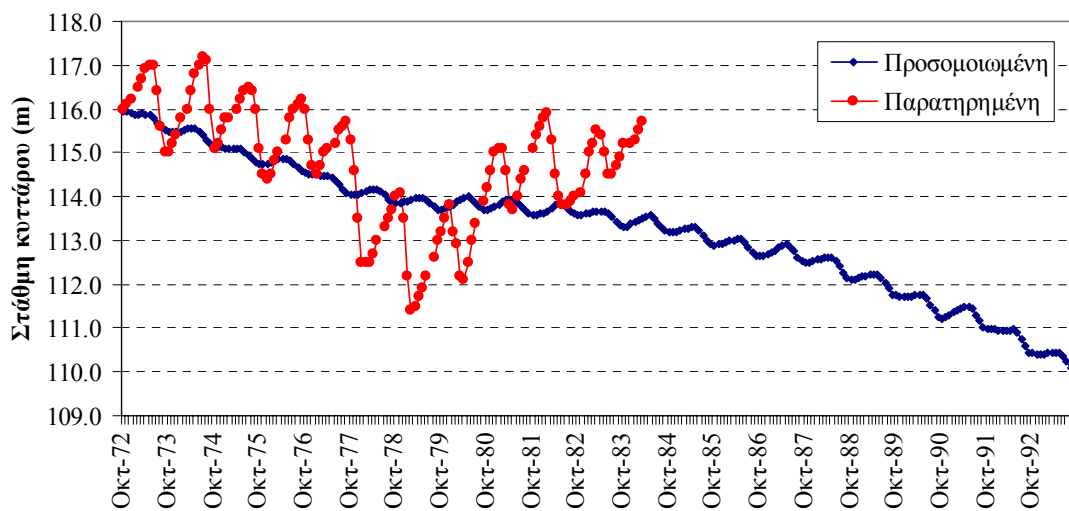
Οι μετρήσεις στάθμης καλύπτουν σχεδόν όλη την περίοδο βαθμονόμησης, και πολύ μικρό μέρος της περιόδου επαλήθευσης. Στα μέσα της δεκαετίας του 1970 παρατηρείται μια σημαντική ταπείνωση της πιεζομετρίας, την οποία ακολουθεί μια εξίσου σημαντική ανάκαμψη. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στην αλληλουχία ξηρών και υγρών ετών, και αναπαρίσταται επαρκώς από το μοντέλο. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1980, και μέχρι το πέρας της περιόδου ελέγχου (Σεπτέμβριος 1994), οπότε δεν υπάρχουν πιεζομετρικές παρατηρήσεις, το μοντέλο δείχνει μια συστηματική πτώση στάθμης για το σύνολο των κυττάρων, που σε ορισμένες περιπτώσεις (κυρίως στην περιοχή των Σοφάδων) ξεπερνά τα επίπεδα των 10 m. Μια τέτοια συστηματική πτώση θα πρέπει να αποδοθεί όχι μόνο στις κλιματικές συνθήκες (έμμονη ξηρασία ετών 1988-1994) αλλά και στη σημαντική αύξηση των αρδευτικών αντλήσεων. Επισημαίνεται ότι στην περιοχή αυτή υπάρχουν οι μεγαλύτερες αρδευτικές ανάγκες, που σε συνδυασμό με την απουσία έργων αξιοποίησης των επιφανειακών νερών (τουλάχιστον μέχρι πρόσφατα, οπότε κατασκευάστηκε ο ταμιευτήρας Σμοκόβου) έχει οδηγήσει στην υπερεκμετάλλευση του υδροφορέα, προκαλώντας σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι η προσαρμογή του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ για την εικοσαετία ελέγχου είναι πολύ ικανοποιητική, δεδομένου ότι γίνεται απόπειρα αναπαραγωγής ενός μεγάλου αριθμού μεταβλητών απόκρισης, με βάση δείγματα παρατηρήσεων μέτριας αξιοπιστίας (όσον αφορά

