

ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ – Μοντέλο υδρολογικής και υδρογεωλογικής προσομοίωσης

Θεωρητική τεκμηρίωση

A. Ευστρατιάδης, E. Ρόζος, A. Κουκουβίνος

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2009

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	5
1.1	Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.....	5
1.2	Ιστορικό.....	6
1.3	Διάθρωση του τεύχους.....	8
1.4	Αναγνωρίσεις.....	9
2	Συνοπτική επισκόπηση μοντέλων υδρολογικής προσομοίωσης	10
2.1	Θεμελιώδεις έννοιες.....	10
2.2	Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων.....	11
2.3	Εκτίμηση παραμέτρων μέσω βαθμονόμησης.....	21
2.4	Πολυκριτηριακή βαθμονόμηση.....	27
3	Θεμελιώδεις αρχές μοντέλου Υδρόγειος	32
3.1	Γενική περιγραφή του μοντέλου.....	32
3.2	Απαιτήσεις μαθηματικού μοντέλου.....	33
4	Συνιστώσες και δεδομένα εισόδου	37
4.1	Θεματικά επίπεδα.....	37
4.2	Υδρογραφικό δίκτυο και υπολεκάνες.....	37
4.3	Μονάδες υδρολογικής απόκρισης.....	39
4.4	Σχηματοποίηση υδροφορέα.....	42
4.5	Σύστημα διαχείρισης υδατικών πόρων.....	45
5	Μοντέλο προσομοίωσης επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών	48
5.1	Μαθηματική δομή μοντέλου.....	48
5.2	Υπολογιστική διαδικασία.....	50
5.3	Προσαρμογή μοντέλου για ημερήσια προσομοίωση.....	52
5.4	Εννοιολογία και φυσική ερμηνεία παραμέτρων.....	54

5.5	Υπολογισμός εισροών στο υδρογραφικό δίκτυο	56
6	Μοντέλο υπόγειας υδρολογίας	58
6.1	Μοντέλα υπόγειων νερών.....	58
6.2	Συνιστώσες φόρτισης υπόγειων δεξαμενών	58
6.3	Λειτουργία δεξαμενών.....	60
6.4	Χρονικό βήμα υπολογισμών.....	62
6.5	Ρητό σχήμα επίλυσης	63
6.6	Πεπλεγμένο σχήμα επίλυσης.....	64
7	Μοντέλο κατανομής υδατικών πόρων	66
7.1	Η κατανομή των ροών ως πρόβλημα βελτιστοποίησης	66
7.2	Θεμελιώδεις έννοιες θεωρίας γράφων - Το πρόβλημα μεταφόρτωσης	69
7.3	Σχηματοποίηση μοντέλου διγράφου.....	71
7.4	Προσομοίωση διαρροών και διηθήσεων	77
7.5	Προσομοίωση επιστροφών νερού	78
7.6	Αναδρομικός υπολογισμός μοναδιαίου κόστους.....	78
7.7	Επικαιροποίηση ιδιοτήτων διγράφου	81
7.8	Επίλυση προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού.....	83
8	Μοντέλο διόδευσης ροών στο υδρογραφικό δίκτυο	84
8.1	Περιγραφή του προβλήματος και παραδοχές	84
8.2	Επιμερισμός μέσων ημερήσιων παροχών.....	86
8.3	Θεωρητικό πλαίσιο διόδευσης υδρογραφημάτων	89
8.4	Χειρισμός του προβλήματος διόδευσης σε μεμονωμένους κλάδους	91
9	Υπολογιστική διαδικασία προσομοίωσης	97
9.1	Ορισμοί - Δεδομένα εισόδου	97
9.2	Αρχικοποίηση	98
9.3	Προσομοίωση χωρίς διόδευση	99

9.4	Ημερήσια προσομοίωση με διόδευση	101
10	Βαθμονόμηση παραμέτρων	105
10.1	Τοποθέτηση του προβλήματος	105
10.2	Κριτήρια καλής προσαρμογής	106
10.3	Εργαλεία βελτιστοποίησης	112
11	Κατευθυντήριες αρχές εφαρμογής του μοντέλου	121
11.1	Σχηματοποίηση και παραμετροποίηση επιφανειακού συστήματος	121
11.2	Χάραξη κυττάρων υδροφορέα και ομαδοποίηση παραμέτρων	122
11.3	Αρχικές συνθήκες	123
11.4	Καθορισμός ορίων παραμέτρων	124
11.5	Η έννοια της ημιαυτόματης βαθμονόμησης	125
11.6	Πολυκριτηριακή ανάλυση	127
	Αναφορές	129

1 Εισαγωγή

1.1 Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

Η 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 ροές κατά μήκος του φυσικού (υδρογραφικού) και τεχνητού (έργα μεταφοράς) δικτύου και τις πραγματικές απολήψεις του υδροσυστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς των τεχνικών έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων.

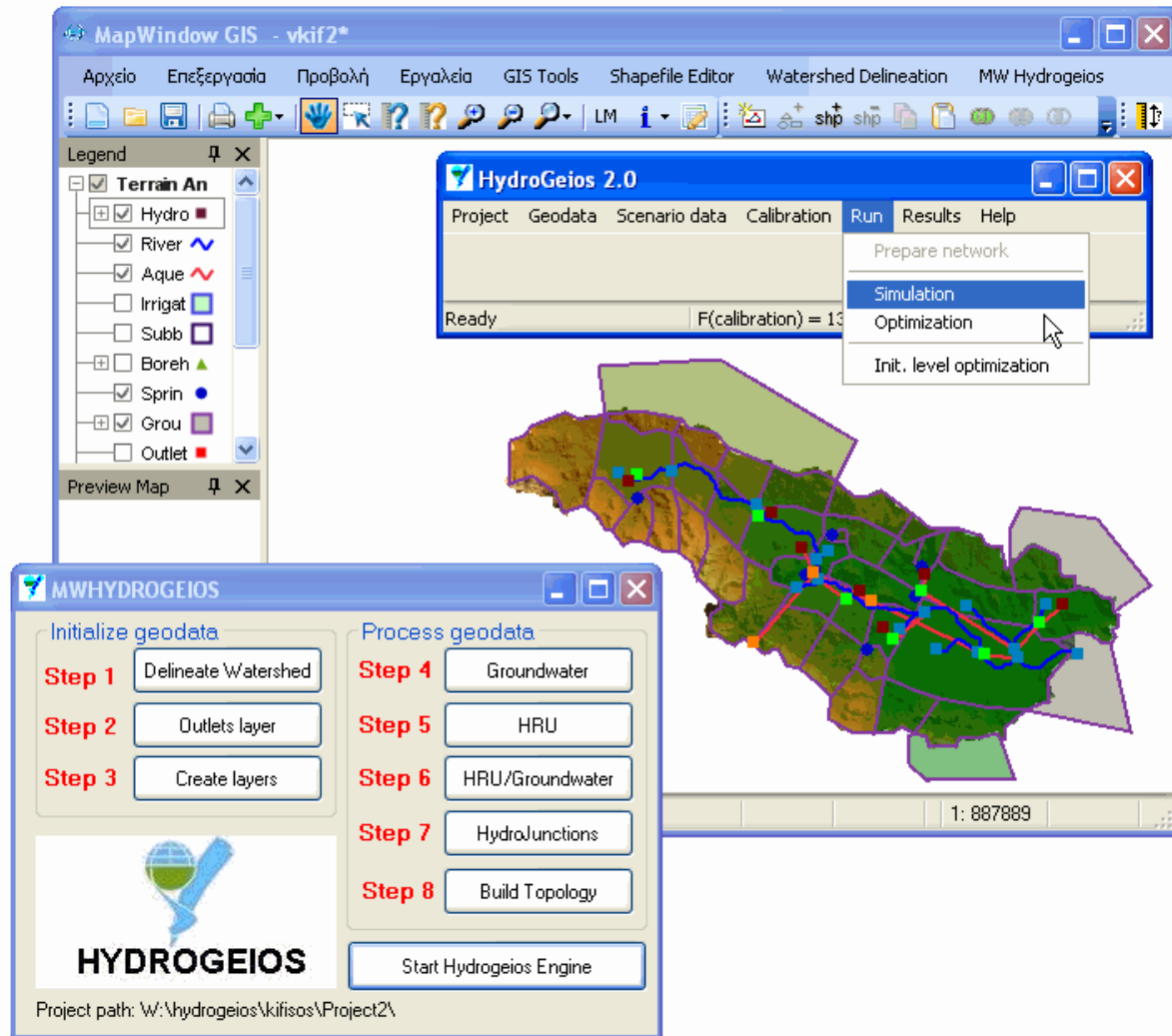
Η χωρική κλίμακα αναπαράστασης των διεργασιών βασίζεται σε μια ημικατανεμημένη σχηματοποίηση, με την οποία εκτιμάται το ισοζύγιο των υδατικών πόρων σε χαρακτηριστικά σημεία (κόμβοι) της λεκάνης απορροής. Οι κόμβοι τοποθετούνται κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου (στις συμβολές των κλάδων ή σε άλλα σημεία ελέγχου) και σε θέσεις όπου πραγματοποιούνται επιφανειακές και υπόγειες απολήψεις. Η περιγραφή του πεδίου υπόγειας ροής βασίζεται σε μια πολυκυτταρική χάραξη, δημιουργώντας ένα εννοιολογικό δίκτυο διασυνδεδεμένων δεξαμενών, η στάθμη των οποίων αντιστοιχεί στη μέση στάθμη του αντίστοιχου τμήματος του υδροφορέα. Τέλος, το σύστημα διαχείρισης των υδατικών πόρων (υδροσύστημα), περιλαμβάνει μια εννοιολογική απεικόνιση των θέσεων προσφοράς και ζήτησης νερού, των κύριων έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων της λεκάνης (υδραγωγεία, έργα εκτροπής, γεωτρήσεις και ομάδες γεωτρήσεων) και των χρήσεων νερού. Για τη διαμόρφωση των χωρικών δεδομένων του μοντέλου χρησιμοποιείται το σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας MapWindow.

Ως προς τη χρονική κλίμακα, το μοντέλο υποστηρίζει μηνιαίο ή ημερήσιο βήμα προσομοίωσης, το οποίο επιλέγεται με βάση το σκοπό της μελέτης καθώς και τη διαθεσιμότητα των υδρολογικών δεδομένων εισόδου. Το μηνιαίο βήμα ενδείκνυται για μελέτες διαχειριστικού ενδιαφέροντος, ενώ το ημερήσιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την περιγραφή πλημμυρικών φαινομένων σε μεγάλες λεκάνες, για τη συνήθη περίπτωση δεν διατίθενται επαρκή χωρικά δεδομένα βροχόπτωσης σε λεπτές χρονικές κλίμακες. Στη δεύτερη περίπτωση, για την πιστότερη αναπαράσταση των χρονισμών των πλημμυρικών παροχών, υλοποιείται ένα εμπειρικό σχήμα επιμερισμού των ημερήσιων απορροών κάθε υπολεκάνης σε υδρογραφήματα λεπτής χρονικής κλίμακας (ωριαίας), τα οποία στη συνέχεια διοδεύονται κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου, εφαρμόζοντας μοντέλα μίας (κινηματικό κύμα) ή δύο (μέθοδος Muskingum) παραμέτρων.

Ως προς τη μοντελοποίηση των υδρολογικών διεργασιών στην επιφάνεια, την ακόρεστη και την κορεσμένη ζώνη του εδάφους, υιοθετείται μια προσέγγιση φυσικής βάσης, η οποία είναι όσο το δυνατό φειδωλή ως προς τον αριθμό των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται. Οι παράμετροι αντιστοιχούν σε χωρικές ενότητες της λεκάνης (μονάδες υδρολογικής απόκρισης) και του υδροφορέα (ζώνες) με κοινά γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά, το οποίο επιτρέπει την αποσύνδεση της παραμετροποίησης από τη χωρική λεπτομέρεια της σχηματοποίησης. Η εκτίμηση των παραμέτρων γίνεται μέσω βαθμονόμησης, δηλαδή με προσαρμογή του μοντέλου στις παρατηρημένες συνθήκες του παρελθόντος. Για το σκοπό αυτό, στο λογισμικό έχουν ενσωματωθεί αυτοματοποιημένες διαδικασίες, οι οποίες βασίζονται σε πολλαπλά μέτρα επίδοσης (στατιστικά και εμπειρικά) και εξελιγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης, ολικής και πολυκριτηριακής.

1.2 Ιστορικό

Τόσο το μαθηματικό υπόβαθρο του μοντέλου όσο και το λογισμικό αποτελούν προϊόν μακρόχρονης εμπειρίας των μελών της ερευνητικής ομάδας ΙΤΙΑ σε προβλήματα προσομοίωσης συστημάτων υδατικών πόρων και την ανάπτυξη συναφών εφαρμογών υδροπληροφορικής. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1990, η απόπειρα αναπαράστασης των υδρολογικών διεργασιών σε διάφορες λεκάνες του ελληνικού χώρου, με διαφορετικές απαιτήσεις και επίπεδα πολυπλοκότητας, είναι ως αποτέλεσμα την εφαρμογή όλο και πιο ολοκληρωμένων προσεγγίσεων (Ναλμπάντης, 1992· Ναλμπάντης και Ρόζος, 2000· Nalbantis *et al.*, 2002· Efstratiadis *et al.*, 2003· Μαντούδη κ.ά., 2004· Ευστρατιάδης κ.ά., 2004· Rozos *et al.*, 2004). Ειδικότερα, η πρώτη έκδοση του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ και του αντίστοιχου λογισμικού έγινε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «*Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*», στο οποίο συμμετείχε το ΕΜΠ μαζί με ιδιωτικούς φορείς και συγχρηματοδοτήθηκε από την ΓΓΕΤ και την ΕΕ (Ευστρατιάδης κ.ά., 2006). Στο λογισμικό υλοποιήθηκε ένα σχήμα μηνιαίας προσομοίωσης και ημικατανεμημένης δομής, με σύζευξη τριών επιμέρους μοντέλων (επιφανειακής υδρολογίας, υπόγειας υδρολογίας και διαχείρισης υδατικών πόρων). Η συνιστώσα που αφορά στις μεθοδολογίες βαθμονόμησης διερευνήθηκε στα πλαίσια του έργου «*Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων*», το οποίο χρηματοδοτήθηκε από Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων στα πλαίσια του προγράμματος υποτροφιών Ηράκλειτος (Ευστρατιάδης, 2008). Το μοντέλο υπόγειας υδρολογίας βασίζεται στο εννοιολογικό σχήμα που ανέπτυξαν οι Rozos and Koutsoyiannis (2006· βλ. και Ρόζος, 2009). Τέλος, η συνιστώσα που αφορά στη μοντελοποίηση των διεργασιών σε ημερήσια χρονική κλίμακα έγινε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος «*FLASH: Observations, Analysis and Modeling of Lightning Activity in Thunderstorms, for use in Short Term Forecasting of Flash Floods*», στο οποίο συμμετέχει, μεταξύ άλλων, το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (Efstratiadis *et al.*, 2009).



Σχήμα 1.1: Υποσυστήματα της έκδοσης 2.0 του λογισμικού ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

Η παρούσα δεύτερη έκδοση του λογισμικού υλοποιήθηκε του έργου «Ανάπτυξη νέας βάσης δεδομένων για τη διαχείριση και λειτουργία της Εθνικής Τράπεζας Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας (ΕΤΥΜΠ) – Γ' Φάση σε περιβάλλον ΣΓΠ (GIS) και δημοσιοποίηση του έργου της ΕΤΥΜΠ» (Ευστρατιάδης κ.ά., 2009β). Η έκδοση αυτή έχει υλοποιηθεί σε περιβάλλον ΣΓΠ, και επιπλέον περιλαμβάνει αρκετές βελτιώσεις του μαθηματικού υποβάθρου και του περιβάλλοντος εργασίας. Συγκεκριμένα, η κατασκευή, επεξεργασία και οπτικοποίηση των γεωγραφικών δεδομένων ενός έργου (το οποίο αφορά στην υδρολογική μοντελοποίηση μιας λεκάνης απορροής) γίνεται με το σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας MapWindow, και την υποστήριξη της ειδικής εφαρμογής (άρθρωμα, plugin) MW-Hydrogeios, ενώ η διαχείριση των σεναρίων που αφορούν στα υδρολογικά δεδομένα του έργου (χρονοσειρές, στόχοι, παράμετροι, αρχικές συνθήκες, κριτήρια καλής προσαρμογής) και οι υπολογιστικές διαδικασίες (προσομοίωση, βαθμονόμηση) εκτελούνται μέσω της κύριας εφαρμογής (Hydrogeios engine). Τα επιμέρους συστήματα απεικονίζονται στο Σχήμα 1.1.

Το λογισμικό ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ έχει εφαρμοστεί σε πολύπλοκα υδροσυστήματα του ελληνικού χώρου, στα πλαίσια ακαδημαϊκών εργασιών (Τέγος, 2005· Κοψιάτη, 2009) και διδακτορικών διατριβών (Ευστρατιάδης, 2008· Ρόζος, 2009), ερευνητικών έργων (Ευστρατιάδης κ.ά., 2006· Κουτσογιάννης κ.ά., 2008) και μελετών (Μαμάσης κ.ά., 2006). Ακόμη, οι μεθοδολογίες του – τμηματικά ή συνολικά – έχουν παρουσιαστεί σε έγκριτα διεθνή περιοδικά, κεφάλαια βιβλίων και συνέδρια (Efstratiadis et al., 2005· Rozos and Koutsoyiannis, 2006· Nalbantis et al., 2007· Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2008· Efstratiadis et al., 2008· Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2009· Efstratiadis et al., 2009).

1.3 Διάθρωση του τεύχους

Το τεύχος περιλαμβάνει, εκτός από την παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1), δέκα ακόμη κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται συνοπτική επισκόπηση της διεθνούς εμπειρίας σε θέματα υδρολογικής μοντελοποίησης.

Στο Κεφάλαιο 3 εξηγούνται η δομή και οι θεμελιώδεις αρχές του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, καθώς και η συμμόρφωσή του με τις απαιτήσεις του παρόντος έργου.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιεί το μοντέλο (γεωγραφικά, υδρολογικά, διαχειριστικά).

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται το μοντέλο προσομοίωσης των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών, σε μηνιαία και ημερήσια χρονική κλίμακα.

Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφεται το μοντέλο προσομοίωσης των υπόγειων υδρολογικών διεργασιών.

Στο Κεφάλαιο 7 περιγράφεται το μοντέλο αναπαράστασης των ανθρωπογενών δράσεων στη λεκάνη και ο χειρισμός του σχετικού διαχειριστικού προβλήματος, μέσω γραμμικής βελτιστοποίησης.

Στο Κεφάλαιο 8 περιγράφεται η λειτουργία του μοντέλου σε ημερήσιο βήμα, που προϋποθέτει τον επιμερισμό των ημερήσιων παροχών σε ωριαία υδρογραφήματα και τη διόδευση της απορροής κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου, μέσω κατάλληλων αριθμητικών σχημάτων.

Στο Κεφάλαιο 9 περιγράφεται η διαδικασία προσομοίωσης, με την οποία υλοποιείται η σύζευξη των παραπάνω μοντέλων.

Στο Κεφάλαιο 10 περιγράφεται η μεθοδολογία εκτίμησης των παραμέτρων του μοντέλου, με χρήση εξελιγμένων αλγορίθμων ολικής και πολυκριτηριακής βαθμονόμησης.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 11 δίνονται ορισμένες βασικές κατευθυντήριες αρχές για τη συνεπή εφαρμογή του μοντέλου, όσον αφορά στις διαδικασίες σχηματοποίησης, παραμετροποίησης και βαθμονόμησης.

1.4 Αναγνωρίσεις

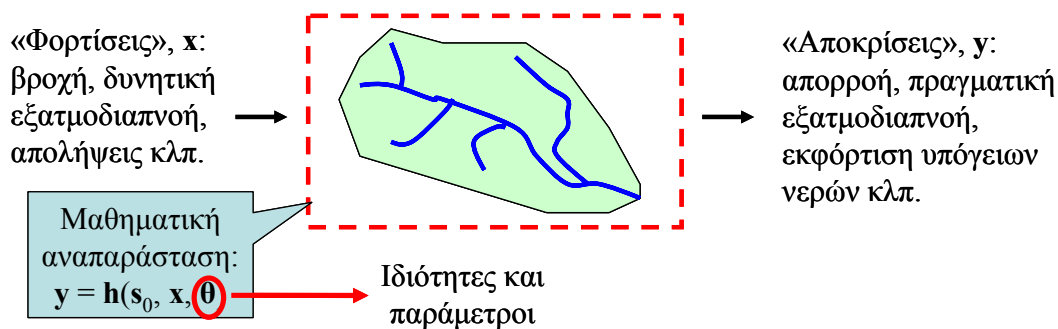
Στην ανάπτυξη του μοντέλου, την υλοποίηση του λογισμικού και την πιλοτική εφαρμογή του έχουν συμβάλει οι κάτωθι:

- Ανδρέας Ευστρατιάδης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, MSc
- Ευάγγελος Ρόζος, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
- Αντώνης Κουκουβίνος, Τοπογράφος Μηχανικός, Γεωγράφος DEA
- Ιωάννης Ναλμπάντης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ
- Δημήτρης Κουτσογιάννης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ
- Αντώνης Κούσης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Δ/ντης Ερευνών Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών
- Στέφανος Κοζάνης, Δρ. Τοπογράφος Μηχανικός
- Γιώργος Καραβοκυρός, Πληροφορικός
- Αριστοτέλης Τέγος, Πολιτικός Μηχανικός, MSc
- Κατερίνα Μάζη, Γεωλόγος, MSc
- Μαρία Κοψιάτη, Τοπογράφος Μηχανικός, MSc

2 Συνοπτική επισκόπηση μοντέλων υδρολογικής προσομοίωσης

2.1 Θεμελιώδεις έννοιες

Ο όρος *υδρολογικό μοντέλο* αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που ενδιαφέρουν σε εφαρμογές της πράξης. Τα μοντέλα αυτά είτε περιγράφουν μεμονωμένα γεγονότα (event-type), όπως ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας, είτε περιγράφουν τη διαχρονική εξέλιξη του υδρολογικού κύκλου σε μια πεπερασμένη χωρική ενότητα (π.χ. μια λεκάνη απορροής). Στην πρώτη περίπτωση, η αναπαράσταση του γεγονότος γίνεται μέσω εμπειρικών ή συστημικών, συνήθως, προσεγγίσεων (π.χ. ορθολογική μέθοδος, μοναδιαίο υδρογράφημα), παραλείποντας τις διεργασίες του υδρολογικού κύκλου που δεν αφορούν στη μελέτη, όπως η εξατμοδιαπνοή και η διήθηση. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση η προσέγγιση διέπεται, εν μέρει έστω, από κάποιο φυσικό ή εννοιολογικό υπόβαθρο, αναπαριστώντας σε συνεχή χρόνο (continuous-time) τις κύριες, τουλάχιστον, διεργασίες που επηρεάζουν τον κύκλο του νερού, με τη χρήση εργαλείων *προσομοίωσης*.



Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση ενός μοντέλου υδρολογικής προσομοίωσης.

Ειδικότερα, τα μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης αναπαριστούν τις συνεχείς φυσικές διεργασίες που περιγράφονται από συστήματα διαφορικών εξισώσεων, μέσω παραμετρικών μαθηματικών σχέσεων, καθορισμένης χωρικής και χρονικής διακριτότητας. Με την παραπάνω παραδοχή, κάθε τέτοιο μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μη γραμμικός μετασχηματισμός της μορφής:

$$\mathbf{y}' = \mathbf{h}(\mathbf{s}_0, \mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) \quad (2.1)$$

όπου \mathbf{s}_0 οι αρχικές συνθήκες του φυσικού συστήματος στην έναρξη της προσομοίωσης (π.χ. ύψη εδαφικής υγρασίας, στάθμες υπόγειου νερού), \mathbf{x} οι υδρολογικές μεταβλητές εισόδου ή αλλιώς

φορτίσεις (π.χ. βροχόπτωση, δυναμική εξατμοδιαπνοή), θ τα χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος, και y' οι μεταβλητές εξόδου ή αποκρίσεις του μοντέλου (π.χ. απορροή, εξατμοδιαπνοή, εκφόρτιση υπόγειων νερών). Όλες οι μεταβλητές μεταβάλλονται στο χρόνο, δίνονται με τη μορφή χρονοσειρών για χρονικό ορίζοντα T , και αναπαριστούν διεργασίες σε συγκεκριμένη θέση ή περιοχή της λεκάνης. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που περιγράφονται από το διάνυσμα θ αποτυπώνουν τις ιδιότητες του φυσικού συστήματος, που είτε είναι απευθείας γνωστές από μετρήσεις πεδίου (π.χ. έκταση λεκάνης) είτε εκτιμώνται έμμεσα, με τρόπο ώστε το μοντέλο να αποτυπώνει όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα την παρατηρημένη συμπεριφορά του συστήματος. Στην τελευταία περίπτωση, τα εν λόγω χαρακτηριστικά καλούνται *παράμετροι* του μοντέλου. Στο Σχήμα 2.1 δίνονται οι παραπάνω θεμελιώδεις έννοιες ενός υδρολογικού μοντέλου.

Τα υδρολογικά μοντέλα χρησιμοποιούνται τόσο για τη χωρική όσο και τη χρονική «επέκταση» των παρατηρημένων δειγμάτων, εφόσον είναι γνωστές οι αρχικές συνθήκες και τα δεδομένα εισόδου του συστήματος, δηλαδή οι φορτίσεις και οι παράμετροι (Beven, 2001, σ. 1). Πράγματι, με τα μοντέλα επιτυγχάνεται η προσομοίωση πολλαπλών διεργασιών του φυσικού συστήματος και σε πολλαπλές θέσεις ενδιαφέροντος (ακόμα και εκτός της ίδιας λεκάνης), που περιγράφονται από τις διάφορες μεταβλητές εξόδου. Βεβαίως, αν και οι εξοδοί ενός υδρολογικού μοντέλου είναι πολύ περισσότερες από τις εισόδους, είναι συνήθως μη ελεγχόμενες, αφού δεν μπορούν να τεκμηριωθούν από μετρήσεις. Από την άλλη πλευρά, η χρονική επέκταση υποδηλώνει ότι ένα υδρολογικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο πρόγνωσης, για τη διερεύνηση των επιπτώσεων διαφόρων κλιματικών, διαχειριστικών και άλλων σεναρίων στο υδατικό δυναμικό μιας λεκάνης.

Γενικά, η επιλογή του μοντέλου εξαρτάται από το σκοπό της μελέτης, την εμπειρία του μελετητή και τα διαθέσιμα δεδομένα. Συχνά, η ποσότητα αλλά και ποιότητα των διαθέσιμων στοιχείων αποτελεί τον κύριο περιοριστικό παράγοντα σε μια έρευνα ή μελέτη, καθώς η επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας, η οποία θεωρητικά εξασφαλίζεται από την χρήση αναλυτικότερων σχημάτων προσομοίωσης, προσκρούει στην ανεπάρκεια υδρολογικών μετρήσεων και άλλων δεδομένων (π.χ. κατανεμημένη γεωγραφική πληροφορία), που είναι απαραίτητα για την κατάστρωση και σχηματοποίηση του μοντέλου. Αφού γίνει η επιλογή του μοντέλου, ακολουθεί η διαδικασία προσαρμογής του στη συγκεκριμένη λεκάνη, ήτοι η εκτίμηση των χαρακτηριστικών μεγεθών (παραμέτρων) του.

2.2 Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

2.2.1 Ιστορικό

Η πρώτη απόπειρα προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου αποδίδεται στον Thornthwaite (1948), που ανέπτυξε ένα μονοπαραμετρικό σχήμα μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου για την εκτίμηση της πραγματικής εξατμοδιαπνοής απλών λεκανών, εφήμερης διάταξας και χωρίς συνεισφορά των υπόγειων

νερών (Dingman, 1994, σ. 299-301· Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 236-243). Αργότερα, οι Thornthwaite and Mather (1955) παρουσίασαν μια τροποποιημένη εκδοχή του, η οποία αποτέλεσε τη βάση όλων των μεταγενέστερων σχημάτων υδρολογικής προσομοίωσης. Η εκτεταμένη χρήση των τελευταίων ξεκίνησε από τη δεκαετία του 1960, ταυτόχρονα με την ραγδαία εξάπλωση των υπολογιστικών εργαλείων. Οι Singh and Woolhiser (2002), σε μια εκτενή βιβλιογραφική επισκόπηση, ξεχωρίζουν ένα πλήθος 70 περίπου καταξιωμένων υδρολογικών σχημάτων, τα οποία χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους, τη χωρική τους κλίμακα, τη μαθηματική τους δομή και τη χρονική διακριτότητα. Τα χαρακτηριστικά κάθε κατηγορίας εξετάζονται στα εδάφια που ακολουθούν. Κατάλογος των πλέον γνωστών υδρολογικών μοντέλων, μαζί με συνοπτική περιγραφή της δομής και του πεδίου εφαρμογής τους, δίνεται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά μοντέλα της διεθνούς βιβλιογραφίας, σε χρονολογική σειρά (προσαρμογή από Singh and Woolhiser, 2002).

Όνομασία μοντέλου	Παραπομπή	Περιγραφή	Πεδίο εφαρμογής
Thornthwaite-Mather	Thornthwaite and Mather (1955)	Μηνιαίο, εννοιολογικό, αδιαμέριστο, με μοναδική παράμετρο τη χωρητικότητα εδαφικής υγρασίας	Εκτίμηση πραγματικής εξατμοδιαπνοής απλών αδιαπέρατων λεκανών, με εφήμερη ροή
Stanford Watershed Model (SWM; τώρα HSPF)	Crawford and Linsley (1962, 1966)	Συνεχές, αδιαμέριστο, με 35 παραμέτρους, εκτιμώμενες ως επί το πλείστον με βάση τα χαρακτηριστικά της λεκάνης	Τυπικό μοντέλο βροχής-απορροής της δεκαετίας 1960 ως τις αρχές της δεκαετίας του 1970
HEC-1; πλέον υλοποιημένο στο πακέτο HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center (1968, 1981, 2000)	Κλίμακα μεμονωμένου επεισοδίου καταιγίδας, ημι-κατανεμημένο (διαφορετικές παράμετροι ανά υπολεκάνη), με εναλλακτικές επιλογές μοντελοποίησης των διεργασιών	Μελέτες σχεδιασμού αντιπλημμυρικών έργων, εκτίμηση επιπτώσεων από αλλαγές χρήσεων γης
National Weather Service – River Forecast System (NWS-RFS); γνωστό ως Sacramento	Burnash <i>et al.</i> (1973)	Αδιαμέριστο, συνεχούς προσομοίωσης σε ημερήσιο (το πολύ) χρονικό βήμα, με χρήση 17 παραμέτρων	Τυπικό μοντέλο πρόγνωσης πλημμυρών στις ΗΠΑ

HBV	Bergström (1976, 1992, 1995)	Αδιαμέριστο, συνεχούς προσομοίωσης σε ημερήσιο χρονικό βήμα	Τυπικό υδρολογικό μοντέλο Σκανδιναβικών κρατών
TOPMODEL	Beven and Kirby (1976, 1979)· Beven (1995)	Εννοιολογικό, κατανεμημένο, συνεχούς προσομοίωσης, υποθέτει στατιστική κατανομή των παραμέτρων	Κατάλληλο για αβαθή εδάφη, μέτριες κλίσεις και σχετικά υγρό κλίμα
Xinanjiang	Zhao <i>et al.</i> (1980)· Zhan and Liu (1995)	Ημικατανεμημένο μοντέλο συνεχούς προσομοίωσης, κατάλληλο για υγρές ή σχετικά υγρές λεκάνες	Ευρεία χρήση στην Κίνα σε μελέτες υδρολογίας, πλημμυρών, διαχείρισης υδατικών πόρων
Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems (CREAMS)	USDA (1980)· Knisel <i>et al.</i> (1993)	Φυσικής βάσης, μικρής χωρικής κλίμακας (αγρού), συνεχές ή επεισοδίου, εκτιμά την αγροτική απορροή, τη διάβρωση και την ποιότητα του νερού	Αξιολόγηση αγροτικών διαχειριστικών πρακτικών
SFB; πλέον έχει αντικατασταθεί από το AWBM (Australian Water Balance Model)	Boughton (1984)· Boughton and Carroll, (1993)	Εννοιολογικό, αδιαμέριστο, εκτιμά την ημερήσια απορροή ή την ωριαία πλημμύρα, περιέχει ρουτίνες αυτόματης βαθμονόμησης	Το πλέον δημοφιλές υδρολογικό μοντέλο της Αυστραλίας, πρόσφατα προσαρμόστηκε και για μη εξοπλισμένες λεκάνες
Simulator for Water Resources in Rural Basins (SWRRBW)	Williams <i>et al.</i> (1985)	Συνεχές, ημικατανεμημένο μοντέλο απορροής και μεταφοράς φερτών σε μη αστικές λεκάνες	Αξιολόγηση διαχειριστικών πολιτικών σε μη εξοπλισμένες λεκάνες των ΗΠΑ
Système Hydrologique Européenne (SHE); υλοποιημένο στα πλαίσια των πακέτων MIKE-SHE και SHETRAN	Abbott <i>et al.</i> (1986)	Φυσικής βάσης, συνεχές, πλήρως κατανεμημένο μοντέλο απορροής και στερεοαπορροής, λεπτομερής περιγραφή διεργασιών ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης, με χρήση μεγάλου	Τυπικό μοντέλο υδρολογικής ανάλυσης σε πολλά ευρωπαϊκά κράτη, υποστηρίζεται από την εταιρεία DHI (Danish Hydrological Institute)

		αριθμού παραμέτρων	
ARNO	Todini (1988, 1996)	Ημικατανεμημένο συνεχές μοντέλο βροχής-απορροής	Τυπικό υδρολογικό μοντέλο της Ιταλίας
GR2M, GR4J	Makhlouf and Michel (1994)	Αδιαμέριστο, μηνιαίου (GR2M) ή ημερήσιου (GR4J) βήματος, με 2 και 4 παραμέτρους, αντίστοιχα	Τυπικό υδρολογικό μοντέλο της Γαλλίας
Soil & Water Assessment Tool (SWAT)	Arnold <i>et al.</i> (1998)	Κατανεμημένο, φυσικής βάσης, προσομοιώνει την απορροή, τη μεταφορά φερτών και τη συγκέντρωσης ρύπων, ενσωματώνοντας ρουτίνες από μοντέλα όπως το CREAMS, το SWRRBW, κ.ά.	Εκτίμηση επιπτώσεων πολιτικών διαχείρισης των εδαφών σε μεγάλα και πολύπλοκα υδροσυστήματα

2.2.2 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 επιδιώκουν συνολική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου σε μια συγκεκριμένη χωρική ενότητα (η ενιαία λεκάνη ή διακριτά τμήματά της), περιγράφοντας τον μετασχηματισμό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σε απορροή (απ' όπου και η παραδοσιακή ορολογία *μοντέλα βροχής-απορροής*). Η απορροή της λεκάνης είναι η κύρια έξοδος του μοντέλου, αλλά και η μεταβλητή ως προς 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).

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, με διακριτοποίησή του σε στοιχειώδη τμήματα που καλούνται *κύτταρα* (cells). Για το σύνολο των κυττάρων, διατυπώνονται οι διαφορετικές εξισώσεις συνέχειας και ροής, που επιλύονται με μεθόδους πεπερασμένων διαφορών, πεπερασμένων στοιχείων, πεπερασμένων

όγκων, κτλ. Οι αρχικές και οριακές συνθήκες, καθώς και οι φορτίσεις (κατείσδυση από την ακόρεστη ζώνη, αντλήσεις) θεωρούνται γνωστές και δίνονται «εξωτερικά» (από τον χρήστη ή μέσω ενός βοηθητικού υδρολογικού μοντέλου). Τα πλέον διαδεδομένα μοντέλα υπόγειων νερών είναι το MODFLOW (McDonald, 1998), το οποίο βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, και το FEFLOW (Kolditz, 1995), το οποίο βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με τη μέθοδο προσέγγισης Galerkin. Το πλεονέκτημά τους είναι ότι οι παράμετροι έχουν κάποιο φυσικό νόημα, οπότε μπορούν προσεγγιστούν με βάση μετρήσεις πεδίου (παρατηρήσεις στάθμης, υδρογραφήματα πηγών). Τα βασικά μειονεκτήματά τους είναι η εξάρτησή τους από μεγάλο πλήθος εξειδικευμένων δεδομένων, τα οποία συνήθως δεν είναι διαθέσιμα, καθώς και η ανάγκη για χωρική διακριτοποίηση με μεγάλο αριθμό κυττάρων, το οποίο επιφέρει μεγάλο υπολογιστικό φόρτο.

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 (Singh and Bhallamudi, 1998· Panday and Huyakorn, 2004· Rozos *et al.*, 2004). Επιπλέον, είναι αναγκαία στην περίπτωση που, εξαιτίας του διαπερατού γεωλογικού υποβάθρου της λεκάνης (π.χ. ανθρακικά πετρώματα, έντονα καρστικοποιημένα), ο χρόνος απόκρισης του υπόγειου συστήματος είναι συγκρίσιμος με το χρόνο απόκρισης του επιφανειακού. Βεβαίως, για να είναι αποδοτική από πλευράς 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 εκτιμάται, κατά αυθαίρετο τρόπο, από τον χρήστη. Επιπλέον, οι παράμετροι του μοντέλου που σχετίζονται με τις επιφανειακές και υπόγειες διεργασίες εκτιμώνται συνδυαστικά, αξιοποιώντας μετρήσεις που αναφέρονται τόσο στα επιφανειακά (παροχές ποταμών) όσο και στα υπόγεια νερά (παροχές πηγών, στάθμες πιεζομέτρων).

Τα τελευταία χρόνια, η υδρολογική προσομοίωση εντάσσεται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο, το οποίο επιβάλλεται από την ανάγκη αντιμετώπισης όλο και πιο σύνθετων προβλημάτων, που προϋποθέτουν ολιστική θεώρηση των φυσικών διεργασιών και των επιπτώσεων των πρακτικών διαχείρισης των υδατικών πόρων σε αυτές. Έτσι, τα μοντέλα επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας δεν λειτουργούν πλέον αυτόνομα, αλλά αποτελούν συνιστώσες συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων (Nalbantis *et al.*, 2002), στα οποία εντάσσονται κλιματικά, διαχειριστικά και υδροδυναμικά μοντέλα, μοντέλα διαίτας ρύπων σε υδάτινα σώματα και στο υπέδαφος, καθώς και μοντέλα στερεομεταφοράς.

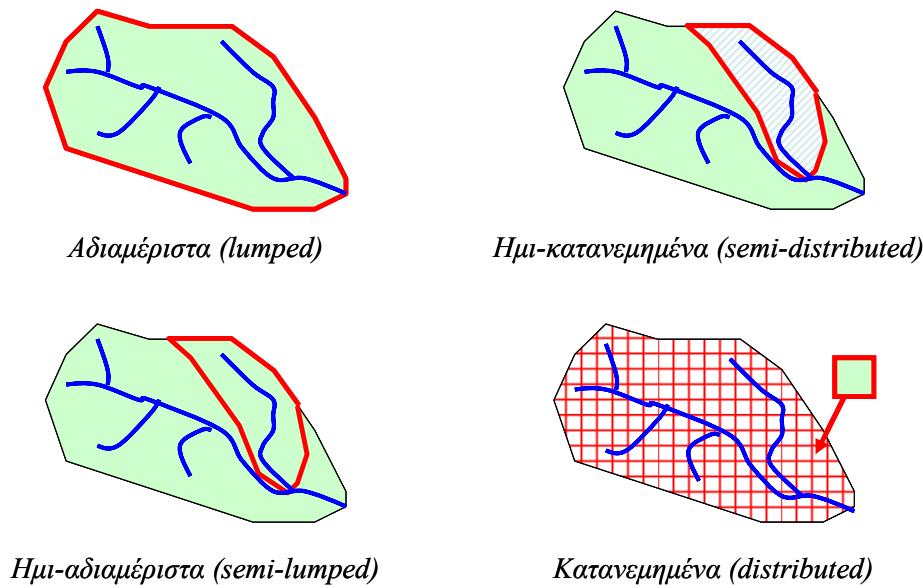
2.2.3 Χωρική κλίμακα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα υδρολογικά μοντέλα ανάγουν τις *σημειακές διεργασίες* (point processes) σε επιφανειακές, ολοκληρώνοντας τις υδρολογικές μεταβλητές εισόδου και εξόδου (βροχόπτωση, εξατμοδιαπνοή, απορροή, κατείσδυση), καθώς και τις παραμέτρους που περιγράφουν

τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος, σε κάποια πεπερασμένη χωρική κλίμακα. Η χωρική διακριτότητα αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό των υδρολογικών μοντέλων, με βάση την οποία προκύπτουν τέσσερις κατηγορίες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2 (Ajami *et al.*, 2004):

- *Αδιαμέριστη* ή *συγκεντρωτική* (lumped): Οι χρονοσειρές φόρτισης ολοκληρώνονται σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης, για την οποία θεωρούνται ενιαίες τιμές παραμέτρων. Το μοντέλο προσομοίωσης αναπαριστά τις κύριες μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης, για την εκτίμηση της απορροής στην έξοδο αυτής.
- *Ημικατανεμημένη* (semi-distributed): Η λεκάνη χωρίζεται σε διακριτές περιοχές, που αντιστοιχούν είτε σε φυσικές υπολεκάνες (συνηθέστερα) είτε σε χωρικές ενότητες με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, σε κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων. Μετά το πέρας των υπολογισμών για κάθε χωρική ενότητα, η αντίστοιχη απόκριση (δηλαδή η απορροή) «μεταφέρεται» στην έξοδο της λεκάνης, κάτι που σε μικρή χρονική κλίμακα προϋποθέτει την εφαρμογή σχημάτων διόδευσης.
- *Ημιαδιαμέριστη* (semi-lumped): Πρόκειται για μια ενδιάμεση μορφή μεταξύ της αδιαμέριστης και της ημικατανεμημένης σχηματοποίησης, στην οποία θεωρούνται διακριτές χωρικές ενότητες που δέχονται διαφορετικές φορτίσεις, ωστόσο οι παράμετροι που εφαρμόζονται είναι κοινές για όλες τις ενότητες.
- *Κατανεμημένη* (distributed): Γίνεται κατάτμηση του φυσικού συστήματος σε χωρικές ενότητες μικρής κλίμακας, ήτοι κύτταρα, τα οποία προκύπτουν είτε από την εφαρμογή ενός ορθογωνικού κανάβου δεδομένης ισοδιάστασης είτε έχουν ακανόνιστο γεωμετρικό σχήμα (π.χ. πεπερασμένα στοιχεία, πεπερασμένοι όγκοι). Σε κάθε περίπτωση, η χωρική διαμέριση δεν έχει γεωγραφικό ή φυσικό νόημα, και τα κύτταρα αντιπροσωπεύουν ομοιογενή και ισότροπα εδαφικά τμήματα, στα οποία αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων (ή φυσικών ιδιοτήτων).

Στην παραπάνω κατηγοριοποίηση, ο όρος *σχηματοποίηση* αναφέρεται στη διακριτοποίηση των υδρολογικών διεργασιών σε επιφανειακές χωρικές ενότητες, εφόσον αναφερόμαστε σε μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας, ή του πεδίου κατείσδυσης σε κύτταρα υδροφορέα, αν αναφερόμαστε σε μοντέλο υπόγειας υδρολογίας. Από την άλλη πλευρά, η *παραμετροποίηση* αφορά στη χωρική διακριτότητα των παραμέτρων. Στα περισσότερα μοντέλα, οι δύο έννοιες ταυτίζονται, χωρίς όμως αυτό να αποτελεί γενικό κανόνα. Για παράδειγμα, στο ημικατανεμημένο μοντέλο HEC, στο οποίο η χωρική ανάλυση των διεργασιών γίνεται σε κλίμακα υπολεκάνης, οι τιμές των παραμέτρων του επίσης διαφοροποιούνται ανά υπολεκάνη.



Σχήμα 2.2: Κατάταξη υδρολογικών μοντέλων με βάση τη χωρική τους κλίμακα.

2.2.4 Χρονική διακριτότητα

Όσον αφορά στη χρονική διακριτότητα, αυτή είναι άμεσα εξαρτώμενη από τον σκοπό του μοντέλου. Σχήματα προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για διαχειριστικούς σκοπούς υιοθετούν τη μηνιαία ή, σπανιότερα, την ημερήσια κλίμακα, ενώ τα μοντέλα πλημμυρών ή τα συνδυαστικά υδρολογικά-υδροδυναμικά μοντέλα υιοθετούν μικρότερες κλίμακες, με μέγιστη την ημερήσια.

Προφανώς, μια λεπτή χρονική κλίμακα επιβάλλει αντίστοιχα μικρή διακριτότητα των μεταβλητών εισόδου του μοντέλου. Η ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων προϋποθέτει κατάλληλη μετρητική υποδομή στη λεκάνη, από καταγραφικά όργανα σε συνεχή χρόνο, όπως βροχογράφους και σταθμηγράφους. Επισημαίνεται ότι σε τέτοιες κλίμακες, η επιφανειακή ολοκλήρωση των σημειακών υδρολογικών χρονοσειρών είναι ιδιαίτερα δύσκολη, αφού τα δείγματα πρέπει να είναι κατάλληλα χρονισμένα, ώστε να αποτυπώνουν τους πραγματικούς χρόνους υστέρησης.

2.2.5 Μαθηματική δομή

Τα υδρολογικά μοντέλα, ανάλογα με τη μαθηματική τους δομή, εντάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- (α) μοντέλα φυσικής βάσης·
- (β) εννοιολογικά μοντέλα·
- (γ) στατιστικά και στοχαστικά μοντέλα·
- (δ) μοντέλα «μαύρου κουτιού».

Πίνακας 2.2: Σύγκριση υδρολογικών μοντέλων με βάση τη μαθηματική τους δομή.

Τύπος μοντέλου	Θεωρητικό υπόβαθρο	Φυσική συνέπεια
Φυσικής βάσης	Εξισώσεις ακόρεστης και κορεσμένης ροής, άλλες εμπειρικές εξισώσεις από πειραματικές λεκάνες	Θεωρητικά πλήρης, αλλά μόνο σε πολύ μικρή (απειροστή;) χωρική κλίμακα
Εννοιολογικά	Παραμετρικές σχέσεις σε υδραυλικά ανάλογα που αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες	Σχετική, εφόσον οι παράμετροι θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές των μακροσκοπικών ιδιοτήτων της λεκάνης
Στατιστικά και στοχαστικά	Σχέσεις που αναπαράγουν την στατιστική δομή των παρατηρημένων δειγμάτων	Στοιχειώδης φυσική συνέπεια, πλήρης στατιστική συνέπεια
«Μαύρου κουτιού»	Μη γραμμικοί μετασχηματισμοί σχέσεων αιτίου-αποτελέσματος	Απολύτως καμία

Στον Πίνακα 2.2 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των τεσσάρων τύπων μοντέλων, και επιχειρείται μια συγκριτική αξιολόγησή τους με βάση το θεωρητικό τους υπόβαθρο και τη φυσική συνέπεια που εξασφαλίζουν. Αναλυτικότερα:

Τα μοντέλα *φυσικής βάσης* (physically-based) είναι εξ ορισμού καταναμεημένα, καθώς αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες μικρής κλίμακας, βασιζόμενα στους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού (δηλαδή τις ακόρεστης και κορεσμένης ροής), καθώς και σε ημιεμπειρικές περιοχικές σχέσεις που έχουν προκύψει από έρευνες σε πειραματικές λεκάνες. Επειδή η χωρική ανάλυση των μοντέλων αυτών είναι πυκνή, το πλήθος των χαρακτηριστικών μεγεθών τους είναι εξαιρετικά μεγάλο. Θεωρητικά, τα μεγέθη αυτά αντιπροσωπεύουν τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους και του υπεδάφους, οπότε είναι δυνατό να εκτιμηθούν με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης (τοπογραφικά, εδαφολογικά, γεωλογικά, υδρογεωλογικά κτλ.), καθώς και από παρατηρήσεις πεδίου. Αυτό βεβαίως προϋποθέτει γνωστή χωρική κατανομή των εν λόγω χαρακτηριστικών και εκτεταμένο πλήθος μετρήσεων. Από την άλλη πλευρά, είναι τα μοναδικά σχήματα που δεν βασίζονται σε δείγματα παρατηρημένων αποκρίσεων, δηλαδή μετρήσεις παροχής και πιεζομετρίας, για την προσαρμογή των παραμέτρων τους. Για το λόγο αυτό, θεωρούνται κατάλληλα για την εκτίμηση υδρολογικών μεγεθών σε λεκάνες χωρίς μετρητικές υποδομές, κάτι που αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις των υδρολογικών επιστημών (Sivapalan *et al.*, 2003).

Τα *εννοιολογικά* (conceptual) μοντέλα διατυπώνουν όχι τους φυσικούς νόμους αλλά παραμετρικές σχέσεις σε υδραυλικά ανάλογα που αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες στην ελάχιστη χωρική ενότητα που υποστηρίζεται από την σχηματοποίηση (λεκάνη, υπολεκάνη). Συγκεκριμένα, θεωρούν

όγκους ελέγχου στους οποίους ολοκληρώνονται χωρικά και χρονικά οι μεταβλητές κατάστασης και οι ροές του συστήματος, αποφεύγοντας έτσι τα προβλήματα κλίμακας που εισάγουν τα μοντέλα φυσικής βάσης (Nash and Sutcliffe, 1970). Ειδικότερα, τα επιφανειακά εννοιολογικά μοντέλα αναφέρονται και ως *μοντέλα εδαφικής υγρασίας* (soil moisture accounting models), καθώς το υδραυλικό ανάλογο που χρησιμοποιούν είναι μια υποθετική δεξαμενή νερού, η στάθμη της οποίας αναπαριστά το μέσο ύψος υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους.

Το κύριο πλεονέκτημα των εννοιολογικών σχημάτων είναι η απλότητά τους, που επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων διεργασιών με έντονη χωρική ανομοιογένεια, μέσω ενός μικρού αριθμού παραμέτρων. Οι εν λόγω παράμετροι, χωρίς να έχουν πλήρη φυσική ερμηνεία, μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές των «μακροσκοπικών» χαρακτηριστικών της χωρικής ενότητας. Τα εννοιολογικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί σε διάφορες χρονικές διακριτότητες (ωριαία, ημερήσια, μηνιαία) και διάφορους βαθμούς πολυπλοκότητας, που κυμαίνονται από σχήματα με 10 έως 20 παραμέτρους, κατάλληλα για άνυδρες ή ημιάνυδρες λεκάνες, έως πολύ απλά σχήματα ελάχιστων παραμέτρων, που θεωρούνται επαρκή για λεκάνες με πλούσιο υδατικό δυναμικό (Alley, 1984· Makhoulf and Michel, 1994· Ye *et al.*, 1997· Xu and Singh, 1998).

Σε αρκετά υδρολογικά εγχειρίδια, είθισται τα εννοιολογικά μοντέλα να αναφέρονται αποκλειστικά στην αδιαμέριστη, ημιαδιαμέριστη και ημικατανεμημένη χωρική κλίμακα, ενώ η κατανεμημένη σχηματοποίηση θεωρείται ταυτόσημη μιας προσέγγισης φυσικής βάσης. Ωστόσο, αρκετοί ερευνητές εκφράζουν έντονο σκεπτικισμό ως προς τη δυνατότητα γενίκευσης των σημειακών φυσικών νόμων, που ισχύουν στην απειροστή κλίμακα (ήτοι σε έναν απειροστό όγκο αναφοράς), για την προσομοίωση χωρικά κατανεμημένων διεργασιών, έστω και σε μια σχετικά μικρή επιφάνεια. Έτσι, θεωρούν ότι ακόμη και τα κατανεμημένα σχήματα είναι στην πραγματικότητα εννοιολογικά, όχι όμως σε κλίμακα λεκάνης ή υπολεκάνης αλλά στη μονάδα χωρική διακριτότητας που αναφέρεται η σχηματοποίηση του μοντέλου, στην οποία το σύστημα θεωρείται ομοιογενές και ισότροπο (Beven, 1989). Επιπλέον, υπάρχει μια κατηγορία μοντέλων φυσικής βάσης, όπως το TOPMODEL (Beven and Kirby, 1979), η παραμετροποίηση των οποίων δεν αναφέρεται στην κλίμακα της χωρικής ενότητας, αλλά σε χωρικές συναρτήσεις κατανομής των χαρακτηριστικών της λεκάνης (Beven, 2001, σ. 18).

Το σημαντικότερο μειονέκτημα των κατανεμημένων μοντέλων προκύπτει από την έντονη ετερογένεια των φυσικών διεργασιών, που προϋποθέτει την ύπαρξη των σχετικών πληροφοριών σε όσο το δυνατό πιο λεπτομερή χωρική κλίμακα (ειδικά όταν η μελέτη γίνεται για μικρές λεκάνες και σχετικά ξηρά κλίματα). Συνήθως, τα μοντέλα φυσικής βάσης χρησιμοποιούνται για πιο εξειδικευμένες έρευνες, όπως για την εκτίμηση των επιπτώσεων που επιφέρει σε μια λεκάνη η αλλαγή στο κλιματικό καθεστώς, τη φυτοκάλυψη ή τις χρήσεις γης, ενώ συχνά συνδυάζονται με υδροδυναμικά μοντέλα, μοντέλα μεταφοράς-διάχυσης ρύπων στο νερό και το έδαφος, καθώς και μοντέλα μεταφοράς φερτών. Από την άλλη πλευρά, η διεθνής εμπειρία καταδεικνύει ότι η χρήση τους αποκλειστικά για την

πρόγνωση της απορροής μιας λεκάνης, όχι μόνο είναι υπολογιστικά ασύμφορη, αλλά και δεν παρέχει κανένα πλεονέκτημα ως προς την ακρίβεια των προγνώσεων σε σχέση με τα εννοιολογικά μοντέλα (Grayson *et al.*, 1992· Ye *et al.*, 1997· Boyle *et al.*, 2001).