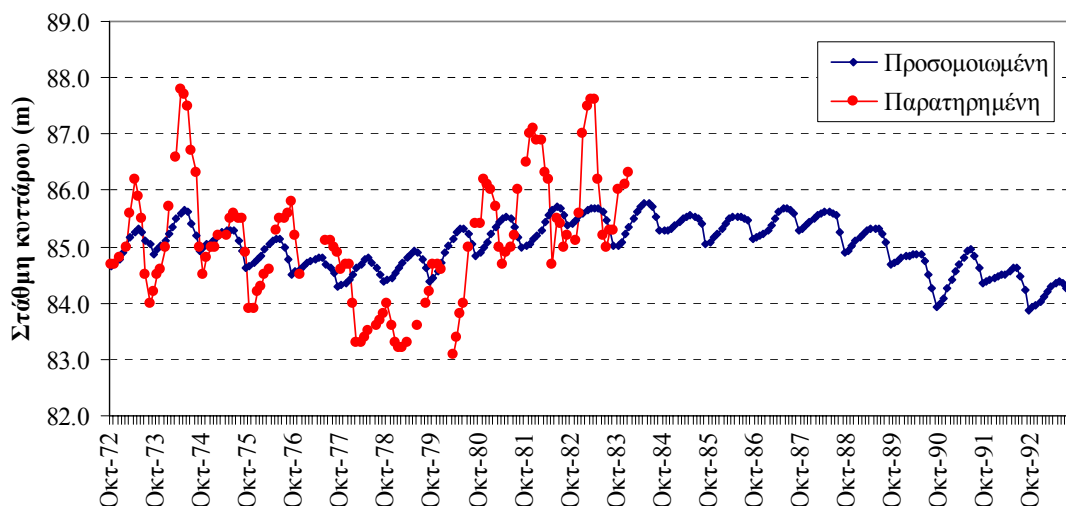
στα επιφανειακά νερά) ή δείγματα που δεν ανταποκρίνονται πλήρως στη χωρική κλίμακα του μοντέλου (όσον αφορά στα υπόγεια νερά). Μάλιστα, κατά την περίοδο επαλήθευσης, το μοντέλο δείχνει να συμβαδίζει με τα ιστορικά δεδομένα (όπου υπάρχουν μετρήσεις) αλλά και με τις εμπειρικές παρατηρήσεις, καταδεικνύοντας έτσι την καλή προγνωστική του ικανότητα. Επιπλέον, με βάση τη διερεύνηση του εδαφίου 6.4.4, οι βελτιστοποιημένες παράμετροι του μοντέλου είναι συμβατές με την εννοιολογική τους ερμηνεία, καθώς οι τιμές τους κρίνονται εύλογες ως προς τα φυσικά χαρακτηριστικά του υδρουσστήματος που αντιπροσωπεύουν.



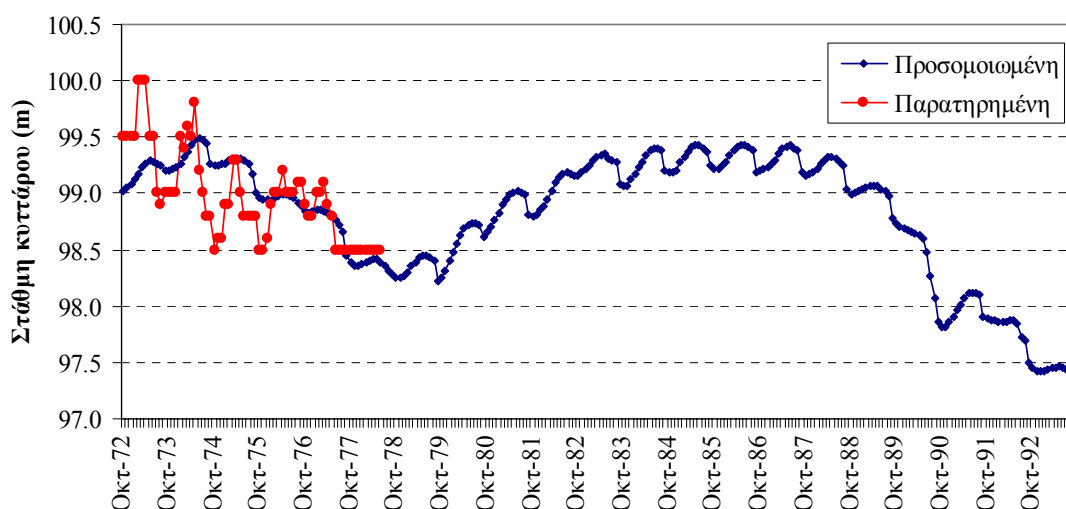
Σχήμα 6.13: Παρατηρημένη στάθμη γεώτρησης Κυψέλης Σοφάδων και προσομοιωμένη στάθμη κυττάρου 21.