Η επόμενη ομάδα μοντέλων περιλαμβάνει δύο υποκατηγορίες, τα *στατιστικά* και *στοχαστικά* μοντέλα, που βασίζονται στην πιθανοτική προσέγγιση των υδρολογικών διεργασιών, τις οποίες αντιμετωπίζουν ως τυχαίες μεταβλητές, είτε μεμονωμένες είτε από κοινού. Τα πρώτα χρησιμοποιούν μεθόδους της επαγωγικής στατιστικής, και είναι κατάλληλα όταν η πραγματοποίηση ενός υδρολογικού φαινομένου (π.χ. η αιχμή μιας πλημμύρας) είναι ή μπορεί, κατά προσέγγιση, να θεωρηθεί ανεξάρτητη από κάθε άλλη πραγματοποίηση του ίδιου φαινομένου. Από την άλλη πλευρά, τα στοχαστικά μοντέλα, τα οποία βασίζονται στη θεωρία των στοχαστικών ανελίξεων, είναι πληρέστερα, καθώς λαμβάνουν υπόψη και τη χρονική αλληλεπίδραση ή αλλιώς στοχαστική δομή των διεργασιών, και συνεπώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προσομοίωση (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 62). Οι παράμετροί των παραπάνω μοντέλων προκύπτουν με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παρατηρημένων δειγμάτων, τα οποία και αναπαράγουν, και όχι από τα ίδια τα δείγματα. Σε απλές δομές μοντέλων, η εκτίμηση των παραμέτρων τους γίνεται αναλυτικά, ενώ σε πιο σύνθετες δομές χρησιμοποιούνται μέθοδοι προσαρμογής αντίστοιχες των εννοιολογικών μοντέλων, με τη διαφορά ότι δεν επιδιώκεται η αναπαραγωγή της ίδιας της απόκρισης αλλά των στατιστικών χαρακτηριστικών της.

Σε αντίθεση με την καθαρά προσδιοριστική προσέγγιση που υιοθετούν τα μοντέλα φυσικής και εννοιολογικής βάσης, τα πιθανοτικά μοντέλα δεν δίνουν μονοσήμαντες προγνώσεις των μεταβλητών που αναπαριστούν, αλλά ποσοτικοποιούν την αβεβαιότητα των προγνώσεων. Αναπαράγοντας τα στατιστικά μεγέθη των παρατηρημένων δειγμάτων (για την ακρίβεια, εκείνων που προδιαγράφονται από τη μαθηματική δομή του συγκεκριμένου μοντέλου), όχι μόνο εξασφαλίζουν στατιστική συνέπεια, αλλά διατηρούν και μια στοιχειώδη, έστω, συνέπεια με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος (π.χ. οι υψηλοί συντελεστές αυτοσυσχέτισης σε μια μηνιαία χρονοσειρά απορροής υποδηλώνουν χρονική υστέρηση που οφείλεται στο λιώσιμο του χιονιού ή την τροφοδοσία του ποταμού από πηγές).

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. Το μείζον πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα περιγραφής οσοδήποτε πολύπλοκων συστημάτων, με πολύ μικρότερο (αμελητέο, πρακτικά) υπολογιστικό φόρτο σε σχέση με τα αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης. Στην υδρολογία, ως σχήματα μαύρου κουτιού αναφέρονται κυρίως τα αποκαλούμενα *νευρωνικά δίκτυα*, που διατυπώνουν έντονα μη γραμμικούς μετασχηματισμούς των μεταβλητών εισόδου σε εξόδους. Η δομή (αριθμός νευρώνων, αριθμός κρυμμένων επιπέδων) και οι παράμετροί τους (συντελεστές βάρους, σταθερές συναρτήσεων μεταφοράς) δεν έχουν φυσικό υπόβαθρο, και εκτιμώνται μέσω μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας προσαρμογής στις αντίστοιχες

μετρημένες αποκρίσεις του συστήματος, με τη χρήση γενετικών, κατά κανόνα, αλγορίθμων, και αναφέρεται ως *εκπαίδευση* (training) του δικτύου. Στην πράξη, το νευρωνικό δίκτυο δεν είναι παρά ένας πολύπλοκος κώδικας υπολογιστή, όπου δεν έχει πρόσβαση ο χρήστης.

Μια άλλη ομάδα σχημάτων μαύρου κουτιού είναι τα μοντέλα *γενετικού προγραμματισμού*, στα οποία χρησιμοποιείται ένας γενετικός αλγόριθμος που εντοπίζει μια «βέλτιστη» σχέση ή και σύστημα εξισώσεων μεταξύ φορτίσεων και αποκρίσεων. Η διαφορά σε σχέση με τα νευρωνικά δίκτυα είναι ότι οι εξισώσεις του μοντέλου, αν και επίσης δεν έχουν φυσική ερμηνεία, είναι ορατές στον χρήστη, οπότε προσεγγίζουν περισσότερο την κατηγορία των εννοιολογικών προσεγγίσεων.

Η διάδοση των νευρωνικών δικτύων στις υδρολογικές επιστήμες ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1990, και η συνηθέστερη εφαρμογή τους είναι για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση πλημμυρικών φαινομένων (Zealand *et al.*, 1999· Brath *et al.*, 2002· Giustolisi and Laucelli, 2005). Από την άλλη πλευρά, ο γενετικός προγραμματισμός έχει μικρό χρόνο ζωής στις επιστήμες των υδατικών πόρων, και ακόμα μικρότερη εφαρμογή στην προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών (Liong *et al.*, 2002).

2.3 Εκτίμηση παραμέτρων μέσω βαθμονόμησης

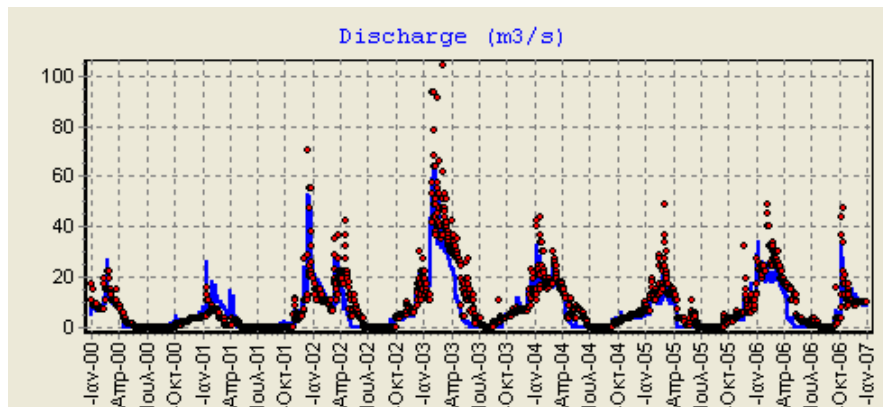
2.3.1 Ορισμός του προβλήματος

Ο όρος *βαθμονόμηση* (calibration), που προέρχεται από τις στατιστικές επιστήμες, υποδηλώνει μια συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου, έτσι ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του να προσεγγίζουν όσο το δυνατό περισσότερο τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές. Διαφοροποιείται από τον γενικότερο όρο *εκτίμηση παραμέτρων*, που μπορεί να αναφέρεται σε μια εμπειρική ή διαισθητική διαδικασία «εκ των προτέρων» ορισμού των παραμέτρων του μοντέλου, χωρίς «εκ των υστέρων» έλεγχο της επίδοσής του, με βάση πραγματικά δεδομένα. Για το λόγο αυτό, η βαθμονόμηση ενός μοντέλου προϋποθέτει ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απόκρισης του φυσικού συστήματος, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών με τα προσομοιωμένα δεδομένα (Σχήμα 2.3).

Επειδή οι παράμετροι των εξισώσεων που περιγράφουν τις «εσωτερικές» διεργασίες του συστήματος δεν είναι γνωστές, οπότε αυτό που ζητείται δεν είναι η βελτιστοποίηση της απόκρισής του ως προς κάποιο εξωτερικό κριτήριο (π.χ. κόστος), αλλά η βελτιστοποίηση της ίδιας της μαθηματικής δομής, με τρόπο ώστε η προσομοιωμένη απόκριση να προσεγγίζει καλύτερα την παρατηρημένη. Συνεπώς, σε αντιδιαστολή με την ευθεία διατύπωση των τυπικών προβλημάτων βελτιστοποίησης συστημάτων υδατικών πόρων, η εκτίμηση των παραμέτρων των υδρολογικών μοντέλων είναι γνωστή στη βιβλιογραφία ως *αντίστροφο πρόβλημα* (inverse problem).

Το πρόβλημα της βαθμονόμησης υδρολογικών μοντέλων, αν και έχει διερευνηθεί διεξοδικά εδώ και παραπάνω από τρεις δεκαετίες, όχι μόνο δεν έχει αντιμετωπιστεί αλλά παραμένει επίκαιρο όσο ποτέ,

δεδομένου ότι τα μοντέλα τείνουν να γίνουν όλο και πιο σύνθετα στη δομή και τον αριθμό των παραμέτρων τους, αλλά και όλο και πιο απαιτητικά σε δεδομένα και σε υπολογιστικό φόρτο. Όπως προκύπτει και από την ανάλυση της ενότητας 2.2, το εν λόγω πρόβλημα, αν και παραδοσιακά έχει θεωρηθεί ότι αφορά αποκλειστικά στα εννοιολογικά σχήματα, αποδεικνύεται τελικά κοινό και για τις υπόλοιπες κατηγορίες μοντέλων (φυσικής βάσης, πιθανοτικά ή «μαύρου κουτιού»), καθώς σε όλες τις περιπτώσεις προκύπτει η ανάγκη προσαρμογής των παραμέτρων στις παρατηρήσεις του παρελθόντος.



Σχήμα 2.3: Η έννοια της προσαρμογής ενός μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα, με σύγκριση των προσομοιωμένων (συνεχής γραμμή) και παρατηρημένων αποκρίσεων.

Στο σημείο αυτό οφείλουμε να επισημάνουμε ότι η επιστημονική κοινότητα εμφανίζεται αρκετά επιφυλακτική, όσον αφορά στην καταλληλότητα του όρου «παράμετρος» για τις σταθερές εισόδου των μοντέλων φυσικής βάσης. Αρκετοί υποστηρίζουν ότι πρόκειται για πραγματικές ιδιότητες του φυσικού συστήματος, που μπορούν να γίνουν γνωστές από πληροφορίες πεδίου. Κατά κανόνα όμως, οι πληροφορίες αυτές είτε δεν είναι διαθέσιμες είτε προέρχονται από σημειακές μετρήσεις, που εξαιτίας της έντονης χωρικής ανομοιογένειας των χαρακτηριστικών της λεκάνης δεν είναι εφικτό να αναχθούν στη χωρική κλίμακα του μοντέλου, οσοδήποτε μικρή και αν είναι αυτή (ακόμη και τα πιο λεπτομερή καταναμημένα σχήματα θεωρούν χωρική διακριτότητα όχι μικρότερη των μερικών στρεμμάτων). Η περιορισμένη, λοιπόν, χωρική πληροφορία οδηγεί σε μια υβριδική προσέγγιση, στην οποία η εκτίμηση ορισμένων τουλάχιστον χαρακτηριστικών μεγεθών, που υποτίθεται ότι αντιπροσωπεύουν μετρήσιμες ιδιότητες του φυσικού συστήματος, γίνεται με τις ίδιες τεχνικές που εφαρμόζονται στα εννοιολογικά μοντέλα, θεωρώντας τα εν λόγω χαρακτηριστικά ως (άγνωστες) παραμέτρους προς βελτιστοποίηση. Με μια τέτοια, ωστόσο, στρατηγική αναιρείται ο χαρακτηρισμός του μοντέλου ως φυσικής βάσης, αφού αν έστω και μία παράμετρος του εκτιμάται μέσω βαθμονόμησης, τότε αυτή δεν αντιπροσωπεύει πλέον κάποιο φυσικό μέγεθος, και η όλη προσέγγιση χαρακτηρίζεται ως εννοιολογική (Mroczkowski *et al.*, 1997).

Παρόμοια με τα μοντέλα φυσικής βάσης, έτσι και στα μοντέλα τύπου «μαύρου κουτιού», όπως τα νευρωνικά δίκτυα, δεν είναι γενικά αποδεκτή η χρήση του όρου παράμετρος. Μάλιστα, οι εν λόγω

προσεγγίσεις συχνά αναφέρονται και ως *μη παραμετρικές* (non-parametric), σε αντιδιαστολή με τα εννοιολογικά μοντέλα τα οποία θεωρούνται εξ ορισμού παραμετρικά. Θεωρούμε ότι η παραπάνω διάκριση δίνει μια εσφαλμένη εικόνα, καθώς και οι δύο κατηγορίες μοντέλων προσαρμόζονται ή αλλιώς «ωθούνται» από τις διαθέσιμες πληροφορίες (στην ξένη ορολογία χρησιμοποιείται ο σχετικός όρος *data-driven*), και δεν υπάρχει άλλος τρόπος υπόθεσης ή, πολύ περισσότερο, απευθείας μέτρησης των χαρακτηριστικών μεγεθών τους.

2.3.2 Χειρισμός του προβλήματος

Έστω \mathbf{h} η *προσδιοριστική* υπολογιστική διαδικασία που υλοποιεί το μοντέλο προσομοίωσης μιας υδρολογικής λεκάνης (εννοιολογικό ή φυσικής βάσης), και περιέχει n το πλήθος *βαθμούς ελευθερίας*. Έστω \mathbf{s}_0 οι αρχικές και οριακές συνθήκες του μοντέλου, \mathbf{x} οι χρονοσειρές φόρτισης, που είναι διαθέσιμες για χρονικό ορίζοντα T , και \mathbf{y} οι χρονοσειρές των παρατηρημένων αποκρίσεων του συστήματος, για τον ίδιο χρονικό ορίζοντα. Αν $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ είναι ένα δεδομένο σύνολο τιμών των παραμέτρων του μοντέλου, τότε από την (2.1) παράγεται ένα σύνολο τιμών \mathbf{y}' που αναπαριστά την πραγματική απόκριση του συστήματος, \mathbf{y} . Η τελευταία αφορά είτε σε μια μεμονωμένη υδρολογική μεταβλητή σε συγκεκριμένη θέση της λεκάνης (π.χ. απορροή εξόδου) ή σε πολλές μεταβλητές (διεργασίες), σε διάφορες θέσεις.

Ως βαθμονόμηση νοείται ο εντοπισμός των πλέον πρόσφορων τιμών των παραμέτρων $\boldsymbol{\theta}$, με τις οποίες εξασφαλίζεται η όσο το δυνατό πιο πιστή προσαρμογή των αποκρίσεων του μοντέλου \mathbf{y}' στις αντίστοιχες παρατηρήσεις (μετρήσεις) \mathbf{y} , μέσω μιας διαδικασίας δοκιμής-σφάλματος (trial and error). Συνεπώς, η βαθμονόμηση προϋποθέτει τη σύγκριση των προσομοιωμένων αποκρίσεων της λεκάνης σε σχέση με τις παρατηρημένες, με βάση κάποιο ποσοτικό, ποιοτικό ή εμπειρικό κριτήριο αξιολόγησης της επίδοσης του μοντέλου. Εξετάζοντας διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων $\boldsymbol{\theta}$, επιλέγεται εκείνος ο συνδυασμός $\boldsymbol{\theta}^*$ που επιτυγχάνει την καλύτερη (σύμφωνα με το κριτήριο που υιοθετείται) προσαρμογή στις μετρήσεις. Ο χειρισμός του προβλήματος γίνεται με τους εξής τρόπους:

Εμπειρική βαθμονόμηση: Πρόκειται για χειρωνακτική, και συνεπώς όχι αυστηρά συστηματική διαδικασία, που βασίζεται στη διερεύνηση εναλλακτικών συνδυασμών παραμέτρων που επιλέγει, σύμφωνα με την κρίση και εμπειρία του, ο μελετητής. Η τελική επιλογή των παραμέτρων γίνεται ελέγχοντας «με το μάτι» την προσαρμογή του μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα. Αν και η εμπειρική μέθοδος είναι μη αντικειμενική (αφού η επιλογή δεν βασίζεται σε κάποιο αριθμητικό κριτήριο σφάλματος) και εξαιρετικά επίπονη (ιδιαίτερα όταν ο αριθμός των παραμέτρων είναι σχετικά μεγάλος), εφαρμόζεται ακόμη και σήμερα από ορισμένους υδρολόγους. Αυτό γίνεται με το σκεπτικό ότι η εν λόγω διαδικασία ενσωματώνει την υδρολογική εμπειρία, οδηγώντας έτσι σε τιμές παραμέτρων που είναι ρεαλιστικές και αντιπροσωπευτικές των φυσικών χαρακτηριστικών της λεκάνης (γενικά, του αντίστοιχου χωρικού επιπέδου παραμετροποίησης).

Αυτόματη βαθμονόμηση: Διατυπώνεται ένα μέτρο καλής προσαρμογής των προσομοιωμένων σε σχέση με τις παρατηρημένες αποκρίσεις της λεκάνης, το οποίο θεωρείται ως η στοχαστική συνάρτηση ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης, με μεταβλητές ελέγχου τις παραμέτρους του μοντέλου. Η τελική επιλογή των παραμέτρων προκύπτει ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Το προφανές πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ευκολία και η αντικειμενικότητά της, ενώ το κύριο μειονέκτημά της είναι η πλήρης εξάρτηση των αποτελεσμάτων από το μέτρο προσαρμογής που χρησιμοποιείται, τα σφάλματα που μεταφέρονται από τα δεδομένα, τις υπολογιστικές αδυναμίες της διαδικασίας αναζήτησης και άλλες πηγές αβεβαιότητας. Για τους παραπάνω λόγους, σε ορισμένες περιπτώσεις ένα υδρολογικό μοντέλο, παρόλο που δείχνει να προσαρμόζεται ικανοποιητικά στις μετρήσεις, στην πραγματικότητα μπορεί να λειτουργεί υπό μορφή «μαύρου κουτιού», με παραμέτρους που δεν έχουν φυσικό νόημα και χωρίς να μπορεί να αναπαράξει όλο το επιθυμητό φάσμα των δυνατών αποκρίσεων της λεκάνης.

Ημιαυτόματη βαθμονόμηση: Πρόκειται για μια διαδραστική μέθοδο, βάσει της οποίας ο μελετητής παρακολουθεί την πορεία της βελτιστοποίησης και επεμβαίνει σε αυτή, μεταβάλλοντας τα κριτήρια και τις υποθέσεις του προβλήματος, ώστε να κατευθύνει την πορεία αναζήτησης προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα της εμπειρικής και αυτόματης βαθμονόμησης, και θεωρείται ως η πλέον πρόσφορη, ιδιαίτερα στην περίπτωση των σύνθετων σχημάτων, στα οποία είναι και πιο έντονη η αβεβαιότητα στην εκτίμηση των παραμέτρων, λόγω της ύπαρξης πολλών ισοδύναμα καλών λύσεων (Boyle *et al.*, 2000· Mazi *et al.*, 2004· Efstratiadis *et al.*, 2008).

Ανεξάρτητα από τη στρατηγική που υιοθετείται, η βαθμονόμηση ενός υδρολογικού μοντέλου κρίνεται αξιόπιστη εφόσον:

(α) το μοντέλο διαθέτει επαρκή προγνωστική ικανότητα, δηλαδή μπορεί να αναπαράξει όλο το φάσμα των αποκρίσεων μιας λεκάνης, με ικανοποιητική ακρίβεια·

(β) στις βελτιστοποιημένες παραμέτρους του μοντέλου μπορεί να αποδοθεί κάποιο φυσικό νόημα, ώστε να θεωρηθούν συμβατές με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος.

Πρόκειται για δύο θεμελιώδεις απαιτήσεις, που εξασφαλίζουν ότι το μοντέλο αναπαριστά με συνέπεια τους υδρολογικούς μηχανισμούς της λεκάνης, και, συνεπώς, το πεδίο εφαρμογής του δεν περιορίζεται στο διάστημα που υπάρχουν ιστορικές παρατηρήσεις (βάσει των οποίων έχει γίνει η προσαρμογή των παραμέτρων του) αλλά επεκτείνεται για οποιοδήποτε χρονικό ορίζοντα, είτε στο παρελθόν είτε στο μέλλον. Είναι προφανές ότι αυτό προϋποθέτει ότι τα ιστορικά δείγματα φορτίσεων και αποκρίσεων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου είναι αντιπροσωπευτικά της υδρολογικής διαίτας της λεκάνης.

2.3.3 Μαθηματικό πλαίσιο αυτόματης βαθμονόμησης

Η αυτόματη βαθμονόμηση ενός υδρολογικού μοντέλου μπορεί να διατυπωθεί μαθηματικά ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης της μορφής:

$$\text{minimize } \mathbf{e}(\boldsymbol{\theta}) = [e_1(\boldsymbol{\theta}), e_2(\boldsymbol{\theta}), \dots, e_T(\boldsymbol{\theta})], \boldsymbol{\theta} \in \Theta \quad (2.2)$$

όπου \mathbf{e} διάνυσμα σφάλματος ή αλλιώς *υπόλοιπο* (residual) του μοντέλου, που ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρημένων αποκρίσεων, ήτοι $\mathbf{e} = \mathbf{y}' - \mathbf{y}$, και $\Theta \subset \mathcal{R}^l$ ο εφικτός χώρος. Συνήθως, ο χώρος Θ ορίζεται από δύο διανύσματα ακραίων τιμών $\boldsymbol{\theta}_{\min}$ και $\boldsymbol{\theta}_{\max}$, τα οποία εκφράζουν τα επιτρεπόμενα όρια διακύμανσης των τιμών των παραμέτρων (μαθηματικά όρια ή όρια που προκύπτουν με βάση τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και την υδρολογική εμπειρία).

Το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι πολυκριτηριακό, δεδομένου ότι η συνάρτηση (2.2) είναι διανυσματική, και μάλιστα όχι καλώς ορισμένο, τόσο λόγω του εξαιρετικά μεγάλου αριθμού των υπολοίπων όσο και επειδή αυτά είναι ισχυρά συσχετισμένα (Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2009). Για το λόγο αυτό, στην απλούστερη περίπτωση, διατυπώνεται μια ενιαία αριθμητική έκφραση που περιγράφει ένα καθολικό μέτρο *καλής προσαρμογής* (goodness-of-fit) του μοντέλου στις μετρημένες αποκρίσεις \mathbf{y} , οπότε προκύπτει ένα ισοδύναμο βαθμωτό πρόβλημα της μορφής:

$$\text{maximize } g(\boldsymbol{\theta}), \boldsymbol{\theta} \in \Theta \quad (2.3)$$

Το παραπάνω συνιστά ένα τυπικό πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης, το οποίο επιλύεται με κατάλληλες τεχνικές που συνήθως βασίζονται στους εξελκτικούς αλγορίθμους. Η προσέγγιση αυτή αποσκοπεί στην εύρεση ενός καθολικά βέλτιστου συνόλου παραμέτρων $\boldsymbol{\theta}^*$, και βασίζεται στην τυπική στατιστική θεώρηση περί της προσαρμογής εμπειρικών μοντέλων σε μετρήσεις (Gupta *et al.*, 1998).

Συνοψίζοντας, η αυτόματη βαθμονόμηση ενός μοντέλου περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1: Επιλέγονται οι παράμετροι (μεταβλητές ελέγχου) του μοντέλου, $\boldsymbol{\theta}$.

Βήμα 2: Επιλέγεται ένα δείγμα παρατηρήσεων ως προς τις αποκρίσεις \mathbf{y} , για χρονικό ορίζοντα T , που θεωρείται αντιπροσωπευτικό της υδρολογικής δίαιτας του φυσικού συστήματος.

Βήμα 3: Διαμορφώνεται ένα βαθμωτό μέτρο προσαρμογής g μεταξύ των προσομοιωμένων, \mathbf{y}' , και των παρατηρημένων, \mathbf{y} , χρονοσειρών απόκρισης.

Βήμα 4: Ορίζεται το πεδίο αναζήτησης Θ των παραμέτρων.

Βήμα 5: Με εφαρμογή μια συστηματικής διαδικασίας (αλγόριθμου) μη γραμμικής βελτιστοποίησης, εντοπίζονται οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων, $\boldsymbol{\theta}^*$.

Στο εδάφιο 10.3.2 περιγράφεται ο αλγόριθμος που έχει ενσωματωθεί στην ΥΔΡΟΓΕΙΟ, και είναι κατάλληλος για έντονα μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης, όπως είναι η βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων.

2.3.4 Επαλήθευση μοντέλων

Γενικά, με τον όρο *επαλήθευση* (validation) νοείται μια διαδικασία αξιολόγησης μοντέλων, ώστε να διαπιστωθεί αν αποτελούν αντιπροσωπευτικές αναπαραστάσεις του συστήματος που προσομοιώνουν.

Παραδοσιακά, η επαλήθευση ενός υδρολογικού μοντέλου γίνεται για το βέλτιστο σύνολο παραμέτρων που έχει προκύψει από τη βαθμονόμηση, ελέγχοντας το ίδιο κριτήριο προσαρμογής για μια άλλη (κατά κανόνα μεταγενέστερη της βαθμονόμησης) χρονική περίοδο, για την οποία επίσης διατίθενται μετρημένες φορτίσεις και αποκρίσεις της λεκάνης. Η προσέγγιση είναι γνωστή ως *διαχωρισμός δεδομένων* (data-split), και για να έχει νόημα θα πρέπει τα χαρακτηριστικά του συστήματος να έχουν διατηρηθεί αμετάβλητα για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα ελέγχου του μοντέλου (περίοδοι βαθμονόμησης και επαλήθευσης μαζί). Διαφορετικά, οι παράμετροι πρέπει να θεωρηθούν διαχρονικά μεταβαλλόμενες, γεγονός που περιορίζει δραστικά την επιχειρησιακή χρησιμότητα του μοντέλου.

Τονίζεται ότι μια επιτυχής βαθμονόμηση δεν συνεπάγεται απαραίτητα επιτυχή επαλήθευση του μοντέλου. Πράγματι, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες παρατηρείται πολύ καλή προσαρμογή ενός υδρολογικού μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα κατά την περίοδο βαθμονόμησης, ενώ αντίθετα κατά την περίοδο επαλήθευσης η επίδοση του μοντέλου με βάση το ίδιο κριτήριο (στοχική συνάρτηση) είναι κατά πολύ χαμηλότερη. Με την προϋπόθεση της μονιμότητας, αυτό υποδηλώνει εμφανώς ότι οι βελτιστοποιημένες παράμετροι του μοντέλου δεν αντιπροσωπεύουν χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος (έστω και σε μακροσκοπική κλίμακα), αλλά το μοντέλο λειτουργεί ως «μαύρο» κουτί, υλοποιώντας μη γραμμικούς μετασχηματισμούς, χωρίς φυσικό νόημα. Έτσι, ενώ από τη διαδικασία βελτιστοποίησης έχει εντοπιστεί ένα σύνολο παραμέτρων που φαίνεται ότι αναπαριστά πολύ καλά τις παρατηρημένες αποκρίσεις της περιόδου βαθμονόμησης, το μοντέλο δεν αναπαράγει τις ανεξάρτητες αποκρίσεις μιας άλλης χρονικής περιόδου. Το φαινόμενο αναφέρεται και ως *υπερ-προσαρμογή* (overfitting) του μοντέλου, και αποτελεί ένα από τα πλέον προβληματικά ζητήματα σχημάτων με μεγάλο αριθμό βαθμών ελευθερίας, όπως τα νευρωνικά δίκτυα.

Ορισμένοι ερευνητές πιστεύουν ότι η παραδοσιακή προσέγγιση, που βασίζεται στον διαχωρισμό των δεδομένων, δεν αποτελεί ιδιαίτερα αξιόπιστη πρακτική για την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας ενός μοντέλου (Klemeš, 1986). Επιπλέον, πιστεύουν ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ισχυρό τεστ για την αξιολόγηση μοντέλων με καταναμημένη δομή (Refsgaard and Knudsen, 1996). Γενικά, το ζήτημα της ανάπτυξη εύρωστων διαδικασιών ελέγχου για την αξιολόγησης μοντέλων αποτελεί ανοιχτό ζήτημα έρευνας στην υδρολογία (Andréassian *et al.*, 2009).

2.4 Πολυκριτηριακή βαθμονόμηση

2.4.1 Γενικά

Η κλασική διαδικασία αυτόματης βαθμονόμησης αποσκοπεί στην προσαρμογή των προσομοιωμένων αποκρίσεων σε ένα δείγμα παρατηρήσεων πεδίου, με βάση ένα καθολικό κριτήριο επίδοσης, που αντιστοιχεί στη στοχική συνάρτηση ενός προβλήματος ολικής βελτιστοποίησης. Καταδεικνύεται ότι μια τέτοια προσέγγιση δεν εξασφαλίζει επαρκή προγνωστική ικανότητα του μοντέλου, γεγονός που οφείλεται σε ένα πλήθος αβεβαιοτήτων που αλληλεπιδρούν κατά τρόπο ανεξέλεγκτο. Ορισμένες είναι εγγενείς (π.χ. σφάλματα δεδομένων), άλλες όμως μπορούν να ελεγχθούν και να περιοριστούν κατά τη διατύπωση του μοντέλου (π.χ. παραμετροποίηση). Η αβεβαιότητα συνδέεται με την έννοια της *ισοδυναμίας* (equifinality), που υποδηλώνει ότι μοντέλα διαφορετικής δομής ή με διαφορετικές τιμές παραμέτρων μπορούν να παράξουν εξίσου αποδεκτές αποκρίσεις (Beven and Binley, 1992· Beven and Freer, 2001).

Οι σύγχρονες εξελίξεις στις υδρολογικές επιστήμες υποδεικνύουν ότι, κατά τη βαθμονόμηση ενός μοντέλου, είναι ουσιαστικό να λαμβάνονται υπόψη πολλαπλά κριτήρια προσαρμογής, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές παρατηρημένες αποκρίσεις ή/και σε διαφορετικές όψεις της ίδιας απόκρισης. Η αλγοριθμική αντιμετώπιση του προβλήματος γίνεται μέσω εργαλείων διανυσματικής (πολυκριτηριακής) βελτιστοποίησης, τα οποία αναζητούν εναλλακτικές λύσεις που αντιστοιχούν σε διαφορετικούς συμβιβασμούς μεταξύ των κριτηρίων αντί μιας ολικά βέλτιστης λύσης. Στο εδάφιο 2.4.2 δίνονται οι βασικοί ορισμοί της σχετικής θεωρίας, ενώ στο εδάφιο 2.4.3 εξετάζεται η εφαρμογή της στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων.

2.4.2 Θεμελιώδεις έννοιες πολυκριτηριακής ανάλυσης

Ζητείται η βελτιστοποίηση της διανυσματικής συνάρτησης $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})]$, με πεδίο ορισμού \mathcal{X} , η οποία περιλαμβάνει m κριτήρια. Σε τέτοιου είδους προβλήματα, στα οποία μάλιστα τα κριτήρια είναι αντικρουόμενα ή δεν αποτιμώνται στην ίδια μονάδα μέτρησης, δεν είναι δυνατή η αντικειμενική σύγκριση εναλλακτικών λύσεων με βάση ένα βαθμωτό μέτρο επίδοσης. Αν υποθεθούν δύο εφικτά 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:

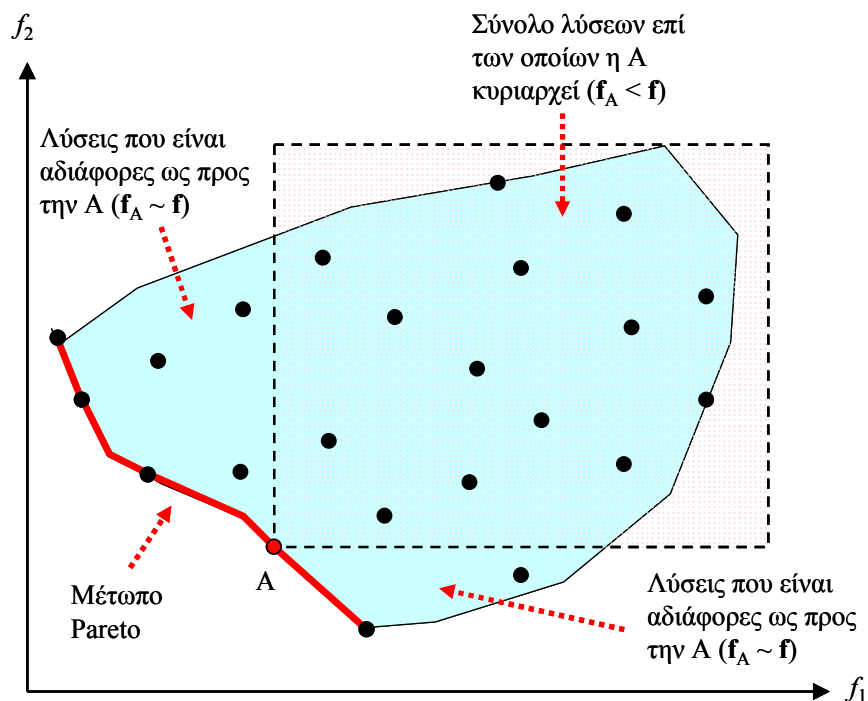
- Το \mathbf{a} κυριαρχεί ισχυρώς ως προς το \mathbf{b} αν ισχύει $f_i(\mathbf{a}) < f_i(\mathbf{b})$ για κάθε κριτήριο $i \leq m$
- Το \mathbf{a} κυριαρχεί ασθενώς ως προς το \mathbf{b} αν ισχύει $f_i(\mathbf{a}) \leq f_i(\mathbf{b})$ για κάθε κριτήριο $i \leq m$ (2.4)
- Το \mathbf{a} είναι αδιάφορο 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 (διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου) ως βέλτιστης, σύμφωνα με τους ακόλουθους ισοδύναμους ορισμούς:

Ένα εφικτό διάνυσμα $\mathbf{x}^* \in X$ είναι βέλτιστο εφόσον υπάρχει κανένα άλλο εφικτό διάνυσμα $\mathbf{x} \in X$, τέτοιο ώστε $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{f}(\mathbf{x}^*)$.

Ένα εφικτό διάνυσμα $\mathbf{x}^* \in X$ είναι βέλτιστο αν δεν υπάρχει άλλο εφικτό διάνυσμα $\mathbf{x} \in X$ που να μπορεί να βελτιώσει κάποιο κριτήριο f_i , χωρίς ταυτόχρονα να χειροτερέψει τουλάχιστον ένα άλλο κριτήριο f_j .

Οι παραπάνω ορισμοί συνεπάγονται ότι σε ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης υπάρχουν άπειρες (εφόσον το πεδίο ορισμού X είναι συνεχές) βέλτιστες λύσεις, που περιγράφουν πρόσφορους συμβιβασμούς μεταξύ των κριτηρίων. Οι λύσεις αυτές ονομάζονται *βέλτιστες Pareto* 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 2.4. Τα σημεία που ανήκουν στο μέτωπο Pareto μιας διανυσματικής συνάρτησης θεωρούνται μαθηματικά ισοδύναμα. Στην πράξη, εφόσον απαιτείται η επιλογή μιας μοναδικής λύσης, προκύπτει η ανάγκη προσδιορισμού της *καλύτερα συμβιβαστικής* (best-compromise) εξ αυτών, είτε κατά την κρίση του αναλυτή ή με τη διατύπωση ενός βαθμωτού μέτρου συνάθροισης των κριτηρίων, το οποίο καλείται *συνάρτηση χρησιμότητας* (utility function).



Σχήμα 2.4: Απεικόνιση της έννοιας της κυριαρχίας και του μετώπου Pareto σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο κριτηρίων (Ευστρατιάδης, 2008).

Στην κλασική προσέγγιση του προβλήματος, επιδιώκεται η εύρεση μιας μεμονωμένης λύσης, βελτιστοποιώντας τη στοχική συνάρτηση ενός ισοδύναμου μονοκριτηριακού προβλήματος, που ταυτίζεται με τη συνάρτηση χρησιμότητας του αρχικού. Τα χαρακτηριστικά της εν λόγω λύσης εκφράζονται με τη μορφή βαρών, τιμών-στόχων ή προτεραιοτήτων, που προσδιορίζονται εκ των προτέρων (πριν από τη βελτιστοποίηση), με τρόπο υποκειμενικό/εμπειρικό. Διαφοροποιώντας τη διατύπωση του μετασχηματισμένου προβλήματος και επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία αναζήτησης, είναι δυνατός ο εντοπισμός εναλλακτικών μη κατώτερων λύσεων. Από την άλλη πλευρά, η σύγχρονη αλγοριθμική προσέγγιση βασίζεται στη χρήση εξελικτικών τεχνικών, μέσω των οποίων επιδιώκεται ο ταυτόχρονος εντοπισμός ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος μη κατωτέρων λύσεων. Η αναζήτηση των λύσεων προϋποθέτει τη διαμόρφωση μιας σύνθετης συνάρτησης καταλληλότητας, η οποία κατά κανόνα περιλαμβάνει δύο συνιστώσες:

- ένα μέτρο κυριαρχίας, με το οποίο κάθε υποψήφια λύση κατατάσσεται/ ταξινομείται με βάση τη σχετική της θέση στο πεδίο αποτίμησης, εξασφαλίζοντας σύγκλιση του πληθυσμού προς το μέτωπο Pareto.
- ένα μέτρο διασποράς, που ευνοεί την επιλογή λύσεων που έχουν μικρότερη πυκνότητα πληθυσμού στη γειτονιά τους, εξασφαλίζοντας μια ομοιόμορφη κατανομή του τελικού δείγματος στο μέτωπο Pareto.

Στο εδάφιο 10.3.3 περιγράφεται ο πολυκριτηριακός εξελικτικός αλγόριθμος που έχει ενσωματωθεί στην ΥΔΡΟΓΕΙΟ, και είναι κατάλληλος για προβλήματα βαθμονόμησης υδρολογικών μοντέλων.

2.4.3 Προσαρμογή υδρολογικών μοντέλων σε πολλαπλά κριτήρια

Η πολυετής ενασχόληση με το ζήτημα της εκτίμησης των παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων έχει καταλήξει στο ξεκάθαρο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει συγκεκριμένη στοχική συνάρτηση που να είναι αντικειμενικά πιο ταιριαστή για ένα πρόβλημα βαθμονόμησης, σε σύγκριση με κάποια άλλη (Diskin and Simon, 1977· Sorooshian *et al.*, 1983· Yapo *et al.*, 1996). Η επιλογή της στοχικής συνάρτησης του προβλήματος βαθμονόμησης, ήτοι του κριτηρίου καλής προσαρμογής του μοντέλου, αποσκοπεί στην αναπαραγωγή της στατιστικής δομής των σφαλμάτων των μεταβλητών εξόδου (π.χ. αν ακολουθούν κατανομή Gauss, ενδείκνυται η χρήση μέτρων τετραγωνικού σφάλματος). Ωστόσο, στην προσέγγιση αυτή δεν λαμβάνονται υπόψη οι υπόλοιπες πηγές αβεβαιοτήτων, και κυρίως τα εγγενή σφάλματα του μοντέλου, τα οποία, εξαιτίας της έντονης μη γραμμικότητας και της αλληλεπίδρασης των σχετικών διεργασιών, δεν ακολουθούν κάποια τυπική στατιστική κατανομή. Στην πραγματικότητα, αφού δεν μπορεί να υπάρξει μια στατιστικά συνεπής επιλογή της συνάρτησης προσαρμογής, δεν μπορεί, συνακόλουθα, να υπάρξει και μια στατιστικά ορθή επιλογή του ολικά βέλτιστου συνόλου παραμέτρων (Gurta *et al.*, 1998). Εξάλλου, η υδρολογική κοινότητα έχει αποδεχθεί, στην πλειονότητά της, την αρχή της ισοδυναμίας, αναγνωρίζοντας ότι μπορούν να υπάρξουν πολλαπλές δομές μοντέλων ή

πολλαπλοί συνδυασμοί παραμέτρων για κάθε δομή, που να αναπαράγουν εξίσου ικανοποιητικά τις διαφορετικές πτυχές των αποκρίσεων ενός φυσικού συστήματος. Η διαπίστωση αυτή είναι συμβατή τη θεμελιώδη έννοια της κυριαρχίας, όπως διατυπώνεται στη θεωρία διανυσματικής βελτιστοποίησης (Ευστρατιάδης, 2008).

Όπως εξηγείται στο εδάφιο 2.3.3, στην αρχική διατύπωση του προβλήματος βαθμονόμησης (εξ. 2.2), διαμορφώνεται μια διανυσματική στοχική συνάρτηση, στην οποία αντιστοιχεί μία συνιστώσα για κάθε όρο σφάλματος, $e_i = y_i - y_i'$. Κατά συνέπεια, ζητούμενο του προβλήματος είναι η ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της απόκλισης κάθε παρατηρημένης από κάθε προσομοιωμένη τιμή μίας ή περισσότερων μεταβλητών. Δεδομένου, ωστόσο, ότι το μοντέλο είναι ένας ατελής προσομοιωτής του συστήματος, δεν υπάρχει μια ολικά βέλτιστη λύση τέτοια που να ελαχιστοποιεί ταυτόχρονα όλους τους όρους σφάλματος. Αντίθετα, υπάρχουν άπειροι συνδυασμοί που είναι βέλτιστοι κατά Pareto, και έχουν ως χαρακτηριστικό την επιδείνωση ενός τουλάχιστον όρου της συνάρτησης, δεδομένης της βελτίωσης ενός άλλου όρου. Η μαθηματική αυτή ερμηνεία τεκμηριώνει την εμπειρική διαπίστωση ότι προκειμένου να περιγραφούν καλύτερα κάποια χαρακτηριστικά μιας παρατηρημένης απόκρισης (π.χ. υδρογράφημα λεκάνης), έστω και με μικρή μεταβολή των τιμών των παραμέτρων, «χαλάνε», αναγκαστικά, κάποια άλλα.

Πρακτικοί λόγοι καθιστούν αναγκαία την σημαντική απλοποίηση του προβλήματος (2.2), καθώς με την εισαγωγή ενός πολύ μεγάλου αριθμού κριτηρίων (ίσου με τον πλήθος των υπολοίπων του μοντέλου) και μάλιστα ισχυρά συσχετισμένων στατιστικά, οδηγούμαστε σε ένα ακραία εκτεταμένο μέτωπο Pareto, κάτι που δεν βοηθά στην ερμηνεία της συμπεριφοράς του μοντέλου ούτε στη λήψη αποφάσεων, με σκοπό τον εντοπισμό μιας συμβιβαστικής λύσης για την παραγωγή προγνώσεων. Κατά συνέπεια, αντί της γενικευμένης διατύπωσης που επιδιώκει τον διακριτό χειρισμό όλων των όρων σφάλματος, κρίνεται πιο πρόσφορη μια ενοποιημένη διατύπωση, της μορφής:

$$\text{maximize } \mathbf{g}[\mathbf{e}(\boldsymbol{\theta})] = \{g_1[\mathbf{e}(\boldsymbol{\theta})], \dots, g_m[\mathbf{e}(\boldsymbol{\theta})]\}, \boldsymbol{\theta} \in \Theta \quad (2.5)$$

όπου $g_i[\mathbf{e}(\boldsymbol{\theta})]$ κριτήρια καλής προσαρμογής, στα οποία συναθροίζονται οι επιμέρους όροι σφάλματος, είτε συνολικά είτε κατά ομάδες, που είναι (κατά προσέγγιση έστω) ανεξάρτητα. Τα κριτήρια μπορούν να αναφέρονται στις ακόλουθες συνιστώσες, για τις οποίες διατυπώνονται κατάλληλα στατιστικά μέτρα επίδοσης (Madsen, 2003):

- σε πολλαπλές μεταβλητές απόκρισης (π.χ. απορροή, στάθμη υπόγειου νερού, ύψος εδαφικής υγρασίας, συγκέντρωση ρύπων).
- σε πολλαπλά χαρακτηριστικά κάθε μεμονωμένης απόκρισης (διατήρηση του υδατικού ισοζυγίου, αναπαραγωγή αιχμών, αναπαραγωγή χαμηλών τιμών, κτλ.).
- σε πολλαπλές θέσεις μέτρησης μιας μεμονωμένης απόκρισης.

Η παραπάνω προσέγγιση αποκτά ιδιαίτερη σημασία για τα σύνθετα (ημικατανεμημένα και πλήρως κατανεμημένα) υδρολογικά μοντέλα, τα οποία οφείλουν να εξασφαλίζουν συμβατότητα μεταξύ των κριτηρίων προσαρμογής τους και του (αναγκαστικά) μεγάλου πλήθους των παραμέτρων των. Ωστόσο, η προσαρμογή ενός μοντέλου σε πολλαπλές αποκρίσεις δεν προϋποθέτει, κατ' ανάγκη, την ύπαρξη συστηματικών μετρήσεων για όλες τις εν λόγω μεταβλητές. Αρκούν λίγες μετρήσεις ή και χονδρικές εκτιμήσεις μέσω μεγεθών και της διαχρονικής τους διακύμανσης, βασιζόμενες στην εμπειρία του μελετητή, που μπορούν να εισαχθούν σε ένα πολυκριτηριακό πλαίσιο, αυξάνοντας την πληροφορία που εισάγεται στη διαδικασία βαθμονόμησης των παραμέτρων και συμβάλλοντας, τελικά, στον δραστικό περιορισμό των αβεβαιοτήτων (Efstratiadis *et al.*, 2008). Πρόκειται για μια εξαιρετικά σημαντική στρατηγική, που αποσκοπεί στην ενσωμάτωση πολύ περισσότερων κριτηρίων από όσα επιτρέπουν οι, κατά κανόνα, περιορισμένες μετρητικές υποδομές μιας λεκάνης. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία στα σχήματα πολλών βαθμών ελευθερίας, για τα οποία επιβάλλεται αντίστοιχα μεγάλος αριθμός κριτηρίων προσαρμογής. Ο όρος που χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία για να περιγράψει τα εν λόγω μη συμβατικά κριτήρια είναι «μαλακή πληροφορία» (soft data· Seibert and McDonnell, 2002).

Με αφετηρία τις πρωτοποριακές εργασίες των Gupta *et al.* (1998) και Kuczera and Mroczkowski (1998), η πολυκριτηριακή βαθμονόμηση αποτελεί, εδώ και περισσότερο από μια δεκαετία, ένα από τα αντικείμενα αιχμής της υδρολογίας. Οι αρχικές έρευνες εστίασαν σε αδιαμέριστα μοντέλα βροχής-απορροής, ενώ στη συνέχεια επεκτάθηκαν σε ημικατανεμημένα και πλήρως κατανεμημένα σχήματα, στα οποία βελτιστοποιήθηκε, κατά κανόνα, ένα μικρό ποσοστό των παραμέτρων τους (Madsen, 2003· Ajami *et al.*, 2004· Muleta and Nicklow, 2005· Vrugt *et al.*, 2005· Kunstmann *et al.*, 2006). Η χωρική κλίμακα των βιβλιογραφικών εφαρμογών ποικίλει από πειραματικές λεκάνες λίγων εκταρίων (Seibert and McDonnell, 2002· Meixner *et al.*, 2002· Tang *et al.*, 2006) έως πολύ μεγάλα υδροσυστήματα, έκτασης χιλιάδων km² (Schoups *et al.*, 2005· Cheng *et al.*, 2005· Engeland *et al.*, 2006· Feyen *et al.*, 2008). Συνήθως εξετάζονται δύο ή τρία κριτήρια, ενώ σε ορισμένες εργασίες ελέγχεται μεγαλύτερος αριθμός κριτηρίων, στα οποία περιλαμβάνονται από τυπικές στατιστικές συναρτήσεις προσαρμογής έως εμπειρικά ή ασαφή (fuzzy) μέτρα (Cheng *et al.*, 2002· Schoops *et al.*, 2005· Parajka *et al.*, 2007· Efstratiadis *et al.*, 2008· Moussa and Chahinian, 2009). Σε ορισμένες περιπτώσεις, δίνεται έμφαση στη συγκριτική αξιολόγηση της επίδοσης των πλέον εξελιγμένων αλγοριθμικών σχημάτων (Tang *et al.*, 2006, 2007). Μια ολοκληρωμένη επισκόπηση του αντικειμένου της πολυκριτηριακής βαθμονόμησης, με παράθεση χαρακτηριστικών εφαρμογών, γίνεται από τους Efstratiadis and Koutsoyiannis (2010).

3 Θεμελιώδεις αρχές μοντέλου Υδρόγειος

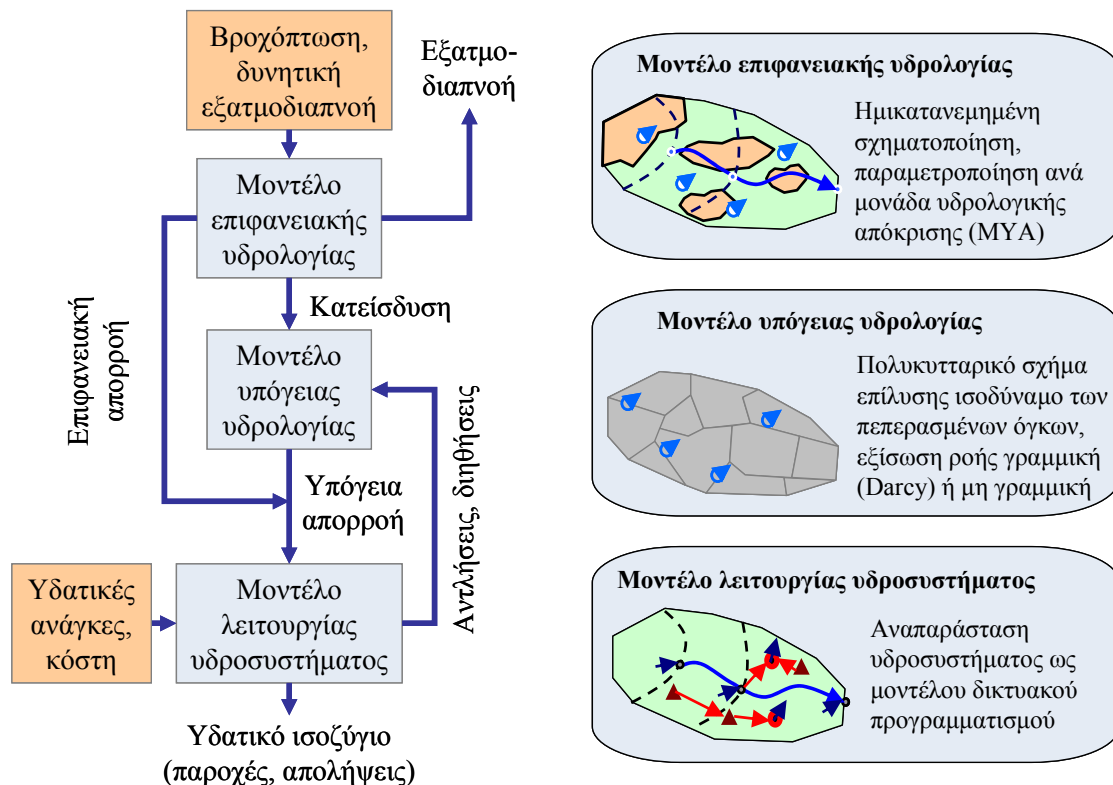
3.1 Γενική περιγραφή του μοντέλου

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. Η 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 ροές κατά μήκος του φυσικού (υδρογραφικού) και τεχνητού (έργα μεταφοράς) δικτύου και τις πραγματικές απολήψεις του υδροσυστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς των τεχνικών έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων. Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής του πλαισίου σύζευξης των τριών αυτών μοντέλων.

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) μιας λεκάνης απορροής. Οι κόμβοι τοποθετούνται κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου (στις συμβολές των κλάδων ή σε άλλα σημεία ελέγχου) και σε χαρακτηριστικές της λεκάνης, π.χ. σε θέσεις όπου πραγματοποιούνται επιφανειακές και υπόγειες απολήψεις. Συναφής προσέγγιση υιοθετείται και στην περιγραφή του πεδίου υπόγειας ροής. Συγκεκριμένα, ακολουθείται μια πολυκυτταρική χάραξη, δημιουργώντας ένα εννοιολογικό δίκτυο διασυνδεδεμένων δεξαμενών, η στάθμη των οποίων αντιστοιχεί στη μέση στάθμη του αντίστοιχου τμήματος του υδροφορέα.

Ως προς τη χρονική κλίμακα, το μοντέλο υποστηρίζει μηνιαίο ή ημερήσιο βήμα προσομοίωσης, το οποίο επιλέγεται με βάση το σκοπό της μελέτης καθώς και τη διαθεσιμότητα των υδρολογικών δεδομένων εισόδου. Το μηνιαίο βήμα ενδείκνυται για μελέτες διαχειριστικού ενδιαφέροντος, ενώ το ημερήσιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την περιγραφή πλημμυρικών φαινομένων σε μεγάλες λεκάνες, για τη συνήθη περίπτωση δεν διατίθενται επαρκή χωρικά δεδομένα βροχόπτωσης σε λεπτές χρονικές κλίμακες. Στη δεύτερη περίπτωση, για την πιστότερη αναπαράσταση των χρονισμών των πλημμυρικών παροχών, υλοποιείται ένα εμπειρικό σχήμα επιμερισμού των ημερήσιων απορροών κάθε υπολεκάνης σε υδρογραφήματα λεπτής χρονικής κλίμακας (ωριαίας), τα οποία στη συνέχεια διοδεύονται κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου, εφαρμόζοντας μοντέλα μίας (κινηματικό κύμα) ή δύο (μέθοδος Muskingum) παραμέτρων.