Σχήμα 6.14: Παρατηρημένη στάθμη γεώτρησης Νέο Μοναστηρίου Φθιώτιδας και προσομοιωμένη στάθμη κυττάρου 28.



Σχήμα 6.15: Παρατηρημένη στάθμη γεώτρησης Βλοχού Καρδίτσας και προσομοιωμένη στάθμη κυττάρου 21.



Σχήμα 6.16: Παρατηρημένη στάθμη γεώτρησης Παλαιοκλησίου Καρδίτσας και προσομοιωμένη στάθμη κυττάρου 16.

6.5 Υδρολογική διερεύνηση βέλτιστης λύσης

6.5.1 Υδατικό ισοζύγιο υδροσυστήματος

Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ αναπαράγει τα μεγέθη του υδατικού ισοζυγίου για όλες τις συνιστώσες του συστήματος, τα οποία ολοκληρώνει σε όλη της έκταση της λεκάνης. Τα μέσα ετήσια μεγέθη των υδρολογικών μεταβλητών για την εικοσαετία 1972-73 έως 1992-93 δίνονται στον Πίνακα 6.10.

Επισημαίνεται ότι η περιοχή μελέτης δεν είναι ένα κλειστό υδρολογικό σύστημα, αφού δέχεται επιφανειακές εισροές από εξωτερικές λεκάνες (μέσω του ταμιευτήρα Πλαστήρα, που είναι ένα έργο πλήρους εκτροπής της υπολεκάνης Ταυρωπού του Αχελώου), καθώς και υπόγειες εισροές από τους ορεινούς περιμετρικούς όγκους, ενώ εκφορτίζεται προς την πλευρά της Ανατολικής Θεσσαλίας, με το

μέτωπο των υπόγειων εκφορτίσεων να είναι, προφανώς, μη ελεγχόμενο. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η κατάρτιση υδατικών ισοζυγίων είναι ιδιαίτερα επισφαλής,

Πίνακας 6.10: Μέσα ετήσια μεγέθη υδατικού ισοζυγίου λεκάνης Δυτικής Θεσσαλίας.

| Μεταβλητή ισοζυγίου | Ισοδύναμο ύψος (mm) | Όγκος νερού (hm ³) |
|--------------------------|---------------------|--------------------------------|
| Βροχόπτωση | 842.2 | 5126.8 |
| Εισροές από Πλαστήρα | 24.9 | 151.5 |
| Πραγματική εξατμοδιαπνοή | 476.0 | 2897.7 |
| Κατείδυση | 183.2 | 1115.2 |
| Διηθήσεις ποταμών | 20.0 | 121.7 |
| Επιφανειακή απορροή | 259.1 | 1577.4 |
| Απορροή πηγών | 16.4 | 99.6 |
| Συνολικές απολήψεις | 60.0 | 365.5 |
| Αντλήσεις | 27.7 | 168.6 |
| Απορροή εξόδου | 242.6 | 1477.0 |

Έχοντας υπόψη τις παραπάνω δυσκολίες, επιχειρείται η εξαγωγή ορισμένων συμπερασμάτων σχετικά με την υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης:

- Από τα 842.2 mm της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης στη λεκάνη, τα 476.0 mm καταναλίσκονται σε απώλειες λόγω εξατμοδιαπνοής, ποσοστό δηλαδή 56.5%, που είναι τυπικό για τις ελληνικές κλιματικές συνθήκες.
- Η επιφανειακή απορροή ανέρχεται σε 259.1 mm (σε αυτή περιλαμβάνεται και μια μικρή, σχετικά, ποσότητα που προέρχεται από τις χειμερινές εκροές του Πλαστήρα), ενώ η συνεισφορά των πηγών σε μόλις 16.4 mm, κάτι που είναι αναμενόμενο αφού στην περιοχή δεν αναπτύσσονται σημαντικές πηγές.
- Η συνολική απορροή, επιφανειακή και υπόγεια, ανέρχεται σε 275.5 mm, συνεπώς ο υπερετήσιος συντελεστής απορροής της λεκάνης εκτιμάται σε $275.5 / 842.2 = 32.7\%$. Η τιμή αυτή είναι τυπική για τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, όπου κυριαρχούν ημιπερατά πετρώματα. Επισημαίνεται ότι ο αντίστοιχος συντελεστής στη γειτονική λεκάνη του Αχελώου κυμαίνεται στα επίπεδα του 70%, λόγω του υγρού κλίματος, σε συνδυασμό με την έντονη ανάπτυξη αδιαπέρατων σχηματισμών (φλύσχης).
- Αν από στη συνολική απορροή (275.5 mm) προστεθούν οι εκροές του Πλαστήρα (24.9 mm) και στη συνέχεια αφαιρεθούν οι απώλειες λόγω διήθησης (20.0 mm) και η απορροή που καταλήγει στην έξοδο του συστήματος (242.6 mm), τότε η διαφορά που μένει, δηλαδή τα 12.9 mm ή 78.2 hm³, αναφέρεται στις απολήψεις που πραγματοποιούνται από επιφανειακά νερά.
- Αν από τις συνολικές απολήψεις (365.5 hm³) αφαιρεθούν οι απολήψεις από επιφανειακά νερά (78.2 hm³) και οι αντλήσεις (168.6 hm³), προκύπτει μια διαφορά 118.6 hm³, που προέρχεται από τη συνεισφορά των υδατικών πόρων του Πλαστήρα.

Από την ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου προκύπτει ότι, κατά μέσο όρο, οι υδατικές ανάγκες της περιοχής καλύπτονται κατά 21.4% από επιφανειακά νερά (απευθείας απολήψεις από τα υδατορεύματα της περιοχής), κατά 46.1% από γεωτρήσεις και κατά 32.5% από εξωτερικά νερά, που προέρχονται από τον ταμιευτήρα Πλαστήρα. Ωστόσο, σε περιόδους χαμηλής υδροφορίας, οπότε και η φυσική τροφοδοσία του υδροφορέα λόγω κατεισδύσεων είναι μειωμένη, η συνεισφορά των υπόγειων νερών είναι ακόμη μεγαλύτερη, με συνέπεια τη σημαντική ταπείνωση της στάθμης στις πεδινές, αρδευόμενες περιοχές του υδροσυστήματος.

6.5.2 Διαχειριστικά συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της μελέτης στην περιοχή της Καρδίτσας, όπου και έγινε αναλυτικότερη περιγραφή του υδροσυστήματος, μπορούμε να σταθούμε στα παρακάτω σημεία:

- Κατά την περίοδο 1972-1993, οι αρδευτικές ανάγκες του υδροσυστήματος αυξάνονται συνεχώς, χωρίς ωστόσο να ολοκληρώνονται τα αναγκαία έργα υποδομής, με συνέπεια να παρατηρείται υπερεκμετάλλευση του υδροφορέα.
- Η εξέλιξη της επανατροφοδοσίας του υπόγειου υδροφορέα είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με την εξέλιξη των αρδευτικών αναγκών του κάθε κόμβου ζήτησης.
- Ο δυσμενέστερος κόμβος ως προς την κατανάλωση υπόγειων νερών είναι αυτός των Σοφάδων, που αντιπροσωπεύει τη μεγαλύτερη αρδευόμενη έκταση της περιοχής.
- Η λίμνη Πλαστήρα αρδεύει πολλαπλάσια στρέμματα από το αρχικό σχεδιασμό της. Επιπλέον, έχουν κατασκευαστεί αρδευτικά έργα, όπως του Μεσενικόλα και του Ξυνονερίου, χωρίς να υπάρχει ολοκληρωμένο διαχειριστικό σχέδιο, με συνέπεια τη μη ορθολογική χρήση των αποθεμάτων του ταμιευτήρα.