Το πρόγραμμα συνεργάζεται με σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας (ΣΓΠ) για την παραγωγή των γεωγραφικών δεδομένων εισόδου, κάτι που είναι σύμφωνο με τις σύγχρονες πρακτικές διεθνώς (Maidment, 1997· Jain *et al.*, 2004). Επιπλέον, χρησιμοποιεί υδρολογικά και διαχειριστικά δεδομένα εισόδου (στόχοι, περιορισμοί, κόστη), για την προσαρμογή του μοντέλου στις παρατηρημένες συνθήκες του παρελθόντος, ήτοι την εκτίμηση των παραμέτρων του μέσω τεχνικών βαθμονόμησης. Για τον σκοπό αυτό, έχει υλοποιηθεί μια αυτόματη διαδικασία, που βασίζεται σε πολλαπλά κριτήρια επίδοσης και εξελιγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής και συνοπτική περιγραφή των επιμέρους μοντέλων του λογισμικού ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ (Ευστρατιάδης, 2008).

3.2 Απαιτήσεις μαθηματικού μοντέλου

Το μαθηματικό υπόβαθρο του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ αναπτύχθηκε στη βάση των ακόλουθων απαιτήσεων (Ευστρατιάδης κ.ά., 2009α):

(1) Το μοντέλο θα αναπαριστά τον πλήρη υδρολογικό κύκλο, χωρίς διάκριση μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων νερών.

Το μοντέλο προσομοιώνει τον πλήρη υδρολογικό κύκλο, υλοποιώντας ένα συνδυαστικό σχήμα. Σε αυτό αναπαρίστανται οι κύριες διεργασίες στην επιφάνεια του εδάφους (κατακρήμνιση, κατακράτηση, άμεση απορροή, άμεση εξατμοδιαπνοή, διήθηση), στην ακόρεστη ζώνη (επιδερμική ροή, εδαφική

εξατμοδιαπνοή, κατείδυση) και στην κορεσμένη ζώνη (επιφανειακές και υπόγειες εκφορτίσεις). Με τον τρόπο αυτό, περιγράφονται ταυτόχρονα η επιφανειακή ροή στο υδρογραφικό δίκτυο και η υπόγεια ροή στον υδροφορέα, οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις (ήτοι η τροφοδοσία των υπόγειων νερών μέσω κατείδυσης και διήθησης, και η επανατροφοδοσία των ποταμών μέσω της βασικής απορροής), καθώς και οι αλληλεπιδράσεις τους με γειτονικές λεκάνες και τη θάλασσα. Τα μοντέλα επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας περιγράφονται αναλυτικά στα Κεφάλαια 5 και 6, αντίστοιχα.

(2) Στη σχηματοποίηση της λεκάνης και του υδροφορέα και τη χωρική ανάλυση των διεργασιών θα ακολουθείται μια ημικατανεμημένη προσέγγιση, με την υποστήριξη ΣΓΠ.

Η ημικατανεμημένη σχηματοποίηση επιτυγχάνεται με χωρική διακριτοποίηση της λεκάνης σε υπολεκάνες και του υδροφορέα σε κύτταρα (βλ. Κεφάλαιο 4). Οι υπολεκάνες δημιουργούνται ανάντη των σημείων ελέγχου που τοποθετεί ο χρήστης κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου, ενώ για τη σχηματοποίηση του υδροφορέα ο χρήστης χαράσσει πολυγωνικά κύτταρα που αναπαριστούν δεξαμενές υπόγειου νερού. Με εφαρμογή του επιφανειακού υδρολογικού μοντέλου, το οποίο δέχεται ως είσοδο τη βροχόπτωση και τη δυνητική εξατμοδιαπνοή κάθε υπολεκάνης, εκτιμάται η απορροή στην έξοδο αυτής, η οποία θεωρείται σημειακή εισροή στο υδρογραφικό δίκτυο, και η κατείδυση, που τροφοδοτεί τις υπόγειες δεξαμενές. Στη συνέχεια, από την επίλυση του μοντέλου υπόγειων νερών παράγονται η απορροή των πηγών (βασική ροή) και οι υπόγειες εκφορτίσεις προς γειτονικές λεκάνες ή τη θάλασσα. Η προσέγγιση αυτή παρέχει μεγάλη ευελιξία, καθώς η λεπτομέρεια της χωρικής ανάλυσης, από την οποία εξαρτάται ο υπολογιστικός φόρτος της προσομοίωσης, καθορίζεται με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα και τις ανάγκες της μελέτης. Στην απλούστερη περίπτωση, το μοντέλο λειτουργεί ως αδιαμέριστο (εισάγοντας κοινές παραμέτρους για όλη την έκταση της λεκάνης).

(3) Ως προς τη χρονική κλίμακα, το μοντέλο προσομοίωσης θα υποστηρίζει μηνιαίο και ημερήσιο βήμα υπολογισμών.

Η επιλογή του βήματος εξαρτάται από το σκοπό της μελέτης και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων. Στην περίπτωση που επιλέγεται ημερήσιο βήμα, εφαρμόζεται, κατ' επιλογή του χρήστη, ένα μοντέλο διόδευσης (βλ. απαίτηση 6.8), η λειτουργία του οποίου περιγράφεται στο Κεφάλαιο 8.

(4) Εφόσον επιλέγεται ημερήσιο βήμα προσομοίωσης, το μοντέλο θα περιγράφει τη διόδευση των ροών κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου, χρησιμοποιώντας τα ελάχιστα δεδομένα εισόδου.

Ως δεδομένα εισόδου απαιτούνται μόνο ημερήσια ύψη βροχής και ημερήσιες παρατηρήσεις παροχής κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου (συστηματικές και μη). Η χρονοσειρά μέσω ημερήσιων παροχών που παράγεται από το μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας επιμερίζεται σε ωριαίες παροχές, μέσω μια εμπειρικής τεχνικής επιμερισμού. Στη συνέχεια, γίνεται διόδευση των ωριαίων υδρογραφήματων που εισάγονται σε κάθε κόμβο του υδρογραφικού δικτύου είτε με τη μέθοδο του κινηματικού κύματος (μέτριες κλίσεις) είτε με το σχήμα διάχυσης κύματος Muskingum (ήπιες κλίσεις), εισάγοντας μόνο μία ή δύο παραμέτρους για κάθε κλάδο του δικτύου, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα του σχήματος διόδευσης συναθροίζονται στην ημερήσια κλίμακα.

(5) Η παραμετροποίηση των επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών θα είναι συνεπής με τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και του υδροφορέα.

Στο μοντέλο υιοθετείται μια προσέγγιση φυσικής βάσης, με εννοιολογική συσχέτιση των διεργασιών με τα γεωμορφολογικά και φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και του υδροφορέα. Συγκεκριμένα, για την παραμετροποίηση των επιφανειακών διεργασιών, ο χρήστης διαμορφώνει μονάδες υδρολογικής απόκρισης, ήτοι γεωγραφικές ενότητες με συναφείς γεωμορφολογικές και υδρολογικές ιδιότητες. Αυτές παράγονται μέσω του ΣΓΠ, με ένωση (union) χαρακτηριστικών επιπέδων πληροφορίας όπως γεωλογία, υδατοπερατότητα, κάλυψη γης, κλίσεις, κτλ. Όσον αφορά στην παραμετροποίηση του πεδίου ροής των υπόγειων νερών, υιοθετείται μια προσέγγιση τύπου ζωνοποίησης (zonation), με την οποία δημιουργούνται ομάδες υπόγειων κυττάρων με κοινές τιμές παραμέτρων (υδραυλική αγωγιμότητα, πορώδες), με κριτήρια τοπογραφικά, γεωλογικά και υδρογεωλογικά. Με τον τρόπο αυτό, το πλήθος των παραμέτρων του μοντέλου καθορίζεται από τον χρήστη και όχι από τη λεπτομέρεια της σχηματοποίησης, λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα που διατίθενται για τη βαθμονόμηση (μετρήσεις παροχής ποταμών και πηγών, στάθμες υπόγειου νερού). Αναλυτικότερη περιγραφή των αρχών παραμετροποίησης δίνεται στο Κεφάλαιο 4.

(6) Το μοντέλο θα υποστηρίζει ένα σχήμα διαχείρισης υδατικών πόρων, ώστε να προσαρμόζεται σε τροποποιημένες λεκάνες.

Όπως εξηγείται στο Κεφάλαιο 7, εφόσον η λεκάνη είναι τροποποιημένη, ήτοι πραγματοποιούνται απολήψεις νερού που μεταβάλλουν το ισοζύγιο των επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων, εκτός από το φυσικό σύστημα, στην Υδρόγειο αναπαριστάται και η λειτουργία των κύριων τεχνικών έργων της λεκάνης (διατάξεις εκτροπής, αρδευτικά δίκτυα, γεωτρήσεις). Η μαθηματική περιγραφή του συνολικού υδροσυστήματος γίνεται μέσω ενός δικτυακού μοντέλου, που συνδέεται με τους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου και τα υπόγεια κύτταρα για την πραγματοποίηση εκροών. Στο μοντέλο ορίζονται υδατικές ανάγκες, μοναδιαία κόστη άντλησης και μεταφοράς του νερού, προτεραιότητες και λειτουργικοί περιορισμοί, επιτρέποντας τη διερεύνηση των επιπτώσεων μιας συγκεκριμένης πολιτικής διαχείρισης στο υδατικό δυναμικό της λεκάνης (π.χ. επιπτώσεις στην επιφανειακή απορροή από την εκμετάλλευση των ανάντη γεωτρήσεων).

(7) Η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου ως προς την αναπαράσταση των παρατηρημένων χρονοσειρών θα ελέγχεται μέσω πολλαπλών κριτηρίων προσαρμογής.

Όπως εξηγείται στο Κεφάλαιο 10, η επίδοση του μοντέλου, ήτοι η καταλληλότητα της προσαρμογής του έναντι παρατηρημένων αποκρίσεων του παρελθόντος, αξιολογείται με βάση ιστορικά δεδομένα εισόδου που αναφέρονται στην ίδια χρονική περίοδο. Αυτά αφορούν σε πολλαπλές θέσεις ελέγχου (π.χ. υδρομετρικούς σταθμούς κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου), πολλαπλές διεργασίες (π.χ. παροχές υδατορευμάτων και πηγών, στάθμες υδροφορέα) και πολλαπλά στατιστικά μέτρα προσαρμογής (αποτελεσματικότητα, μεροληψία, κτλ.).

(8) Η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου θα γίνεται με την υποστήριξη αλγορίθμων αυτόματης βαθμονόμησης.

Επειδή ο μεγάλος αριθμός των παραμέτρων και η πολυπλοκότητα του προβλήματος (παραγωγή πολλαπλών αποκρίσεων) καθιστούν απαγορευτική, στην πράξη, την παραδοσιακή χειροκίνητη «ρύθμιση» του μοντέλου, ο χρήστης υποστηρίζεται από εργαλεία αυτόματης βαθμονόμησης, τα οποία χρησιμοποιούν εξελικτικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης για βαθμωτές αλλά και διανυσματικές συναρτήσεις προσαρμογής (Κεφάλαιο 10). Ο χρήστης ορίζει εφικτά και επιθυμητά όρια διακύμανσης των παραμέτρων, ενώ μπορεί να δημιουργήσει ομάδες παραμέτρων με κοινές τιμές (συνήθως πρόκειται για παραμέτρους των μοντέλου υπόγειας υδρολογίας), τις οποίες βελτιστοποιεί συνολικά.

4 Συνιστώσες και δεδομένα εισόδου

4.1 Θεματικά επίπεδα

Καθώς η ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ είναι προσανατολισμένη στο διαχειριστικό πρόβλημα, η όλη προσέγγιση βασίζεται σε μια δικτυακή σχηματοποίηση των φυσικών και τεχνητών συνιστωσών της περιοχής μελέτης (λεκάνη απορροής), τα οποία αναπαρίστανται με τη μορφή θεματικών επιπέδων, ήτοι:

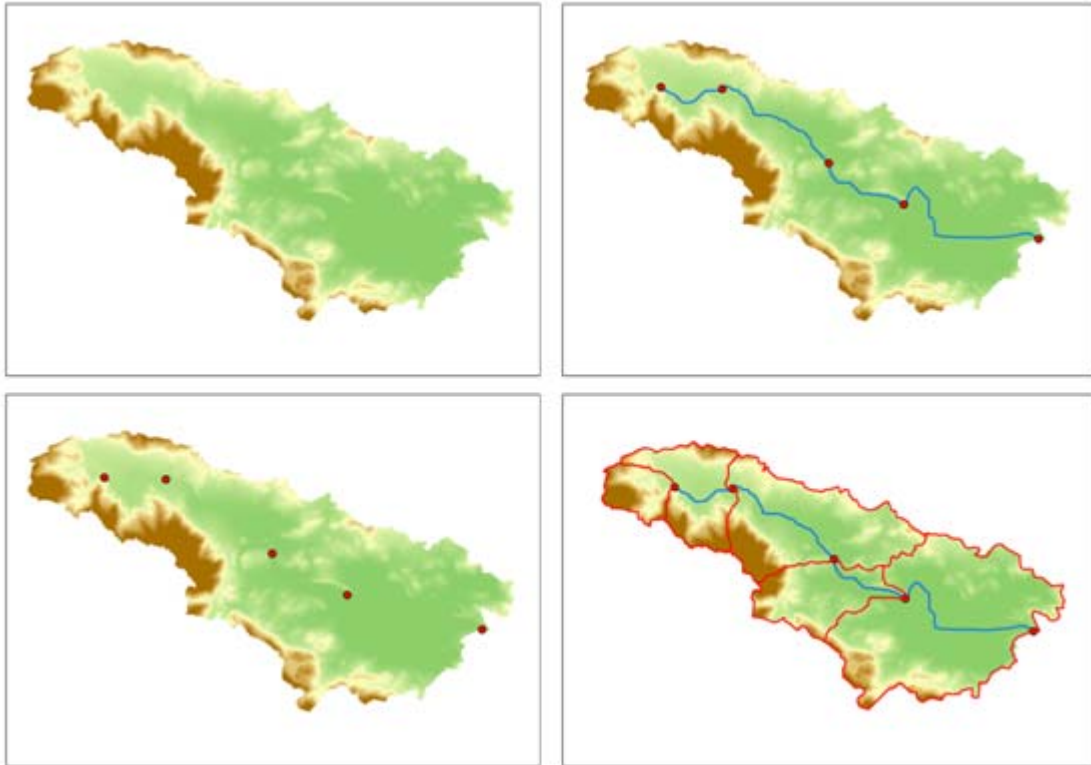
- το *επιφανειακό σύστημα*, που περιλαμβάνει το υδρογραφικό δίκτυο, τις υπολεκάνες ανάντη κάθε κόμβου του δικτύου και τις πηγές (οι πηγές αποτελούν διεπιφάνεια με το υπόγειο σύστημα).
- τις *μονάδες υδρολογικής απόκρισης*, που είναι γεωγραφικές ενότητες με κοινά γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά και αναπαριστούν διαφορετικούς τύπους εδαφών.
- το *υπόγειο σύστημα* (υδροφορέας) που αναπαρίσταται ως ένα σύστημα κυττάρων πολυγωνικού σχήματος, στα οποία αντιστοιχούν εννοιολογικές δεξαμενές αποθήκευσης του υπόγειου νερού που συνδέονται μεταξύ τους με εννοιολογικά στοιχεία μεταφοράς και εκφορτίζονται είτε επιφανειακά, μέσω των πηγών, ή υπόγεια, προς γειτονικές λεκάνες και τη θάλασσα.
- το *σύστημα διαχείρισης υδατικών πόρων* (υδροσύστημα), δηλαδή μια σχηματική απεικόνιση των θέσεων προσφοράς και ζήτησης νερού, των έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων της λεκάνης (υδραγωγεία, έργα εκτροπής, γεωτρήσεις και ομάδες γεωτρήσεων) και των χρήσεων νερού.

Τα επιμέρους θεματικά επίπεδα (δίκτυα) συνδέονται μέσω των πηγών (επιφανειακό σύστημα – υπόγειο σύστημα), των γεωτρήσεων (υδροσύστημα – υπόγειο σύστημα) και των υδραγωγείων (επιφανειακό σύστημα – υδροσύστημα). Όλες οι συνιστώσες με γεωαναφορά, καθώς και τα δευτερογενή γεωγραφικά επίπεδα (ενώσεις και τομές) παράγονται σε περιβάλλον ΣΓΠ. Η διαμόρφωση των επιπέδων και τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου (γεωγραφικά και υδρολογικά) εξηγούνται αναλυτικά στη συνέχεια του κεφαλαίου.

4.2 Υδρογραφικό δίκτυο και υπολεκάνες

Στη σχηματοποίηση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών, υιοθετείται μια ημικατανομημένη διακριτοποίηση της περιοχής μελέτης, που προϋποθέτει τη διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου, τον ορισμό των σημείων ελέγχου πάνω στο δίκτυο (κόμβοι) και τη χάραξη των υπολεκανών ανάντη κάθε κόμβου. Η κλίμακα εφαρμογής του μοντέλου είναι η λεκάνη απορροής, η οποία αναφέρεται και

ως *περιοχή μελέτης*. Τα όρια της περιοχής μελέτης είτε δίνονται με τη μορφή ενός πολυγώνου είτε χαράσσονται αυτόματα, ορίζοντας έναν μοναδικό κόμβο εξόδου πάνω σε ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ). Πρόκειται για το πρωτογενές επίπεδο πληροφορίας που απαιτεί το μοντέλο, ενώ τα άλλα επίπεδα που παράγονται στα πλαίσια της σχηματοποίησης του επιφανειακού συστήματος είναι οι κόμβοι του δικτύου, οι κλάδοι (υδατορεύματα) και οι υπολεκάνες (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Επίπεδα γεωγραφικής πληροφορίας που χρησιμοποιούνται στη σχηματοποίηση του επιφανειακού συστήματος: ψηφιακό μοντέλο εδάφους (πάνω αριστερά), κόμβοι υδρογραφικού δικτύου (κάτω αριστερά), κλάδοι δικτύου (πάνω δεξιά), υπολεκάνες (κάτω δεξιά). Παράδειγμα από εφαρμογή του μοντέλου στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού (Ευστρατιάδης, 2008).

Ως *υδρογραφικό δίκτυο* νοείται το κύριο υδατόρευμα της λεκάνης καθώς και συμβάλλοντες κλάδοι σε αυτό. Η διαμόρφωση του δικτύου γίνεται με την υποστήριξη του ΣΓΠ, χρησιμοποιώντας ως υπόβαθρο το ΨΜΕ της λεκάνης και ορίζοντας κατάλληλο όριο στη συνάρτηση συγκέντρωσης της απορροής. Όσο μικρότερο είναι το εν λόγω όριο, τόσο πυκνότερο είναι το δίκτυο που διαμορφώνεται. Συνήθως απαιτείται μια επαναληπτική διαδικασία, μέχρι να σχηματιστεί το επιθυμητό δίκτυο. Ειδικότερα, το ΣΓΠ παράγει κόμβους μόνο στην έξοδο της λεκάνης (όπου συγκεντρώνεται το σύνολο της απορροής) και στις θέσεις συμβολής, ενώ ο χρήστης τοποθετεί επιπλέον κόμβους σε ενδιάμεσα σημεία, όπου ζητείται ο υπολογισμός της παροχής. Τέτοια μπορεί να είναι θέσεις υδρομετρικών σταθμών, όπου ελέγχεται η προσαρμογή των προσομοιωμένων παροχών στις αντίστοιχες μετρημένες (οι οποίες αποτελούν είσοδο του μοντέλου βαθμονόμησης), θέσεις πραγματοποίησης απολήψεων, θέσεις

ελέγχου της ποιότητας του νερού καθώς και θέσεις εισροής νερού από εξωτερικές πηγές (π.χ. εκροές ταμιευτήρων). Στη τελευταία περίπτωση, οι χρονοσειρές εισροών αποτελούν είσοδο του μοντέλου προσομοίωσης. 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.

Το τελικό υδρογραφικό δίκτυο, που στη γενική περίπτωση είναι δενδροειδούς τύπου, πρέπει απαραίτητα να καταλήγει σε ένα τελικό σημείο, δηλαδή την έξοδο της λεκάνης. Η διαδρομή μεταξύ δύο κόμβων καλείται *κλάδος* ή *τμήμα υδατορεύματος* ή απλούστερα *υδατόρευμα*, με χαρακτηριστικά μεγέθη το μήκος, L , και τον συντελεστή διήθησης, δ . Ο τελευταίος είναι αδιάστατη παράμετρος του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας, που εκφράζει το ποσοστό της διερχόμενης παροχής που κατεισδύει προς τον υπόγειο υδροφορέα από τον πυθμένα και τα πρηνή της διατομής. Επιπλέον χαρακτηριστικά μεγέθη και παράμετροι εισάγονται εφόσον το βήμα προσομοίωσης είναι ημερήσιο και ζητείται η εφαρμογή του μοντέλου διόδευσης (βλ. Κεφάλαιο 8). Η τοπολογία του δικτύου ορίζεται πλήρως από τον ανάντη και κατάντη κόμβο κάθε υδατορεύματος.

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. Στην κλίμακα της υπολεκάνης συναθροίζονται οι μεταβλητές εξόδου του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας, ήτοι η πραγματική εξατμοδιαπνοή, η κατείσδυση προς την κορεσμένη ζώνη (υπόγειο σύστημα) και η επιφανειακή απορροή. Η συνολική απορροή προκύπτει προσθέτοντας στην επιφανειακή συνιστώσα την εκφόρτιση όλων των πηγών που ανήκουν στη συγκεκριμένη υπολεκάνη (βασική ή υπόγεια απορροή). Τα δύο μεγέθη θεωρείται ότι μεταφέρονται ακαριαία στον κατάντη κόμβο της υπολεκάνης, μέσω του οποίου εισάγονται στο υδρογραφικό δίκτυο ως σημειακή φόρτιση. Εφόσον διατίθενται δείγματα παρατηρημένης παροχής στην έξοδο της υπολεκάνης, εισάγονται στο σύστημα ως χρονοσειρές ελέγχου, στα πλαίσια του μοντέλου βαθμονόμησης.

4.3 Μονάδες υδρολογικής απόκρισης

Η έννοια της *μονάδας υδρολογικής απόκρισης* (hydrological response unit· ΜΥΑ) είναι από τις πλέον θεμελιώδεις του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, δεδομένου ότι επιτρέπει χωριστό χειρισμό της λεπτομέρειας της χωρικής ανάλυσης από την παραμετροποίηση, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει συνέπεια με τη φυσική του συστήματος. Ο όρος εισήχθη από τον Flügel (1995) και υποδηλώνει, γενικά, συμπαγείς

χωρικές ενότητες της λεκάνης που περιλαμβάνουν κυρίαρχους τύπους εδάφους με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Χρησιμοποιείται σε φυσικής βάσης μοντέλα, με γνωστότερο το SWAT, όπου η λεκάνη θεωρείται ότι αποτελείται από ένα σύνολο διακριτών στοιχείων με διαφορετικές ιδιότητες, που συνεισφέρουν διαφορετικά στις αποκρίσεις του μοντέλου (Srinivasan *et al.*, 2000). Στην προσέγγιση αυτή, οι ΜΥΑ ορίζονται με βάση την κατανομημένη σχηματοποίηση της λεκάνης (αντιστοιχεί μία μονάδα σε κάθε κυψέλη του κανάβου) και με βάση προκαθορισμένες ιδιότητες του εδάφους (περατότητα, κλίση, χρήσεις γης). Αυτό μειώνει σημαντικά την ευελιξία του μοντέλου, ενώ δημιουργεί την ανάγκη αναζήτησης (ή εκτίμησης) ενός πολύ μεγάλου αριθμού άγνωστων ιδιοτήτων, που είναι συχνά δύο ή τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο σε σχέση με τις παραμέτρους ενός αδιαμέριστου μοντέλου (Refsgaard, 1997).

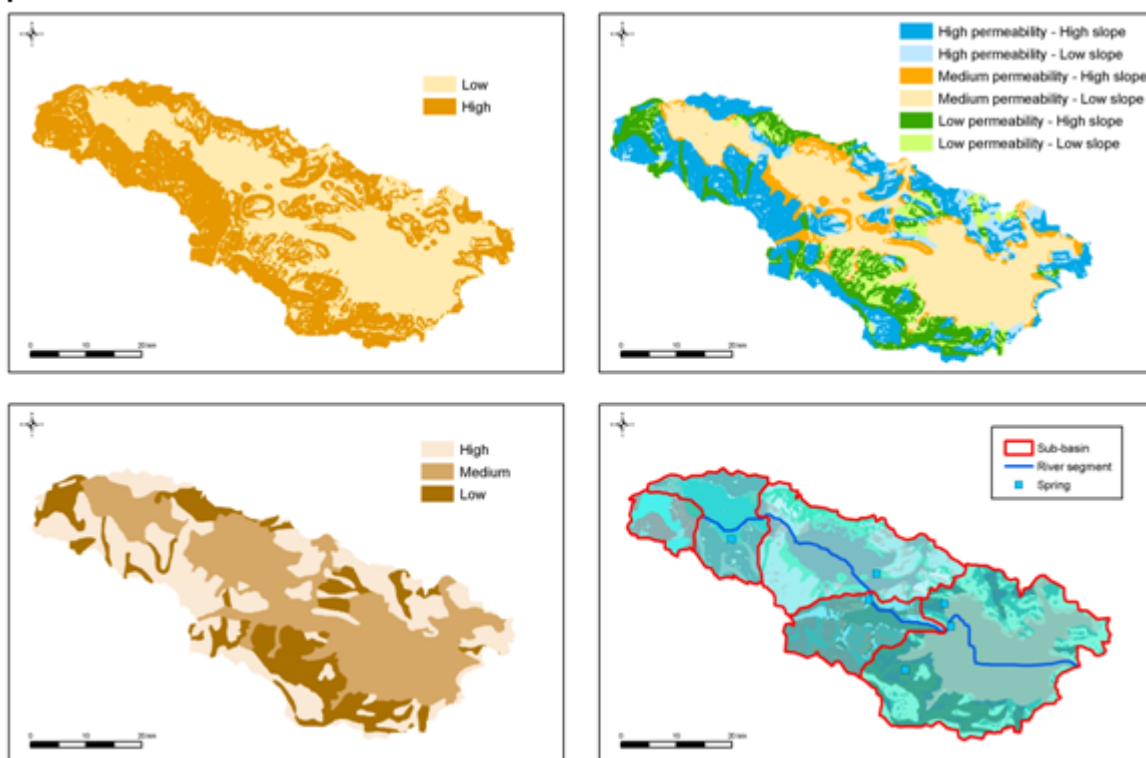
Στην ΥΔΡΟΓΕΙΟ, η έννοια της ΜΥΑ είναι αρκετά διαφορετική, καθώς υποδηλώνει τύπους εδάφους και υπεδάφους με κοινά γεωμορφολογικά και φυσιογραφικά χαρακτηριστικά, οι οποίοι παράγονται από την ένωση (union) σχετικών γεωγραφικών επιπέδων, όπως η περατότητα, η κάλυψη γης, η κλίση του εδάφους, κτλ. Κατά συνέπεια, δεν πρόκειται για αυστηρά οριοθετημένες συμπαγείς γεωγραφικές ενότητες, αλλά για ένα σύνολο από ανεξάρτητα χωρία, τυχαίας γεωμετρίας, που εκτείνονται ακανόνιστα σε όλη τη λεκάνη¹. Σε κάθε ΜΥΑ, ο μηχανισμός γέννησης της απορροής (καθώς και των υπόλοιπων επιφανειακών διεργασιών, όπως η εξατμοδιαπνοή και η κατείδυση) θεωρείται ενιαίος, οπότε θεωρούνται κοινές παράμετροι σε όλη την έκταση που καλύπτει η συγκεκριμένη μονάδα. Με τον τρόπο αυτό, η παραμετροποίηση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών, αντί να γίνεται με βάση τις υπολεκάνες, όπως συνηθίζεται στα περισσότερα ημικατανομημένα υδρολογικά μοντέλα, γίνεται με βάση τις ΜΥΑ. Έτσι, αντί μιας προσέγγισης τύπου «μαύρου κουτιού», που θα προέκυπτε εφόσον οι παράμετροι ορίζονταν με βάση γεωγραφικά όρια, ακολουθείται μια μοντελοποίηση φυσικής βάσης, στην οποία οι παράμετροι σχετίζονται, έστω και εννοιολογικά, με χαρακτηριστικά μεγέθη του φυσικού συστήματος που είναι προφανές ότι επηρεάζουν τις υδρολογικές διεργασίες. Οι παράμετροι των ΜΥΑ και η φυσική τους ερμηνεία εξηγούνται στο Κεφάλαιο 5.

Η σχηματοποίηση των ΜΥΑ γίνεται με την υποστήριξη ΣΓΠ. Οι ΜΥΑ ορίζονται ως ενώσεις μεταξύ των διαθέσιμων θεματικών επιπέδων που απεικονίζουν κατανομημένη πληροφορία ταξινομημένη στις αντίστοιχες κατηγορίες. Για παράδειγμα, αν διατίθεται ψηφιακά υπόβαθρα με n_A τύπους από το χαρακτηριστικό Α και n_B τύπους από το χαρακτηριστικό Β, τότε με την ένωση των δύο υποβάθρων προκύπτουν $n_A \times n_B$ συνδυασμοί των δύο χαρακτηριστικών, σε κάθε έναν από τους οποίους αντιστοιχεί διαφορετική ΜΥΑ. Ακολούθως, παράγεται η ένωση των ΜΥΑ με τις υπολεκάνες, μέσω της οποίας προκύπτει το ελάχιστο χωρικό στοιχείο αναφοράς του επιφανειακού συστήματος που

¹ Ο αυστηρός μαθηματικός όρος είναι *κοινή εκλέπτυνση* (common refinement) των μερών (partitions) που απαρτίζουν κάθε επίπεδο γεωγραφικής πληροφορίας, και το αποτέλεσμα του το γινόμενο των εν λόγω μερών. Ο όρος *ένωση* (union) χρησιμοποιείται απλουστευτικά, καθώς αποτελεί τυπική χωρική συνάρτηση των ΣΓΠ.

καλείται *διαμέριση υπολεκάνης* (subbasin partition). Το στοιχείο αυτό δέχεται κοινές φορτίσεις (βροχοπτώση, δυναμική εξατμοδιαπνοή) και η δυναμική του περιγράφεται από εξισώσεις που περιέχουν κοινές παραμέτρους. Για κάθε διαμέριση ο χρήστης ορίζει το ύψος νερού στην αρχή της προσομοίωσης, που αποτελεί αρχική συνθήκη του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας. Παράδειγμα διαμόρφωσης των ΜΥΑ και της ένωσής τους με τις υπολεκάνες απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2.

Επισημαίνεται ότι, ανεξάρτητα από το υδρολογικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των διεργασιών, το πλήθος των παραμέτρων είναι εξ ορισμού ευθέως ανάλογο του αριθμού των ΜΥΑ. Κατά συνέπεια, η διαμόρφωσή τους πρέπει να γίνεται με φειδώ, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο την περιγραφική/γεωγραφική αλλά και την υδρολογική πληροφορία που διατίθεται για την υποστήριξη της παραμετροποίησης, ήτοι τις μετρήσεις παροχής. Διαφορετικά, υπάρχει ο κίνδυνος διαμόρφωσης υπερ-παραμετροποιημένων σχημάτων, τα οποία είναι ευαίσθητα στις μεταβολές των παραμέτρων, βαθμονομούνται εξαιρετικά δύσκολα και διαθέτουν περιορισμένη προγνωστική ικανότητα. Για τον λόγο αυτό, σε αντίθεση με άλλα καταναμημένα μοντέλα, δεν τίθενται περιορισμοί ως προς την επιλογή των επιπέδων πληροφορίας ή την ταξινόμηση των αντίστοιχων κατηγοριών, γεγονός που ενισχύει την ευελιξία του προτεινόμενου μαθηματικού πλαισίου.



Σχήμα 4.2: Επίπεδα γεωγραφικής πληροφορίας που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της παραμετροποίησης του επιφανειακού συστήματος του Βοιωτικού Κηφισού (Ευστρατιάδης, 2008): κλίση εδάφους (πάνω αριστερά), υδατοπερατότητα (κάτω αριστερά), μονάδες υδρολογικής απόκρισης (πάνω δεξιά), ένωση υπολεκανών-ΜΥΑ (κάτω δεξιά).

4.4 Σχηματοποίηση υδροφορέα

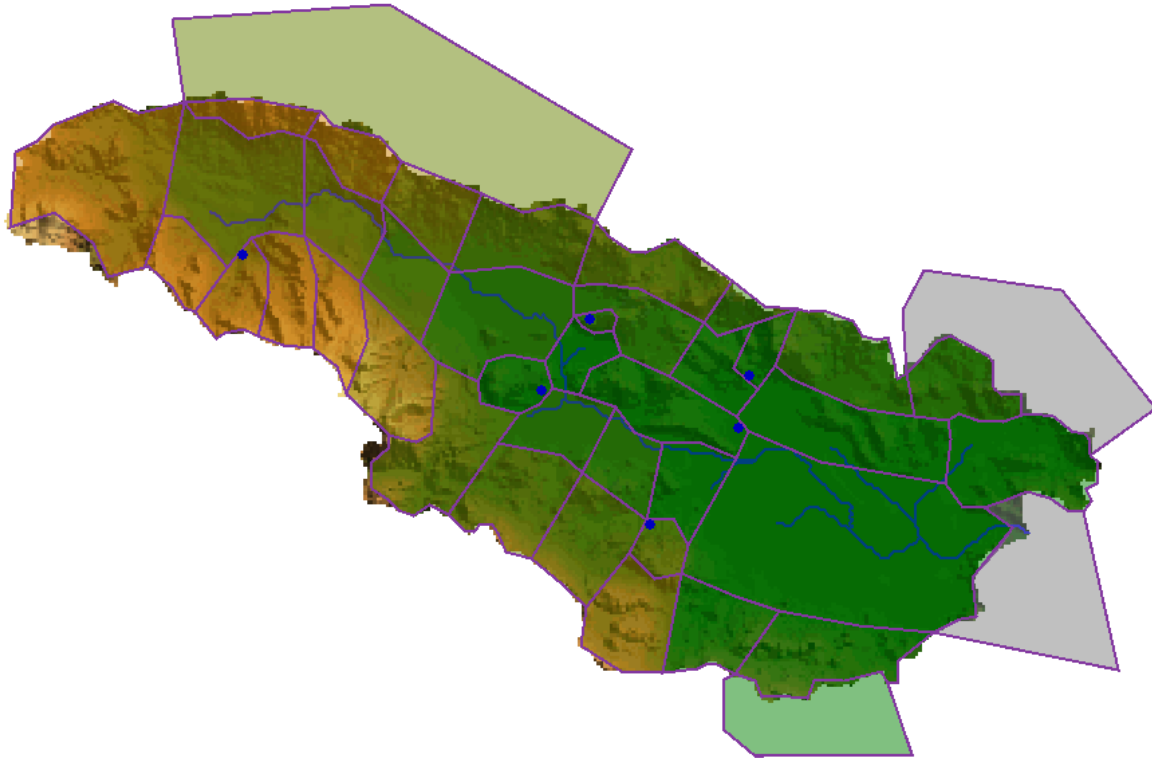
Η προσομοίωση της υπόγειας κίνησης του νερού (κορεσμένη ροή) βασίζεται στην τεχνική των πολυκυτταρικών μοντέλων (Bear, 1979). Τα σχήματα αυτά προτιμώνται σε σχέση με λεπτομερέστερα μοντέλα ορθογωνικού κανάβου (μοντέλα πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων) όταν υπάρχει έλλειψη υδρογεωλογικών δεδομένων, σε συνδυασμό με την ανάγκη ελαχιστοποίησης του υπολογιστικού φόρτου. Σύμφωνα με τους Rozos and Koutsoyiannis (2006), τα πολυκυτταρικά μοντέλα είναι ισοδύναμα με την θεωρία των *πεπερασμένων όγκων* (finite volume), εφόσον στη χάραξη των κυττάρων 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 τη μέση 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 αλλά και συμβάλλει στην καλύτερη εποπτεία του συστήματος, αφού η χάραξη των κυττάρων, και συνακόλουθα η παραμετροποίηση του συστήματος, μπορεί να γίνει με βάση τα μείζονα χαρακτηριστικά του υπεδάφους, που είναι προφανές ότι επηρεάζουν τις υπόγειες υδρολογικές διεργασίες. Ειδικότερα, στο μοντέλο επιτρέπεται η εφαρμογή κοινών παραμέτρων για ευρύτερες ομάδες κυττάρων, με στόχο τη διατύπωση ενός κατά το δυνατόν πιο φειδωλού προβλήματος βαθμονόμησης, προς όφελος του περιορισμού της πολυπλοκότητάς του.

Στο Σχήμα 4.3 απεικονίζεται ένα παράδειγμα διακριτοποίησης του υδροφορέα της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού σε κύτταρα. Το πεδίο ροής περιλαμβάνει ακόμη τέσσερα εικονικά κύτταρα που συγκεντρώνουν τις υπόγειες διαφυγές της λεκάνης, καθώς και έξι σημεία επιφανειακής εκφόρτισης (καρστικές πηγές).

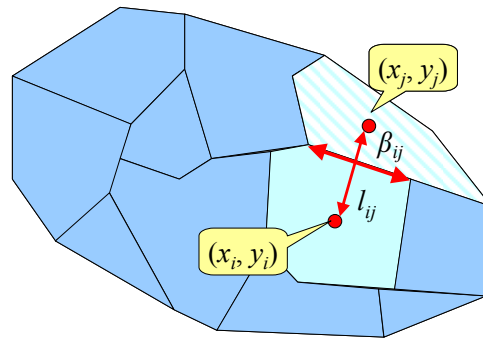
Οι υδρολογικές διεργασίες της κορεσμένης ζώνης αναπαρίστανται από εννοιολογικές δεξαμενές συγκέντρωσης του υπόγειου νερού και εικονικά στοιχεία μεταφοράς (αγωγοί) που συνδέουν τις δεξαμενές μεταξύ τους. Το δίκτυο αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως το υδραυλικό ανάλογο της διακριτής αναπαράστασης του υδροφορέα. Οι δεξαμενές φορτίζονται από τις κατακόρυφες διεργασίες των υπερκείμενων στρωμάτων (κατείσδυση, διήθηση, άντληση), ενώ 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, σύμφωνα με το μοντέλο που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6.



Σχήμα 4.3: Παράδειγμα διακριτοποίησης υδροφορέα Βοιωτικού Κηφισού σε πολυγωνικά κύτταρα. Με χρωματισμό απεικονίζονται τα κύτταρα που συγκεντρώνουν τις υπόγειες διαφυγές προς γειτονικές λεκάνες. Στο σχήμα απεικονίζονται ακόμη το υδρογραφικό δίκτυο και οι θέσεις των κύριων καρστικών πηγών της λεκάνης.

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 4.4). Τα γεωμετρικά αυτά χαρακτηριστικά υπολογίζονται αυτόματα από το ΣΓΠ, εφόσον έχει δοθεί ένα πολυγωνικό επίπεδο με τη χάραξη των κυττάρων. Στη συνέχεια, παράγονται τρία επίπεδα δευτερογενούς γεωγραφικής πληροφορίας, ήτοι:

- η ένωση κυττάρων υδροφορέα – υπολεκανών – μονάδων υδρολογικής απόκρισης, με βάση την οποία υπολογίζεται η κατείσδυση που δέχεται κάθε δεξαμενή από το αντίστοιχο εδαφικό στοιχείο·
- η τομή κυττάρων υδροφορέα – υδατορευμάτων, με βάση την οποία υπολογίζεται η διήθηση που δέχεται κάθε δεξαμενή από τον αντίστοιχο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου·
- η τομή κυττάρων υδροφορέα – γεωτρήσεων, με βάση την οποία υπολογίζεται η αντλούμενη ποσότητα νερού από κάθε δεξαμενή, μέσω του αντίστοιχου αντλητικού συγκροτήματος του συστήματος διαχείρισης υδατικών πόρων.



Σχήμα 4.4: Χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη κυττάρων.

Τα γεωμετρικά μεγέθη κάθε δεξαμενής είναι το εμβαδόν της βάσης, F_i , το οποίο υπολογίζεται από το ΣΓΠ, καθώς και τρεις χαρακτηριστικές στάθμες, ήτοι το υψόμετρο του πυθμένα, w_i^{\min} , το υψόμετρο της οροφής, w_i^{\max} , και η αρχική στάθμη, $w_i(0)$, οι οποίες ορίζονται από τον χρήστη. Η υδραυλική λειτουργία τους περιγράφεται από δύο παραμέτρους, ήτοι την ειδική απόδοση και την υδραυλική αγωγιμότητα. Ο ορισμός των υψομέτρων πυθμένα και οροφής καθώς και της αρχικής στάθμης είναι εξαιρετικά σημαντικός, καθώς απαιτεί σημαντική εμπειρία ώστε όχι μόνο να καθοριστεί συνεπής φορά ροής του υπόγειου νερού, σύμφωνα με τις υδρογεωλογικές συνθήκες, αλλά και να εξασφαλιστεί ομαλή διαχρονική μεταβολή της στάθμης των δεξαμενών. Διαφορετικά, σε συνδυασμό με τις τιμές παραμέτρων που έχουν δοθεί, ενδέχεται να προκύψουν μη ομαλές συμπεριφορές, όπως συστηματική συγκράτηση νερού σε ορισμένες δεξαμενές ή απότομη εκκένωση άλλων δεξαμενών. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος θα πρέπει να αξιοποιείται πλήρως η υδρογεωλογική πληροφορία της περιοχής (π.χ., χάρτες μέσης πιεζομετρίας, υψόμετρα πηγών), και να εισάγονται κατάλληλα κριτήρια στο πρόβλημα βαθμονόμησης (βλ. 10.2.4). Στα υποκεφάλαια 11.2 και 11.3 δίνονται κατευθυντήριες αρχές για τη συνεπή χάραξη των κυττάρων, τον ορισμό των αρχικών και οριακών συνθηκών και την ομαδοποίηση των παραμέτρων του μοντέλου υπόγειας ροής.

Ακόμη, αν διατίθενται πιεζομετρικές παρατηρήσεις που είναι αντιπροσωπευτικές της διάταξης της στάθμης μιας δεξαμενής, αυτές μπορούν να εισαχθούν ως χρονοσειρές ελέγχου, στα πλαίσια του μοντέλου βαθμονόμησης, με την επιφύλαξη της διαφορετικής κλίμακας αναφοράς των δύο μεγεθών. Συγκεκριμένα, η προσομοιωμένη στάθμη αναφέρεται σε όλη την έκταση του κυττάρου, ενώ η παρατηρημένη στάθμη, ως προς την οποία γίνεται η προσαρμογή του μοντέλου, αποτελεί σημειακό μέγεθος, που είναι αντιπροσωπευτικό μιας πολύ μικρότερης χωρικής κλίμακας.

Η εκφόρτιση του υδροφορέα αναπαρίσταται με ειδικούς τύπους δεξαμενών, που υποδηλώνουν είτε σημειακές εξόδους νερού στην επιφάνεια του εδάφους (πηγές) ή ευρύτερες περιοχές συγκέντρωσης των υπόγειων διαφυγών της λεκάνης (π.χ., υποθαλάσσιες εκφορτίσεις). Και στις δύο περιπτώσεις, στο μοντέλο προσομοίωσης θεωρούνται εικονικές δεξαμενές πολύ μεγάλης (θεωρητικά άπειρης) βάσης, ώστε η στάθμη τους να διατηρείται πρακτικά σταθερή. Οι δεξαμενές αυτές δεν δέχονται κατακόρυφες φορτίσεις ούτε τροφοδοτούν γειτονικές τους δεξαμενές.

Ειδικότερα, οι πηγές δίνονται από το χρήστη ως σημειακό επίπεδο πληροφορίας και αποτελούν τη διεπιφάνεια μεταξύ του επιφανειακού και υπόγειου συστήματος. Κάθε πηγή συνδέεται μονοσήμαντα με την πλησιέστερη δεξαμενή. Χαρακτηριστικά μεγέθη των πηγών είναι το υψόμετρο εκφόρτισης, που αποτελεί σημείο με γνωστό πιεζομετρικό φορτίο, και η υδραυλική αγωγιμότητα, που αποτελεί παράμετρο του μοντέλου προσομοίωσης. Στο μοντέλο, η πηγή μπορεί να αντιπροσωπεύει σύστημα επιφανειακών εκφορτίσεων, το υψόμετρο της οποίας ταυτίζεται με το μέσο υψόμετρο του εν λόγω συστήματος. Εφόσον διατίθενται δείγματα μετρήσεων παροχής αμέσως κατάντη της πηγής (ή του συγκροτήματος πηγών), εισάγονται στο σύστημα ως χρονοσειρές ελέγχου, στα πλαίσια του μοντέλου βαθμονόμησης. Η απορροή όλων των πηγών κάθε υπολεκάνης μεταφέρεται ακαριαία στον κατάντη κόμβο και προστίθεται στην αντίστοιχη επιφανειακή απορροή.

Στο υπόγειο σύστημα εντάσσονται και οι γεωτρήσεις, που αντιπροσωπεύουν σημειακές απολήψεις νερού για την ικανοποίηση διαφόρων χρήσεων. Οι αντλούμενες ποσότητες από κάθε γεώτρηση δεν δίνονται απευθείας από το χρήστη, αλλά εκτιμώνται μέσω του διαχειριστικού μοντέλου, λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των υδατικών αναγκών, τα χαρακτηριστικά των τεχνικών έργων και τους διαχειριστικούς περιορισμούς της περιοχής μελέτης. Σε κάθε χρονικό βήμα, οι εν λόγω ποσότητες αφαιρούνται από τον αποθηκευμένο όγκο της υποκείμενης δεξαμενής. Οι γεωτρήσεις δίνονται από το χρήστη ως σημειακό επίπεδο πληροφορίας και αποτελούν τη διεπιφάνεια μεταξύ του υπόγειου συστήματος και του διαχειριστικού συστήματος. Χαρακτηριστικό μέγεθος κάθε γεώτρησης είναι η αντλητική ικανότητα, η οποία αποτελεί φυσικό περιορισμό του διαχειριστικού μοντέλου, και το ποσοστό συμμετοχής της στη συνολική αντλούμενη ποσότητα από κάθε ομάδα γεωτρήσεων – οι ομάδες αυτές αποτελούν ένα εννοιολογικό επίπεδο πληροφορίας, που χρησιμοποιείται στα πλαίσια του διαχειριστικού μοντέλου (βλ. 4.5).

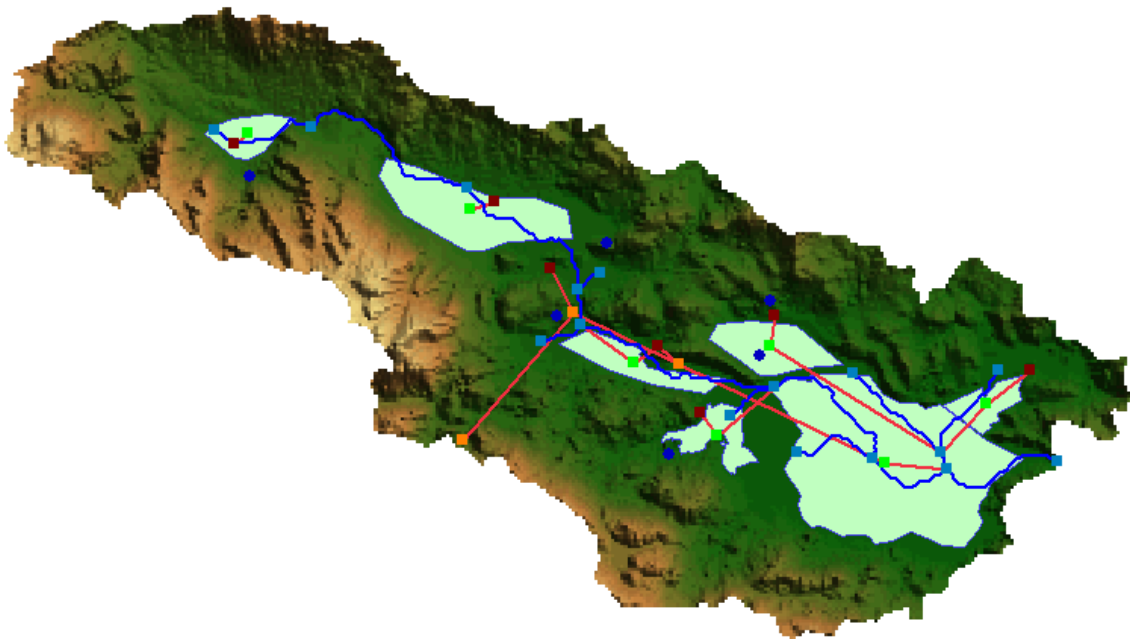
4.5 Σύστημα διαχείρισης υδατικών πόρων

Η ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ παρέχει τη δυνατότητα αναπαράστασης των ανθρωπογενών επεμβάσεων σε μια λεκάνη, υιοθετώντας μια σχηματική διάταξη δικτυακής μορφής, η οποία περιλαμβάνει τις ακόλουθες συνιστώσες:

- *κόμβους*, δηλαδή θέσεις προσφοράς ή ζήτησης νερού ή σημεία αλλαγής της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών μεγεθών του δικτύου·
- *αρδευόμενες περιοχές*, που αναπαρίστανται ως κόμβοι όπου συγκεντρώνεται η απόληψη για την ικανοποίηση των αρδευτικών αναγκών, σταθερό ποσοστό της οποίας θεωρείται ότι επιστρέφει στο δίκτυο μέσω του αποστραγγιστικού δικτύου·

- *ομάδες γεωτρήσεων*, δηλαδή ευρύτερα συστήματα έργων υδροληψίας από υπόγειους υδατικούς πόρους, η αντλητική ικανότητα των οποίων εκτιμάται ως το άθροισμα των επιμέρους αντλητικών ικανοτήτων των γεωτρήσεων που απαρτίζουν τη συγκεκριμένη ομάδα.
- *υδραγωγεία*, δηλαδή έργα μεταφοράς νερού που συνδέουν ζεύγη κόμβων και αναφέρονται σε ανοιχτούς ή κλειστούς αγωγούς, δεδομένης παροχαρακτηριστικότητας.

Οι παραπάνω συνιστώσες συνδέονται με το υδρογραφικό δίκτυο και τον υδροφορέα, διαμορφώνοντας έτσι ένα ενιαίο φυσικό και τεχνητό (εννοιολογικό) δίκτυο που καλείται *υδροσύστημα*. Στο Σχήμα 4.5 απεικονίζεται το εννοιολογικό μοντέλο του υδροσυστήματος του Βοιωτικού Κηφισού.



Σχήμα 4.5: Σχηματοποίηση του υδροσυστήματος του Βοιωτικού Κηφισού. Στο σχήμα απεικονίζονται το υδρογραφικό δίκτυο και οι κόμβοι του, τα υδραγωγεία, οι αρδευόμενες περιοχές, οι ομάδες γεωτρήσεων και οι λοιποί κόμβοι της λεκάνης.

Οι (απλοί) κόμβοι, οι αρδευόμενες περιοχές και οι ομάδες γεωτρήσεων είναι εννοιολογικές οντότητες, οι διεργασίες των οποίων αναπαρίστανται σημειακά, 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. Συνεπώς, τα υδραγωγεία συνδέουν όχι μόνο τις προαναφερθείσες κατηγορίες κόμβων αλλά και τους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου. Δεν υπάρχει περιορισμός ως προς τη διάταξη των υδραγωγείων, με την προϋπόθεση ότι το συνολικό δίκτυο που διαμορφώνεται (στο οποίο περιλαμβάνεται και το υδρογραφικό) διατηρείται ακτινωτό, ήτοι δεν σχηματίζει πουθενά κλειστές διαδρομές (βρόχους). Τόσο στα υδραγωγεία όσο και στις ομάδες

γεωτρήσεων εισάγεται ένα μοναδιαίο κόστος (χρηματικές μονάδες ανά μονάδα διερχόμενου όγκου), που λαμβάνεται υπόψη στη διαδικασία υπολογισμού των απολήψεων.

Εκτός από τα χαρακτηριστικά των τεχνικών έργων, ο χρήστης ορίζει *στόχους*, οι οποίοι ιεραρχούνται σε σειρά προτεραιότητας. Οι στόχοι αντιπροσωπεύουν καταναλωτικές χρήσεις νερού ή περιορισμούς, και αντιστοιχούν σε συγκεκριμένη συνιστώσα του συστήματος. Οι πρώτοι αναφέρονται στη ζήτηση νερού για ύδρευση ή άρδευση, ενώ οι δεύτεροι αναφέρονται στη διατήρηση της παροχής στα υδραγωγεία ή τα υδατορεύματα² μεταξύ ενός επιθυμητού εύρους, καθώς και στη θέσπιση ελάχιστης και μέγιστης παροχής άντλησης στις ομάδες γεωτρήσεων. Για κάθε στόχο, εισάγεται η αντίστοιχη χρονοσειρά ζήτησης και το επίπεδο προτεραιότητας στην ικανοποίηση του συγκεκριμένου στόχου. Δύο ή περισσότεροι στόχοι μπορούν να ενταχθούν στο ίδιο επίπεδο προτεραιότητας, εφόσον δεν κρίνονται ανταγωνιστικοί.