Η έρευνα κατέδειξε την αναγκαιότητα της ύπαρξης συστηματικών μετρήσεων σε αντιπροσωπευτικά σημεία του υδροσυστήματος. Η βελτίωση όχι μόνο της ποσότητας αλλά και της ποιότητας της διαθέσιμης πληροφορίας αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για την αξιόπιστη μοντελοποίηση των ιδιαίτερα σύνθετων διεργασιών, φυσικών και ανθρωπογενών. Σε κάθε περίπτωση, με το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ επιχειρήθηκε για πρώτη φορά μια τόσο εκτενής ανάλυση της υδρολογικής διαίτας της λεκάνης, σε συνδυασμό με την επίδραση σε αυτή των διαχειριστικών πρακτικών. Η εφαρμογή του μοντέλου αποτέλεσε το πρώτο στάδιο μιας ολιστικής αντιμετώπισης του διαχειριστικού προβλήματος της περιοχής, που έγινε με συνδυασμένη χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου με άλλα εργαλεία που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού έργου. Το εν λόγω πλαίσιο συνεργασίας περιγράφεται σε σχετική έκθεση, με αντικείμενο την εκπόνηση ενός ολοκληρωμένου Σχεδίου Διαχείρισης των υδατικών πόρων της λεκάνης.

Αναφορές

- Ευστρατιάδης, Α., *Διερεύνηση μεθόδων αναζήτησης ολικού βελτίστου σε προβλήματα υδατικών πόρων*, Μεταπτυχιακή εργασία, 139 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2001.
- Ευστρατιάδης, Α., Ι. Ναλμπάντης, και 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, Ιανουάριος 2004.
- Ευστρατιάδης, Α., Στρατηγικές και αλγόριθμοι πολυκριτηριακής βαθμονόμησης σύνθετων υδρολογικών μοντέλων, *Κύκλος παρουσιάσεων ερευνητικών δραστηριοτήτων ΤΥΠΥΘΕ*, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2006.
- Κοζάνης, Σ., Α. Χριστοφίδης, και Α. Ευστρατιάδης, Περιγραφή συστήματος διαχείρισης και επεξεργασίας δεδομένων "Υδρογνώμων", *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελεγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: NAMA, Τεύχος 2, 141 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2005.
- Κουτσογιάννης, Δ., Α. Ευστρατιάδης, και Ν. Μαμάσης, Αποτίμηση του επιφανειακού υδατικού δυναμικού και των δυνατοτήτων εκμετάλλευσής του στη λεκάνη του Αχελώου και τη Θεσσαλία, Κεφ. 5 της Μελέτης υδατικών συστημάτων, *Συμπληρωματική μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων εκτροπής του Αχελώου προς τη Θεσσαλία*, Εργοδότης: Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων, Ανάδοχος: Υδροεξυγιαντική, Συνεργαζόμενοι: Δ. Κουτσογιάννης, 2001.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Κουτσογιάννης, Δ., Σ. Ρώτη, Ι. Τζεράνης, και Θ. Ξανθόπουλος, Τελική Έκθεση, *Υδρολογική Διερεύνηση Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας*, Τεύχος 7, 105 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούνιος 1988.
- Μαντούδη, Κ., Ν. Μαμάσης, και Δ. Κουτσογιάννης, Μοντέλο ισοζυγίου υδρολογικής λεκάνης με χρήση συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας, *Τεχνικά Χρονικά*, 24(1-3), 43-50, 2004.
- Ναλμπάντης, Ι., Προγράμματα προσομοίωσης της σχέσης βροχής-απορροής, *Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 1*, Τεύχος 8, 106 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 1992.
- Ρόζος, Ε., Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου εκτίμησης υδατικών αναγκών, *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελεγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: NAMA, Τεύχος 5, 21 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2005.

- SOGREAH, Έργο αναπτύξεως υπογείων υδάτων Θεσσαλίας, Μαθηματικά ομοιώματα, Υπουργείο Γεωργίας, 1979.
- Τέγος, Α., *Συνδυασμένη προσομοίωση υδρολογικών-υδρογεωλογικών διεργασιών και λειτουργίας υδροσυστήματος Δυτικής Θεσσαλίας*, Διπλωματική εργασία, 132 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2005.
- Abbot, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell, and J. Rasmussen, An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européenne, “SHE”, 1. History and philosophy of a physically-based distributed modelling system, *Journal of Hydrology*, 87, 45-59, 1986.
- Abbot, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell, and J. Rasmussen, An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européenne, “SHE”, 2. Structure of a physically-based distributed modelling system, *Journal of Hydrology*, 87, 45-59, 1986.
- Ajami, N. K., H. Gupta, T. Wagener, and S. Sorooshian, Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system, *Journal of Hydrology*, 298, 112-135, 2004.
- Anderson, E. A., *Hydrologic model calibration using the Interactive Calibration Program (ICP)*, Report, Hydrol. Res. Lab., U. S. National Weather Service, Silver Spring, Md., 1997.
- Bear, J., *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, New York, 1979.
- Beven, K. J., Changing ideas in hydrology – The case of physically-based models, *Journal of Hydrology*, 105, 157-172, 1989.
- Beven, K. J., How far can we go in distributed hydrological modelling?, *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 1-12, 2001.
- Boyle, D., H. V. Gupta, and S. Sorooshian, Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods, *Water Resources Research*, 36(12), 3663-3674, 2000.
- Brutsaert, W., *Evaporation into the Atmosphere*, Reidel, Dordrecht, 1982.
- Burnash, R. J. C., R. L. Ferral, and R. A. McGuire, *A Generalized Streamflow Simulation System- Conceptual Modeling for Digital Computers*, Joint Federal State River Forecasting Center, Sacramento, California, 1973.
- Cunge, J. A., On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method), *Journal of Hydraulic Research*, 7(2), 205-230, 1969.
- Dingman, S. L., *Physical Hydrology*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.
- Dooge, J. C. I., W. C. Strpczewski, J. J. Napiokowski, Hydrodynamic derivation of storage parameters of the Muskingum model, *Journal of Hydraulic Research*, 54, 371-387, 1982.
- Duan, Q., S. Sorooshian, and V. Gupta, Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research*, 28(4), 1015-1031, 1992.
- Eckhardt, K., and J. G. Arnold, Automatic calibration of a distributed catchment model, *Journal of Hydrology*, 251, 103-109, 2001.
- 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.

- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, The multiobjective evolutionary annealing-simplex method and its application in calibrating hydrological models, *2nd General Assembly of the European Geosciences Union, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, Vienna, 04593, European Geosciences Union, 2005.
- Efstratiadis, A., D. Koutsoyiannis, and D. Xenos, Minimising water cost in the water resource management of Athens, *Urban Water Journal*, 1(1), 3-15, 2004.
- Efstratiadis, A., D. Koutsoyiannis, E. Rozos, and I. Nalbantis, Calibration of a conjunctive surface-groundwater simulation model using multiple responses, *EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 5, Nice, European Geophysical Society, 2003.
- Efstratiadis, A., E. Rozos, A. Koukouvinos, I. Nalbantis, G. Karavokiros, and D. Koutsoyiannis, An integrated model for conjunctive simulation of hydrological processes and water resources management in river basins, *2nd General Assembly of the European Geosciences Union, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, Vienna, 03560, European Geosciences Union, 2005.
- Flügel, W.-A., Delineating Hydrological Response Units (HRU's) by GIS analysis for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany, *Hydrological Processes*, 9, 423-436, 1995.
- Fread, D. L., Flow routing, in *Handbook of Hydrology* (D. R. Maidment, editor-in-chief), McGraw-Hill, New York, 1992.
- 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.
- Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- Govindaraju, R. S., and A. R. Rao, *Artificial Neural Networks in Hydrology*, Kluwer Academic, Boston, 2002.
- Grayson, R. B., I. D. Moore, and T. A. McMahon, Physically-based modeling 2: Is the concept realistic?, *Water Resources Research*, 26(10), 2659-2666, 1992.
- Gupta, H. V., S. Sorooshian, and P. O. Yapo, Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and non-commensurable measures of information, *Water Resources Research*, 34(4), 751-763, 1998.
- Jain, M. K., U. C. Kothiyari, and K. G. Ranga Raju, A GIS based distributed rainfall-runoff model, *Journal of Hydrology*, 299, 107-135, 2004.
- Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, Optimization by simulated annealing, *Science*, 220, 671-680, 1983.
- Kolditz, O., Modelling flow and heat transfer in fractured rocks: Conceptual model of a 3-D deterministic fracture network, *Geothermics*, Vol. 24, No. 3, pp. 451-470, 1995.
- Koutsoyiannis, D., A. Efstratiadis, and G. Karavokiros, A decision support tool for the management of multi-reservoir systems, *Journal of the American Water Resources Association*, 38(4), 945-958, 2002.
- Kuczera, G., and E. Parent, Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm, *Journal of Hydrology*, 211, 69-85, 1998.