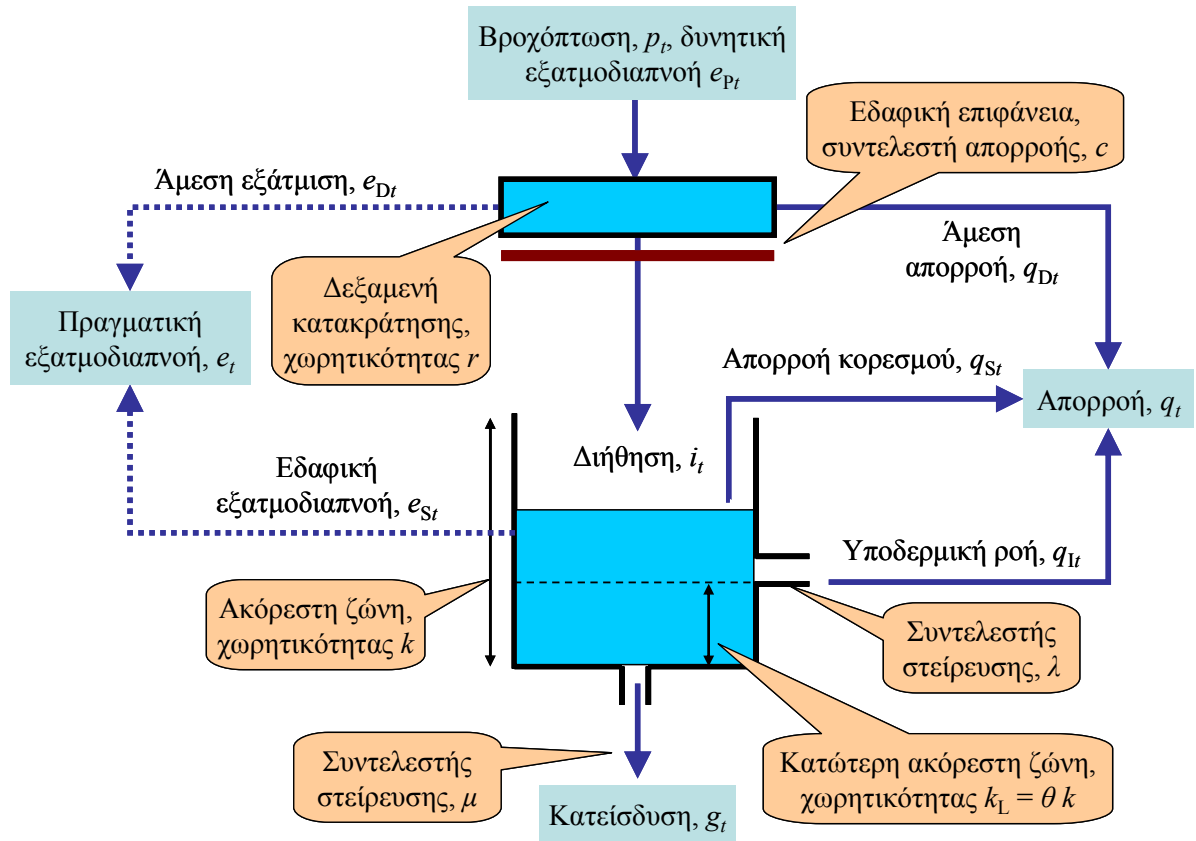
² Στα υδατορεύματα δεν έχει νόημα η εισαγωγή λειτουργικού περιορισμού μέγιστης ροής, σε αντιστοιχία με τη θέσπιση φυσικού ορίου παροχευτικότητας.

5 Μοντέλο προσομοίωσης επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών

5.1 Μαθηματική δομή μοντέλου

Η προσομοίωση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών αναφέρεται στα εδαφικά στοιχεία που προκύπτουν από την ένωση των υπολεκανών και των ΜΥΑ, τα οποία δέχονται κοινές φορτίσεις και οι μηχανισμοί τους περιγράφονται από κοινές παραμέτρους. Το μαθηματικό υπόβαθρο βασίζεται σε ένα εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο, το οποίο αναπαριστά το μετασχηματισμό της βροχόπτωσης σε απορροή, εξατμοδιαπνοή και κατείσδυση προς τον υπόγειο υδροφορέα. Το μοντέλο εντάσσεται στην κατηγορία των αδιαμέριστων σχημάτων μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου, που έχουν τύχει ευρείας εφαρμογής διεθνώς, καθώς χρησιμοποιώντας απλές υποθέσεις σχετικά με τη λειτουργία των φυσικών διεργασιών και μικρό πλήθος παραμέτρων, επιτυγχάνουν καλή προσαρμογή ακόμη και στην περίπτωση εξαιρετικά πολύπλοκων λεκανών. 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.

Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζεται η υδρολογική λειτουργία ενός εδαφικού στοιχείου μοναδιαίας επιφάνειας, μέσω ενός υδραυλικού αναλόγου που περιλαμβάνει δύο διασυνδεδεμένες δεξαμενές. Η ανώτερη δεξαμενή, χωρητικότητας r , αναπαριστά τις διεργασίες πάνω στην επιφάνεια του εδάφους και συγκεκριμένα την κατακράτηση της βροχής, την επιφανειακή εξάτμιση και τη διήθηση, στη μηνιαία χρονική κλίμακα. Η διήθηση τροφοδοτεί την ακόρεστη ζώνη (υπέδαφος), οι διεργασίες της οποίας αναπαρίστανται από μια δεξαμενή συγκέντρωσης υγρασίας, χωρητικότητας k . Η δεξαμενή παρέχει τη δυνατότητα εκροής προς την ατμόσφαιρα, εκροής προς το έδαφος λόγω υπερχειλίσης, πλευρικής εκροής διαμέσου του υπεδάφους και κατακόρυφης εκροής. Η πλευρική εκροή πραγματοποιείται από την οπή που βρίσκεται στο όριο μεταξύ της ανώτερης και κατώτερης ζώνης, ενώ η κατακόρυφη από την οπή που βρίσκεται στον πυθμένα. Ο ρυθμός πραγματοποίησης της πλευρικής και κατακόρυφης εκροής ελέγχεται μέσω των συντελεστών στείρευσης λ και μ , αντίστοιχα. Οι παραπάνω ροές αναπαριστούν, αντίστοιχα, την εδαφική εξατμοδιαπνοή, την πλημμυρική απορροή λόγω κορεσμού του εδάφους σε υγρασία, την υποδερμική απορροή και την κατείσδυση προς τα βαθύτερα στρώματα (κορεσμένη ζώνη – υδροφορέας). Η δεξαμενή υγρασίας χωρίζεται σε δύο περιοχές, το όριο των οποίων βρίσκεται σε στάθμη $k_L = \theta k$, η οποία αντιπροσωπεύει το μέσο βάθος του ριζοστρώματος και οριοθετεί τη διαφοροποίηση του μηχανισμού εξατμοδιαπνοής.



Σχήμα 5.1: Σχηματική παράσταση της δομής του μοντέλου μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου για την αναπαράσταση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών.

Έστω t δείκτης που αναφέρεται στο χρονικό διάστημα $[t, t + \Delta t]$, όπου Δt το βήμα της προσομοίωσης (μήνας). Στο διάστημα αυτό είναι γνωστά η συνολική κατακρήμνιση, p_t , η δυνητική εξατμοδιαπνοή, e_{p_t} , και η αποθήκευση εδαφικής υγρασίας στην αρχή του χρονικού διαστήματος, s_t . Επειδή η επιφάνεια αναφοράς είναι μοναδιαία, όλα τα υδρολογικά μεγέθη εκφράζονται σε μονάδες ισοδύναμου ύψους νερού³. Ζητούμενο είναι η εκτίμηση της απορροής q_t , της πραγματικής εξατμοδιαπνοής e_t , της κατείδυσης g_t , και της εδαφικής υγρασίας στο πέρας του χρονικού διαστήματος, s_{t+1} . Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου γράφεται:

$$s_{t+1} = s_t + p_t - q_t - e_t - g_t \quad (5.1)$$

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 συνολική απορροή q_t επιμερίζεται σε τρεις συνιστώσες:

- την άμεση απορροή, q_{D_t} , που εκφράζει την ποσότητα της βροχής (μετά την αφαίρεση των απωλειών λόγω εξάτμισης) 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 υπερχείλιση της δεξαμενής·
- την υποδερμική ροή, q_{I_t} , που εκφράζει την πλευρική αποστράγγιση της ακόρεστης ζώνης, η οποία πραγματοποιείται με χρονική υστέρηση και αναπαρίσταται ως εκροή από την οριζόντια οπή της δεξαμενής·

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

- την άμεση εξάτμιση, 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·
- την εδαφική εξατμοδιαπνοή, e_{S_t} , που αναφέρεται στην ικανοποίηση του ελλείμματος της δυνητικής εξατμοδιαπνοής μέσω της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας στην ανώτερη και κατώτερη ακόρεστη εδαφική ζώνη·

Τέλος, η κατείσδυση, 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 κατείσδυση είναι ταυτόχρονα μεταβλητή εξόδου του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας και μεταβλητή εισόδου (φόρτιση) του μοντέλου υπόγειας υδρολογίας.

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 εξάτμιση, 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

³ Συμβατικά, οι μεταβλητές που εκφράζονται σε ισοδύναμα ύψη νερού θα συμβολίζονται με μικρό γράμμα, ενώ οι αντίστοιχοι όγκοι με κεφαλαίο.

ποσότητα r , που αποτελεί παράμετρο του μοντέλου, με διαστάσεις ισοδύναμου ύψους νερού. Με την παραπάνω παραδοχή, η άμεση εξάτμιση εκτιμάται από τη σχέση:

$$e_{Dt} = \min (p_t, r, e_{Pt}) \quad (5.2)$$

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

$$q_{Dt} = c (p_t - e_{Dt}) \quad (5.3)$$

όπου c αδιάστατη παράμετρος που σχετίζεται με τη διαπερατότητα της εδαφικής επιφάνειας.

Η διήθηση στο διαμέσου της επιφάνειας του εδάφους, δηλαδή η τροφοδοσία της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας, υπολογίζεται από την σχέση:

$$i_t = p_t - e_{Dt} - q_{Dt} \quad (5.4)$$

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

$$s_t = s_{t-1} + i_t \quad (5.5)$$

όπου s_{t-1} η αποθήκευση υγρασίας στο πέρας του προηγούμενου χρονικού βήματος. Επισημαίνεται ότι το τρέχον απόθεμα s_t ενδέχεται να ξεπερνά τη χωρητικότητα της δεξαμενής, k . Πρακτικά, η περίσσεια εδαφικής υγρασίας πάνω από το όριο υπερχειλίσσης αντιπροσωπεύει την ποσότητα νερού που δεν μπορεί να απορροφηθεί από το κορεσμένο έδαφος, οπότε αφήνεται να λιμνάσει και, ακολούθως, μέρος της να εξατμιστεί και μέρος της να κατεισδύσει. Η υπόθεση αυτή επιτρέπει την παραγωγή πιο ρεαλιστικών αποκρίσεων, οι οποίες είναι συνεπείς με τη μεταβλητότητα της βροχόπτωσης. Το απόθεμα s_t^* κατανέμεται στις δύο ζώνες της δεξαμενής ως εξής:

$$s_{Ut} = \min (0, s_t - k_L), s_{Lt} = s_t - s_{Ut} \quad (5.6)$$

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

Οι εκροές νερού οφείλονται στην εδαφική εξατμοδιαπνοή από την ανώτερη και την κατώτερη ζώνη, την πλευρική αποστράγγιση (υποδερμική ροή) και την κατεισδύση. Η εδαφική εξατμοδιαπνοή, e_{St} , αφορά στην ικανοποίηση του ελλείμματος της δυναμικής εξατμοδιαπνοής μέσω της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας, και πραγματοποιείται κατά προτεραιότητα από την ανώτερη ζώνη, με βάση τη σχέση:

$$e_{SUt} = \min (s_{Ut}, e_{Pt} - e_{Dt}) \quad (5.7)$$

οπότε η αποθήκευση υγρασίας της εν λόγω ζώνης μειώνεται κατά την ποσότητα e_{SUt} .

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

$$q_{It} = \lambda (s_{Ut} - e_{SUt}) \quad (5.8)$$

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 εξατμοδιαπνοής από την κατώτερη ζώνη:

$$e_{SLt} = (e_{Pt} - e_{Dt} - e_{SUt}) [1 - \exp(-s_{Lt} / k_H)] \quad (5.9)$$

Τέλος, η κατείδυση προς τον υπόγειο υδροφορέα πραγματοποιείται μέσω της οπής στον πυθμένα, και είναι ανάλογη της συνολικής διαθέσιμης υγρασίας (μετά την αφαίρεση των εκροών λόγω εδαφικής εξατμοδιαπνοής και υποδερμικής ροής) και του συντελεστή στείρευσης μ , δηλαδή:

$$g_t = \mu (s_t - e_{SUt} - e_{SLt} - q_{It}) \quad (5.10)$$

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

$$q_{St} = \max(0, s_t - e_{SUt} - e_{SLt} - q_{It} - g_t - k) \quad (5.11)$$

Προφανώς, εφόσον πραγματοποιηθεί υπερχειλίση, το απόθεμα υγρασίας στο πέρας του χρονικού βήματος είναι ίσο με τη χωρητικότητα της δεξαμενής, k .

Τέλος, η συνολική εξατμοδιαπνοή και η συνολική απορροή προκύπτουν ως:

$$e_t = e_{Dt} + e_{St} \quad (5.12)$$

$$q_t = q_{Dt} + q_{It} + q_{St} \quad (5.13)$$

Για δεδομένες τιμές παραμέτρων, και με είσοδο τις μηνιαίες χρονοσειρές βροχόπτωσης και δυναμικής εξατμοδιαπνοής καθώς και την αποθήκευση υγρασίας στην αρχή της περιόδου προσομοίωσης, s_0 , είναι δυνατή η αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών στο μοναδιαίο εδαφικό στοιχείο, με επίλυση του προβλήματος μήνα-προς-μήνα.

5.3 Προσαρμογή μοντέλου για ημερήσια προσομοίωση

Στην ημερήσια κλίμακα χρησιμοποιείται μια τροποποιημένη δομή του παραπάνω μοντέλου, ώστε να αποτυπώνονται πιο ρεαλιστικά οι υδρολογικές διεργασίες και, κυρίως, η εδαφική εξατμοδιαπνοή. Για το σκοπό αυτό εισάγεται μία επιπλέον παράμετρος με διαστάσεις χωρητικότητας (k_E), η οποία αντιπροσωπεύει την ποσότητα της εδαφικής υγρασίας που είναι πλήρως διαθέσιμη για την πραγματοποίηση της εξατμοδιαπνοής. Οι μεταβλητές κατάστασης του μοντέλου, ήτοι η αποθήκευση υγρασίας στην ανώτερη (s_{Ut}) και την κατώτερη (s_{Lt}) ζώνη, είναι πλέον διακριτές, καθώς θεωρούνται δύο ξεχωριστές δεξαμενές, χωρητικότητας k_E και k , αντίστοιχα.

Έστω $s_{t-1} = s_{U_{t-1}} + s_{L_{t-1}}$ η συνολική ποσότητα νερού που είναι αποθηκευμένη στις δύο δεξαμενές μετά το πέρας του προηγούμενου χρονικού βήματος. Μετά την πραγματοποίηση της διήθησης μέσω της επιφάνειας του εδάφους (εξ. 5.4), η διαθέσιμη υγρασία του εδαφικού στοιχείου είναι ίση με:

$$s_t = s_{U_{t-1}} + s_{L_{t-1}} + i_t \quad (5.14)$$

Η παραπάνω ποσότητα κατανέμεται κατά προτεραιότητα την ανώτερη ακόρεστη ζώνη, το απόθεμα της οποίας εκτιμάται ως το ελάχιστο μεταξύ της διαθέσιμης υγρασίας και της χωρητικότητας της αντίστοιχης δεξαμενής, ήτοι:

$$s_{U_t} = \min (s_t, k_E) \quad (5.15)$$

Συνεπώς, η ανώτερη ζώνη τροφοδοτείται τόσο από τη διήθηση (ήτοι την κίνηση του νερού λόγω των δυνάμεων βαρύτητας) όσο και από την υγρασία που είναι αποθηκευμένη στην κατώτερη ζώνη (αντίστροφη κίνηση του νερού λόγω των δυνάμεων μύζησης), μέχρι εξάντλησης της χωρητικότητάς της. Η περίσσεια υγρασίας, εφόσον υπάρχει, αποθηκεύεται στην κατώτερη ζώνη, το απόθεμα της οποίας ισούται με:

$$s_{L_t} = \min (s_t - s_{U_t}, k) \quad (5.16)$$

Αν υπάρχει επιπλέον περίσσεια νερού, τότε αυτή διαφεύγει ως απορροή λόγω υπερχειλίσης, ήτοι:

$$q_{S_t} = s_t - s_{U_t} - s_{L_t} \quad (5.17)$$

Το σύνολο της αποθηκευμένης εδαφικής υγρασίας στην ανώτερη ζώνη θεωρείται διαθέσιμο για την πραγματοποίηση εξατμοδιαπνοής, η οποία αποτελεί και τη μοναδική εκροή της σχετικής δεξαμενής. Συνεπώς, η εδαφική εξατμοδιαπνοή από την ανώτερη ακόρεστη ζώνη εκτιμάται από τη σχέση:

$$e_{SU_t} = \min (s_{U_t}, e_{P_t} - e_{D_t}) \quad (5.18)$$

οπότε η τρέχουσα αποθήκευση υγρασίας μειώνεται κατά την ποσότητα e_{SU_t} .

Όσον αφορά στην κατώτερη δεξαμενή, οι εκροές νερού αφορούν στην υποδερμική απορροή, την εδαφική εξατμοδιαπνοή και την κατείδυση. Συγκεκριμένα, ποσοστό λ της αποθηκευμένης υγρασίας διαφεύγει πλευρικά μέσω της οριζόντιας οπής, παράγοντας υποδερμική ροή με βάση τη σχέση:

$$q_{L_t} = \max [0, \lambda (s_{L_t} - k_l)] \quad (5.19)$$

όπου $k_l = \theta k$. Η εδαφική εξατμοδιαπνοή, η οποία πραγματοποιείται με βραδύτερο ρυθμό συγκριτικά με την ανώτερη δεξαμενή (άνω ακόρεστη ζώνη) εκτιμάται από την ημιεμπειρική σχέση:

$$e_{SL_t} = (e_{P_t} - e_{D_t} - e_{SU_t}) [1 - \exp (- (s_{L_t} - q_{L_t}) / k)] \quad (5.20)$$

Τέλος, η κατείδυση προς τον υπόγειο υδροφορέα πραγματοποιείται μέσω της οπής στον πυθμένα, και είναι ανάλογη της επίκαιρης υγρασίας της κατώτερης ζώνης (μετά την αφαίρεση των εκροών λόγω εδαφικής εξάτμισης και υποδερμικής ροής) και του συντελεστή στείρευσης μ , δηλαδή:

$$g_t = \mu (s_{Lt} - e_{sLt} - q_{Lt}) \quad (5.21)$$

Σε αντιστοιχία με το μοντέλο μηνιαίας προσομοίωσης, η συνολική εξατμοδιαπνοή και η απορροή προκύπτουν αθροίζοντας τις επιμέρους συνιστώσας τους. Συνεπώς, για δεδομένες τιμές παραμέτρων, και με είσοδο τις ημερήσιες χρονοσειρές βροχόπτωσης και δυναμικής εξατμοδιαπνοής καθώς και την αποθήκευση υγρασίας στην ανώτερη και κατώτερη ζώνη στην αρχή της περιόδου προσομοίωσης, είναι δυνατή η αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών στο μοναδιαίο εδαφικό στοιχείο, με επίλυση του προβλήματος ημέρα-προς-ημέρα.

5.4 Εννοιολογία και φυσική ερμηνεία παραμέτρων

Το μοντέλο προσομοίωσης των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών, στη μηνιαία εκδοχή του, έχει έξι παραμέτρους, που φαίνονται στον Πίνακα 5.1 (οι παράμετροι αυξάνουν σε επτά, αν το μοντέλο λειτουργεί σε ημερήσια κλίμακα). Οι τιμές των εν λόγω παραμέτρων συνδέονται έμμεσα με τα φυσικά χαρακτηριστικά του υδροσυστήματος, και συνεπώς διαφοροποιούνται για κάθε ΜΥΑ. 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 περίσσειας βροχόπτωσης που εμφανίζεται ως άμεση (εντός του χρονικού βήματος) 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, k , 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 την παραγωγή υποερμικής ροής, θ , ορίζεται ως ποσοστό της χωρητικότητας k , 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 υποερμικής 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 5.1: Παράμετροι μοντέλου μηνιαίας προσομοίωσης επιφανειακών διεργασιών.

Συμβολισμός	Περιγραφή	Διαστάσεις
r	Χωρητικότητα κατακράτησης της βροχής	[L]
c	Ποσοστό της περίσσειας της βροχόπτωσης που εμφανίζεται ως άμεση απορροή	Αδιάστατο
k	Χωρητικότητα δεξαμενής εδαφικής υγρασίας	[L]
θ	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]

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι οι τιμές των παραμέτρων εξαρτώνται όχι μόνο από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης αλλά και από το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, ανεξάρτητα αν έχουν ή όχι διαστάσεις χρόνου. Συνεπώς, αν έχουν εντοπιστεί κάποιες τιμές παραμέτρων που εξασφαλίζουν καλή προσαρμογή του μοντέλου μηνιαίας προσομοίωσης, δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε λεπτότερες χρονικές κλίμακες, όπως η ημερήσια⁴.

Υπενθυμίζεται ότι στην τελευταία περίπτωση, ο διαχωρισμός μεταξύ της ανώτερης και κατώτερης ζώνης γίνεται όχι μέσω της παραμέτρου θ (η οποία ελέγχει πλέον μόνο την παραγωγή υποδερμικής

⁴ Γενικά, στην υδρολογική μοντελοποίηση ο όρος «διεργασία» χρησιμοποιείται καταχρηστικά, καθώς αφορά σε πολύ μικρότερες χρονικές κλίμακες, και συγκεκριμένα του σημειακού (χρονικά) επεισοδίου βροχής. Προφανώς, η μηνιαία απόκριση του μοντέλου είναι το συναθροισμένο αποτέλεσμα διαφόρων επεισοδίων, το συνολικό ύψος βροχής των οποίων (μαζί με τη συνολική ζήτηση για εξάτμιση του μήνα) δίνεται ως φόρτιση του μοντέλου.

ροής) αλλά μέσω δύο διακριτών μεγεθών χωρητικότητας, ήτοι k_E και k . Γενικά, ισχύει ότι $k_E < k$, εκτός και αν το έδαφος έχει ιδιαίτερα μεγάλη δυνατότητα κατακράτησης υγρασίας στην περιοχή του ριζοστρώματος, με συνέπεια το μεγαλύτερο μέρος της αποθήκευσης νερού στην ακόρεστη ζώνη να καταναλώνεται για την ικανοποίηση της ζήτησης σε εξατμοδιαπνοή.

5.5 Υπολογισμός εισροών στο υδρογραφικό δίκτυο

Επειδή οι υδρολογικές μεταβλητές εισόδου (φορτίσεις), δηλαδή τα ύψη βροχόπτωσης, p_i , και δυναμικής εξατμοδιαπνοής, e_{pi} , μεταβάλλονται ανά υπολεκάνη i ($i = 1, \dots, NB$), ενώ οι παράμετροι του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας μεταβάλλονται ανά μονάδα υδρολογικής απόκρισης j ($j = 1, \dots, NH$), η προσομοίωση διαφοροποιείται για κάθε συνδυασμό υπολεκάνης – μονάδας υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ), που αποτελεί το ελάχιστο χωρικό στοιχείο του επιφανειακού συστήματος. Σε κάθε χρονικό βήμα (μήνα ή ημέρα), και για κάθε τέτοιο χωρικό στοιχείο, εφαρμόζεται το μοντέλο εδαφικής υγρασίας, το οποίο εκτιμά τον επιμερισμό του ύψους βροχόπτωσης p_i (που είναι κοινό για όλα τα τμήματα των ΜΥΑ που ανήκουν στην υπολεκάνη i) σε ισοδύναμα ύψη επιφανειακής απορροής, q_{ij} , πραγματικής εξατμοδιαπνοής, e_{ij} , κατείδυσης, g_{ij} , και αποθήκευσης υγρασίας, s_{ij} .

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

$$Q_i = \sum_{j=1}^{NH} q_{ij} F_{ij} \quad (5.22)$$

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

$$E_i = \sum_{j=1}^{NH} e_{ij} F_{ij} \quad (5.23)$$

$$G_i = \sum_{j=1}^{NH} g_{ij} F_{ij} \quad (5.24)$$

Επισημαίνεται ότι η εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας προϋποθέτει τον καθορισμό της αρχικής υγρασίας σε κάθε διαμέριση των υπολεκανών (ήτοι σε κάθε συνδυασμό υπολεκάνης – ΜΥΑ). 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. Βεβαίως, αν είναι γνωστό ότι οι μήνες που προηγούνται της προσομοίωσης είναι

ιδιαίτερα υγροί, ο κανόνας αυτός δεν ισχύει και ο χρήστης οφείλει να αναζητήσει κατάλληλες τιμές των αρχικών συνθηκών του μοντέλου.

Στην επιφανειακή απορροή, Q_i , προστίθεται η εκροή όλων των πηγών της υπολεκάνης, δηλαδή η βασική ροή, Q_{B_i} . Στο σημείο αυτό, δεχόμαστε ότι η πηγαία απορροή είναι γνωστή από την επίλυση του μοντέλου υπόγειας υδρολογίας, το οποίο προϋποθέτει την εφαρμογή μιας επαναληπτικής διαδικασίας, όπως εξηγείται στο Κεφάλαιο 9. Στη συνέχεια, το σύνολο της απορροής της υπολεκάνης μεταφέρεται ως συγκεντρωμένη εισροή στον κόμβο εξόδου της και θεωρείται – με δεδομένο ότι αναφερόμαστε σε μηνιαίο χρονικό βήμα – άμεσα (εντός του ίδιου μήνα) διαθέσιμη στο κατάντη υδρογραφικό δίκτυο. Διαφορετικά, πραγματοποιείται διόδευση των παροχών κατά μήκος του δικτύου, μέσω του υπολογιστικού σχήματος που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 8.

6 Μοντέλο υπόγειας υδρολογίας

6.1 Μοντέλα υπόγειων νερών

Τα μοντέλα υπόγειων νερών χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τα μοντέλα μαύρου κουτιού (black box), τα εννοιολογικά μοντέλα (conceptual) και τα μοντέλα φυσικής βάσης (physically based). Τα μοντέλα μαύρου κουτιού χαρακτηρίζονται από έλλειψη αντιστοιχίας της δομής τους με το φυσικό σύστημα. Τα εννοιολογικά μοντέλα επιχειρούν να αποδώσουν μακροσκοπικά τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας του νερού μέσα στον υδροφορέα. Τέλος τα μοντέλα φυσικής βάσης επιχειρούν να περιγράψουν όλες τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στους υδροφορείς.