- Kuczera, G., and M. Mroczkowski, Assessment of hydrologic parameter uncertainty and the worth of multiresponse data, *Water Resources Research*, 34(6), 1481-1489, 1998.
- Madsen, H., and T. Jacobsen, Automatic calibration of the MIKE-SHE integrated hydrological modeling system, *4th DHI Software Conference*, 6-8 June 2001, Helsingor, Denmark, 2001.
- Madsen, H., Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives, *Advances in Water Resources*, 26, 205-216, 2003
- Maidment, D. R., *Hydrology Workshop: Integration of GIS and Hydrologic Modeling*, ESRI User Conference, 1997.
- Maillet, E., *Essai d'hydraulique souterraine et fluviale*, Librairie scientifique Hermann, Paris, 1905.
- Makhlouf, Z., and C. Michel, A two-parameter monthly water balance model for French watersheds, *Journal of Hydrology*, 162, 299-318, 1994.
- McDonald, M. G., and A. W. Harbaugh, *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference GroundWater Flow Model*, Washington, 1988.
- Michalewicz, Z., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, New York, 1996.
- 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 International Conference of European Water Resources Association: "Water Resources Management in the Era of Transition"*, G. Tsakiris (editor), Athens, 279-286, European Water Resources Association, Athens, 2002.
- 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.
- Nelder, J. A., and R. Mead, A simplex method for function minimization, *Computer Journal*, 7(4), 308-313, 1965.
- O'Connell, P. E., and E. Todini, Modelling of rainfall, flow and mass transport in hydrological systems: an overview, *Journal of Hydrology*, 175, 3-16, 1996.
- Panday, S., and P. S. Huyakorn, A fully coupled physically-based spatially distributed model for evaluating surface/subsurface flow, *Advances in Water Resources*, 27, 361-382, 2004.
- Refsgaard, J. C., Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models, *Journal of Hydrology*, 198, 69-97, 1997.
- 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.
- Seibert, J., and J. J. McDonnell, On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: use of soft data for multicriteria model calibration, *Water Resources Research*, 38(11), 1241, doi: 10.1029/2001WR000978, 2002.
- Singh, V. P., and D. A. Woolhiser, Mathematical modeling of watershed hydrology, *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4), 270-292, 2002.
- Strack, O. D. L., *Groundwater Mechanics*, Prentice-Hall, Minneapolis, 1999.

- Tang, Y., P. Reed, and T. Wagener, How effective and efficient are multiobjective evolutionary algorithms at hydrologic model calibration?, *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(2), 289-307, 2006.
- Thornthwaite, C. W., An approach toward a rational classification of climate, *Geogr. Rev.*, 38(1), 55-94, 1948.
- Thornthwaite, C. W., and J. R. Mather, The water balance, *Publications in Climatology*, Laboratory of Climatology, Climatol. Dresel Inst. Technol., 8(8), 1-104, 1955.
- Vrugt, J. A., H. V. Gupta, L. A. Bastidas, W. Bouten, and S. Sorooshian, Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models, *Water Resources Research*, 39(8), 1214, doi: 10.1029/2002WR001746, 2003
- Wagener, T., D. P. Boyle, M. Lees, H. S. Wheater, H. V. Gupta, and S. Sorooshian, A framework for development and application of hydrological models, *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 13-26, 2001.
- Xu, C.-Y., and V. P. Singh, A review of monthly water balance models for water resources investigations, *Water Resources Management*, 12, 31-50, 1998.
- Ye, W., B. C. Bates, N. R. Vinley, M. Sivapalan, and A. J. Jackeman, Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments, *Water Resources Research*, 33(1), 153-166, 1997.