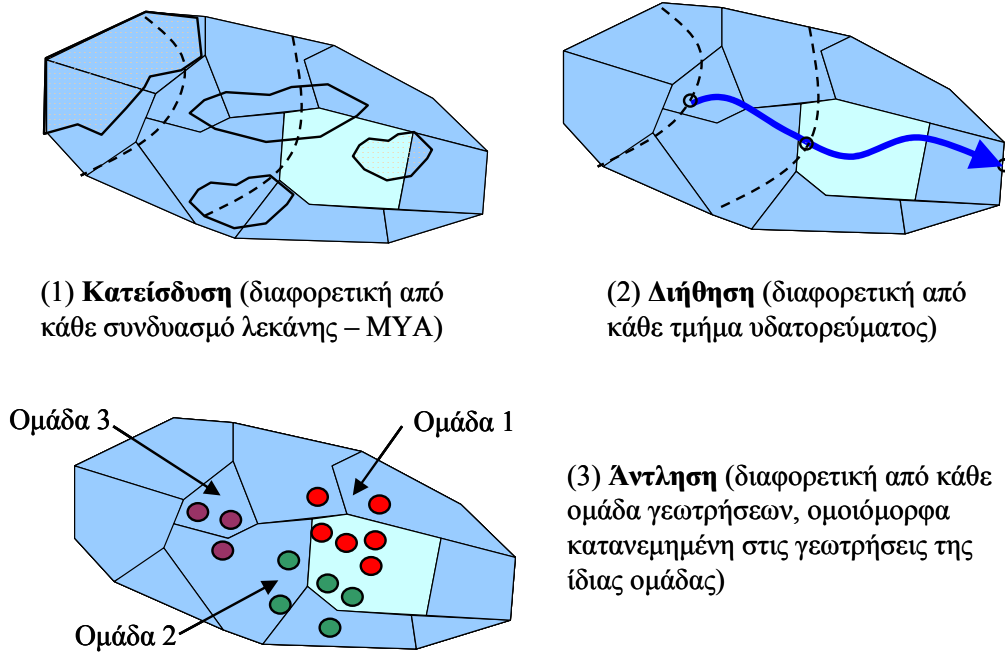
Στην κατηγορία φυσικής βάσης κατατάσσονται καταχρηστικά και μοντέλα που δεν αναπαριστούν πιστά τις φυσικές δομές και διεργασίες, για παράδειγμα μοντέλα που μοντελοποιούν ένα καρστικό υδροφορέα χρησιμοποιώντας την παραδοχή του ισοδύναμου πορώδους μέσου. Στην πραγματικότητα όλα τα μοντέλα βασίζονται σε κάποια παραδοχή λόγω περιορισμένης γνώσης των πραγματικών συνθηκών και γι' αυτό τον λόγο συνήθως η εμμονή στην πιστή αναπαράσταση επιμέρους διεργασιών δεν προάγει την ακρίβεια ενός μοντέλου.

6.2 Συνιστώσες φόρτισης υπόγειων δεξαμενών

Το πεδίο φορτίσεων του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας προκύπτει με βάση τη σχηματοποίηση της συνολικής λεκάνης σε υπολεκάνες. Σε κάθε υπολεκάνη, διαφοροποιούνται το ύψος βροχόπτωσης που προσπίπτει στην επιφάνειά της καθώς και η δυναμική εξατμοδιαπνοή, η οποία αποτελεί το θεωρητικό άνω όριο εκροής νερού προς την ατμόσφαιρα. Στο μοντέλο υπόγειας υδρολογίας, η διακριτοποίηση του πεδίου ροής βασίζεται στη διαμόρφωση ενός συστήματος πολυγωνικών κυττάρων ευέλικτης γεωμετρίας, τα οποία αναπαριστούν, σε κάτοψη, δεξαμενές αποθήκευσης του υπόγειου νερού.

Οι δεξαμενές δέχονται τριών ειδών φορτίσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1:

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



Σχήμα 6.1: 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.

Η κατανεμημένη κατείδυση από κάθε συνδυασμό υπολεκάνης – ΜΥΑ ολοκληρώνεται στην επιφάνεια των κυττάρων. Αν F_{ijk} είναι η κοινή επιφάνεια της υπολεκάνης i με την ΜΥΑ j και το κύτταρο k , g_{ij} είναι το ύψος κατείδυσης από τον συνδυασμό της υπολεκάνης i με τη ΜΥΑ j (έξοδος 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:

$$g_k = \frac{1}{F_k} \sum_{i=1}^{NB} \sum_{j=1}^{NH} g_{ij} F_{ijk} \quad (6.1)$$

όπου NB και NH το πλήθος των υπολεκάνων 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 ο όγκος 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:

$$\delta_k = \frac{1}{F_k} \sum_{i=1}^{NR} \Delta_i L_{ik} / L_i \quad (6.2)$$

όπου NR το πλήθος των κλάδων (τμήματα υδατορευμάτων). Οι απώλειες λόγω διήθησης είναι μεταβλητές εξόδου του μοντέλου διαχείρισης, το οποίο υλοποιεί την κατανομή των ροών κατά μήκος του φυσικού (υδρογραφικού) και τεχνητού δικτύου (βλ. Κεφάλαιο 7).

Ομοίως, οι απολήψεις από τις γεωτρήσεις εκτιμώνται από το διαχειριστικό μοντέλο, το οποίο υλοποιεί τη βέλτιστη κατανομή των εκροών από κάθε συνιστώσα του υδροσυστήματος, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι υδατικές χρήσεις και λειτουργικοί περιορισμοί της περιοχής μελέτης. Συγκεκριμένα, το μοντέλο εκτιμά την απόληψη από κάθε ομάδα γεωτρήσεων, την οποία στη συνέχεια επιμερίζει στις επιμέρους γεωτρήσεις κάθε ομάδας. Για τον υπολογισμό του ύψους άντλησης ανά κύτταρο, w_k , αθροίζονται οι απολήψεις που πραγματοποιούνται από το σύνολο των γεωτρήσεων κάθε κυττάρου, οι οποίες ανάγονται στην επιφάνειά του, διαιρώντας με την αντίστοιχη έκταση, A_k .

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 στη δεξαμενή i αποτελεί τη μεταβλητή κατάστασης του συστήματος, και αντιπροσωπεύει το μέσο ύψος νερού της κορεσμένης ζώνης στην περιοχή του αντίστοιχου κυττάρου. Σε συνθήκες φρεάτιου υδροφορέα, η στάθμη κυμαίνεται μεταξύ μιας κατώτατης και μιας ανώτατης τιμής, οι οποίες καθορίζονται κατά την σχηματοποίηση του μοντέλου (βλ. 4.4). Εφόσον η στάθμη ξεπεράσει την οροφή της δεξαμενής, τότε ο υδροφορέας θεωρείται περιορισμένος. Συνεπώς, το υδραυλικό φορτίο h_i της δεξαμενής i υπολογίζεται από τη σχέση:

$$h_i = \begin{cases} w_i^{\min} + w_i & \text{αν } w_i \leq w_i^{\max} \\ w_i^{\max} + (w_i - w_i^{\max}) \theta & \text{αν } w_i > w_i^{\max} \end{cases} \quad (6.3)$$

όπου $\theta \gg 1$ είναι ο λόγος της ειδικής απόδοσης προς την αποθηκευτικότητα υπό συνθήκες πίεσης (με τυπικό εύρος τιμών 10^3 - 10^6), w_i η επίκαιρη στάθμη, w_i^{\min} η βάση και w_i^{\max} η οροφή του υδροφορέα στην περιοχή του κυττάρου, αντίστοιχα. Ο άνω κλάδος στην σχέση (6.3) αντιστοιχεί σε φρεάτιες συνθήκες, ενώ ο κάτω κλάδος αντιστοιχεί σε συνθήκες περιορισμένου υδροφορέα.

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

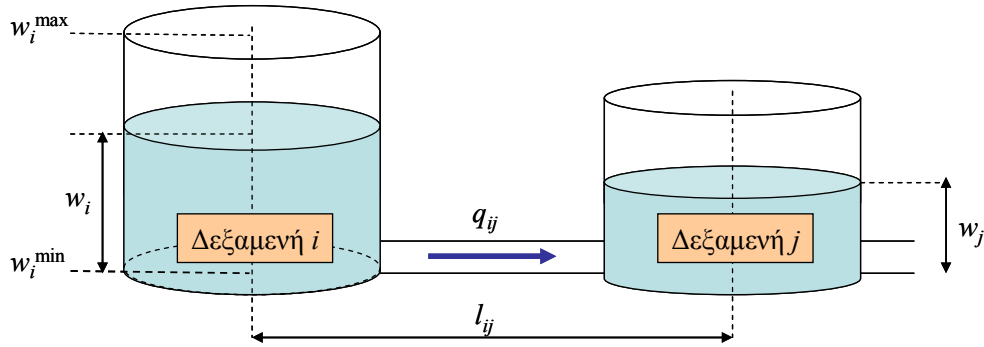
$$V_i = w_i F_i \quad (6.4)$$

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, ήτοι:

$$F_i = S_{yi} A_i \quad (6.5)$$

Η μεταβλητότητα της στάθμης της δεξαμενής εξαρτάται από την τιμή της ειδικής απόδοσης, S_{yi} , η οποία αποτελεί αδιάστατη παράμετρο του μοντέλου. Αν αυτή είναι μικρή, τότε η βάση της δεξαμενής

είναι μικρή και απαιτείται μεγάλη αύξηση 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 αύξηση στάθμης για την αποθήκευση του ίδιου όγκου. Εκτός από την ειδική απόδοση, άλλη χαρακτηριστική ιδιότητα της δεξαμενής, που επίσης αποτελεί παράμετρο του μοντέλου, είναι η υδραυλική αγωγιμότητα, η οποία συμβολίζεται με K_i και έχει μονάδες ταχύτητας.



Σχήμα 6.2: Σχηματική παράσταση μοντέλου υπόγειων διεργασιών και χαρακτηριστικά μεγέθη.

Στο Σχήμα 6.2 απεικονίζονται δύο γειτονικές δεξαμενές, με επίκαιρα υδραυλικά φορτία h_i και h_j , τα οποία υπολογίζονται από την εξίσωση (6.3). Αν $h_i > h_j$, η ροή πραγματοποιείται από τη δεξαμενή i προς τη δεξαμενή j , μέσω ενός εννοιολογικού αγωγού που υλοποιεί την κίνηση του νερού από την περιοχή του υδροφορέα που αντιστοιχεί στο κύτταρο i στην περιοχή του υδροφορέα που αντιστοιχεί στο κύτταρο j . Τα χαρακτηριστικά μεγέθη του αγωγού είναι το μήκος, l_{ij} , το εμβαδόν της κορεσμένης διατομής, α_{ij} , και η υδραυλική αγωγιμότητα, k_{ij} . Τα εν λόγω μεγέθη υπολογίζονται ως εξής:

Το μήκος, l_{ij} , του αγωγού είναι σταθερό και ισούται με την απόσταση των κέντρων βάρους των δεξαμενών i και j , ήτοι:

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (6.6)$$

Εφόσον ο υδροφορέας είναι φρεάτιος, το εμβαδό της κορεσμένης διατομής, A_{ij} , εξαρτάται από τα υψόμετρα βάσης και την επίκαιρη στάθμη των δύο δεξαμενών, ήτοι:

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} w_i \beta_{ij} & \text{αν } w_i \geq w_j^{\min} + w_j \\ (w_i^{\min} + w_i - w_j) \beta_{ij} & \text{αν } w_i < w_j^{\min} + w_j \end{cases} \quad (6.7)$$

όπου β_{ij} το μήκος της κοινής ακμής των δύο δεξαμενών, το οποίο υπολογίζεται από το ΣΓΠ (αν θεωρηθεί συνθήκη αδιαπέρατου ορίου, η ακμή λαμβάνεται μηδενική, οπότε δεν πραγματοποιείται ροή). Ο άνω κλάδος της εξίσωσης χρησιμοποιείται όταν ο πυθμένας της ανάντη δεξαμενής υπερβαίνει την κατάντη στάθμη, οπότε δεν μπορεί να υπολογιστεί μια κοινή διατομή. Κατά κανόνα, η συνθήκη αυτή αναφέρεται στην προσομοίωση της υπόγειας ροής μεταξύ δεξαμενών που βρίσκονται σε μεγάλα υψόμετρα (η λειτουργία των οποίων είναι εννοιολογική, για την αναρρύθμιση των κατεισδύσεων που

πραγματοποιούνται στους ορεινούς όγκους της λεκάνης) και πεδινών δεξαμενών· στην περίπτωση αυτή, το εμβαδόν της κορεσμένης διατομής θεωρείται ότι εξαρτάται μόνο από την ανάντη στάθμη.

Αν ο υδροφόρος είναι περιορισμένος, τότε το εμβαδό της διατομής δεν εξαρτάται από τη στάθμη αλλά από τη σχετική θέση των υψομέτρων πυθμένα και οροφής των δύο δεξαμενών. Για παράδειγμα, αν $w_i^{\min} > w_j^{\min}$, $w_i^{\max} > w_j^{\max}$ και $w_i^{\min} < w_j^{\max}$, τότε το εμβαδό ισούται με $(w_j^{\max} - w_i^{\min}) \beta_{ij}$.

Τέλος, η υδραυλική αγωγιμότητα k_{ij} του αγωγού, η οποία εκφράζει τη μέση ταχύτητα ροής στον αγωγό και είναι σταθερή, προκύπτει με συνδυασμό των αγωγιμοτήτων των δεξαμενών, K_i και K_j . Για τον υπολογισμό της μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρεις αριθμητικοί συνδυασμοί (αριθμητικός μέσος, αρμονικός μέσος, γεωμετρικός μέσος), όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Αριθμητικοί συνδυασμοί για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας k_{ij} του στοιχείου μεταφοράς που συνδέει δεξαμενές με αγωγιμότητες K_i και K_j .

Τύπος	Αριθμητική έκφραση
Αριθμητικός μέσος	$k_{ij} = (K_i + K_j) / 2$
Αρμονικός μέσος	$k_{ij} = 2 K_i K_j / (K_i + K_j)$
Γεωμετρικός μέσος	$k_{ij} = (K_i K_j)^{1/2}$

Με γνωστά όλα τα μεγέθη των δεξαμενών και του αγωγού, η επίκαιρη παροχή q_{ij} μεταξύ των δύο δεξαμενών υπολογίζεται από την εξίσωση Darcy, δηλαδή:

$$q_{ij} = k_{ij} \alpha_{ij} \frac{h_i - h_j}{l_{ij}} \quad (6.8)$$

Εφόσον υπάρχει σύστημα δεξαμενών, δια ορφώνεται ένα δίκτυο αγωγών, ο υπολογισμός της ροής στο οποίο μπορεί να γίνει, εναλλακτικά, με ένα ρητό ή ένα πεπλεγμένο σχήμα επίλυσης. Τα δύο αυτά αριθμητικά σχήματα περιγράφονται στα εδάφια 6.5 και 6.6, αντίστοιχα.

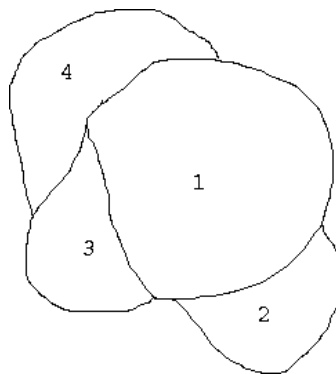
6.4 Χρονικό βήμα υπολογισμών

Η επίλυση του μοντέλου υπόγειων νερών γίνεται με χρονικό βήμα Δt , το οποίο είναι μικρότερο από την χρονική διακριτότητα της προσομοίωσης, $\Delta \tau$, που αντιστοιχεί στην περίοδο φόρτισης. Το βήμα επιλέγεται 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 υποκεφάλαιο 6.1, θεωρούνται ομοιόμορφα κατανεμημένες στο χρονικό βήμα Δt . Συνεπώς, τα ύψη κατείδυσης, διήθησης και άντλησης διαιρούνται με την ποσότητα N_δ .

6.5 Ρητό σχήμα επίλυσης

Στο ρητό σχήμα υπολογίζονται οι μεταβολές στάθμης εντός όλων των δεξαμεμών 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 ως παράδειγμα η ανταλλαγή νερού μεταξύ των δεξαμεμών i και j που φαίνονται στο Σχήμα 6.2, και στη συνέχεια 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 6.3: 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.

Στη γενική περίπτωση, οι προηγούμενες πράξεις επαναλαμβάνονται μεταξύ όλων των δεξαμεμών που επικοινωνούν μεταξύ τους. Στο Σχήμα 6.3 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 6.2 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). Στις χρονικά μεταβαλλόμενες ποσότητες, δηλαδή τις στάθμες των δεξαμεμών 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 (6.3) και ξεκινάει από την αρχή ο κύκλος υπολογισμού των μεταβολών στάθμης.

Στον Πίνακα 6.2 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.

Πίνακας 6.2: Πορεία υπολογισμών (σε κάθε χρονικό βήμα) στο υδραυλικό ανάλογο του Σχήματος 6.3.

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	$w_2 = w_2^{t-1} + \Delta w_{21} + g_2 \Delta t$	
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	$w_4 = w_4^{t-1} + \Delta w_{41} + \Delta w_{43} + g_4 \Delta t$	

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 6.3, και στη συνέχεια διατυπώνεται στη γενική, μητρική του μορφή. Εφαρμόζοντας την εξίσωση συνέχειας για τα τέσσερα κύτταρα του Σχήματος 6.3 προκύπτει:

$$Q_{12} + Q_{13} + Q_{14} + g_1^{t-1} F_1 = (w_1 - w_1^{t-1}) \frac{F_1}{\Delta t} \quad (6.9)$$

$$Q_{21} + g_2^{t-1} F_2 = (w_2 - w_2^{t-1}) \frac{F_2}{\Delta t} \quad (6.10)$$

$$Q_{31} + Q_{34} + g_3^{t-1} F_3 = (w_3 - w_3^{t-1}) \frac{F_3}{\Delta t} \quad (6.11)$$

$$Q_{41} + Q_{43} + g_4^{t-1} F_4 = (w_4 - w_4^{t-1}) \frac{F_4}{\Delta t} \quad (6.12)$$

Επειδή ο υδροφορέας είναι ελεύθερος, από την (6.3) 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 τέσσερεις αγνώστους:

$$-\left(T_{12} + T_{13} + T_{14} + \frac{F_1}{\Delta t}\right)h_1 + T_{12}h_2 + T_{13}h_3 + T_{14}h_4 = \left(-\frac{h_1^{t-1}}{\Delta t} - g_1^{t-1}\right)F_1 \quad (6.13)$$

$$T_{12}h_1 - \left(T_{12} + \frac{F_2}{\Delta t}\right)h_2 = \left(-\frac{h_2^{t-1}}{\Delta t} - g_2^{t-1}\right)F_2 \quad (6.14)$$

$$T_{13}h_1 - \left(T_{13} + T_{34} + \frac{F_3}{\Delta t}\right)h_3 + T_{34}h_4 = \left(-\frac{h_3^{t-1}}{\Delta t} - g_3^{t-1}\right)F_3 \quad (6.15)$$

$$T_{14}h_1 + T_{34}h_3 - \left(T_{14} + T_{34} + \frac{F_4}{\Delta t}\right)h_4 = \left(-\frac{h_4^{t-1}}{\Delta t} - g_4^{t-1}\right)F_4 \quad (6.16)$$

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:

$$c_i = -h_i^{t-1} \text{FDTL}_i - g_i^{t-1} F_i \quad (6.17)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} T_{ij} & \text{για } i \neq j \\ -\sum_{j=1}^{i-1} T_{ij} - \sum_{j=i+1}^n T_{ij} - \text{FDTL}_i & \text{για } i = j \end{cases} \quad (6.18)$$

όπου:

$$\text{FDTL}_i = \begin{cases} \frac{F_i}{\theta \Delta t} & \text{αν } h_i^{t-1} > w_i^{\max} \\ \frac{F_i}{\Delta t} & \text{αν } h_i^{t-1} \leq w_i^{\max} \end{cases} \quad (6.19)$$

Η επίλυση του παραπάνω συστήματος μπορεί να γίνει με κάποιον γραμμικό επιλυτή, που υλοποιεί μια αριθμητική τεχνική αντιστροφής μητρώων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται είτε η κλασική μέθοδος Gauss είτε η μέθοδος Gauss σε συνδυασμό με το κριτήριο Markowitz (υπερτερεί σημαντικά ως προς την ταχύτητα σε αραιά μητρώα) έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η δημιουργία μη μηδενικών στοιχείων στον επαυξημένο πίνακα (Martin, 2004). Επισημαίνεται ότι αν ο κánaβος της διακριτοποίησης δεν είναι ορθογωνικός, δεν προκύπτει τριδιαγώνιος πίνακας \mathbf{A} .

7 Μοντέλο κατανομής υδατικών πόρων

7.1 Η κατανομή των ροών ως πρόβλημα βελτιστοποίησης

Σε κάθε χρονικό βήμα, θεωρούνται γνωστές οι πλευρικές εισροές στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου, ως άθροισμα της επιφανειακής και υπόγειας (πηγαίας) απορροής των ανάντη υπολεκανών (σε έναν κόμβο μπορούν να συμβάλλουν μία ή περισσότερες υπολεκάνες). Δεδομένου ότι κατά μήκος των υδατορευμάτων πραγματοποιούνται απώλειες από φυσικά αίτια (διηθήσεις), απολήψεις αλλά και «εξωτερικές» εισροές λόγω π.χ. της λειτουργίας ενός έργου εκτροπής νερού από γειτονική λεκάνη, απαιτείται η διατύπωση και επίλυση των εξισώσεων υδατικού ισοζυγίου για τον υπολογισμό της κατανομής των παροχών στο υδρογραφικό δίκτυο. Επισημαίνεται ότι η προσέγγιση αυτή προϋποθέτει «συγχρονισμό» μεταξύ όλων των εισόδων και εξόδων νερού, ήτοι μηδενική ανάσχεση των παροχών κατά τη διαδρομή τους στο δίκτυο. Η υπόθεση αυτή ικανοποιείται εφόσον το μήκος του δικτύου είναι σχετικά μικρό και το χρονικό βήμα της προσομοίωσης είναι σχετικά μεγάλο (π.χ. μηνιαίο).

Όπως εξηγείται στο υποκεφάλαιο 4.5, στη ΥΔΡΟΓΕΙΟ δίνεται η δυνατότητα περιγραφής, εκτός του φυσικού συστήματος, και των έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων της λεκάνης. Σε τέτοιου τύπου διαταραγμένα υδροσυστήματα, είναι προφανές ότι η πραγματοποίηση των 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 (έστω και προσεγγιστικές) σχετικά με τις σχετικές 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. Το πρόβλημα καθίσταται πιο σύνθετο, όταν, εκτός από τις καταναλωτικές χρήσεις, εισάγονται και διαχειριστικοί περιορισμοί, π.χ. επιθυμητά όρια παροχών.

Στον Πίνακα 7.1 συνοψίζονται οι τυπικές συνιστώσες του υδροσυστήματος – φυσικού και τεχνητού – τα χαρακτηριστικά τους μεγέθη, οι σχετικοί στόχοι και λειτουργικοί περιορισμοί και οι προς εκτίμηση μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου σε κάθε χρονικό βήμα. Ειδικότερα, τα γνωστά μεγέθη είναι η προσφορά και η ζήτηση νερού στους κόμβους. Η προσφορά νερού προέρχεται από:

- την απορροή των υπολεκανών, επιφανειακή και υπόγεια (εκροή πηγών).
- την αποθήκευση νερού στις υπόγειες δεξαμενές.
- τις εξωτερικές εισροές στο δίκτυο.

Η ζήτηση νερού αναφέρεται σε στόχους κατανάλωσης νερού για ύδρευση και άρδευση, που ορίζονται σε επίπεδα προτεραιότητας. Εκτός των παραπάνω χρήσεων, στο υδροσύστημα μπορούν να οριστούν λειτουργικοί περιορισμοί ελάχιστης και μέγιστης άντλησης σε ομάδες γεωτρήσεων, περιορισμοί ελάχιστης και μέγιστης ροής σε υδραγωγεία και περιορισμοί ελάχιστης ροής σε κλάδους ποταμών, π.χ. για την τήρηση κάποιας περιβαλλοντικής απαίτησης. Συνεπώς, εκτός από τη φυσική μεταφορά του νερού κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου, επιβάλλεται και η τεχνητή μεταφορά των υδατικών πόρων, επιφανειακών (μέσω έργων εκτροπής) και υπόγειων (μέσω των ομάδων γεωτρήσεων), για την ικανοποίηση των στόχων και περιορισμών που θέτει ο χρήστης.

Πίνακας 7.1: Συνιστώσες υδροσυστήματος και χαρακτηριστικές ιδιότητες.

Συνιστώσα	Χαρακτηριστικά μεγέθη	Στόχοι ή περιορισμοί	Άγνωστη μεταβλητή
Κόμβος ποταμού ή λεκάνης	Εισροή (λόγω απορροής ή από εξωτερικές πηγές)	Ζήτηση νερού	Απόληψη
Άρδευτικός κόμβος	Εξωτερική εισροή (χρονοσειρά), ποσοστό νερού που επιστρέφει κατόντη	Άρδευτική ζήτηση	Απόληψη
Ομάδα γεωτρήσεων	Άντλητική ικανότητα, μοναδιαίο κόστος άντλησης	Ελάχιστη ή/και μέγιστη άντληση	Άντληση
Υδατόρευμα	Ποσοστό απωλειών λόγω διήθησης	Ελάχιστη ροή	Παροχή, απώλειες λόγω διήθησης
Υδραγωγείο	Παροχετευτικότητα, μοναδιαίο κόστος μεταφοράς, ποσοστό απωλειών λόγω διαρροών	Ελάχιστη ή/και μέγιστη ροή	Παροχή, απώλειες λόγω διαρροών

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

- οι απολήψεις από τους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου, της λεκάνης και τους αρδευτικούς κόμβους για την ικανοποίηση των καταναλωτικών χρήσεων νερού.
- οι αντλήσεις νερού από τις ομάδες γεωτρήσεων.
- οι παροχές στους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου (υδατορεύματα) και στα υδραγωγεία.
- οι απώλειες νερού στα υδατορεύματα και στα υδραγωγεία λόγω των διηθήσεων και διαρροών, αντίστοιχα.

Γενικά, το πρόβλημα περιλαμβάνει πολλούς βαθμούς ελευθερίας, ήτοι δεν υπάρχει μονοσήμαντος τρόπος κατανομής των ροών. Αυτό συμβαίνει αν ισχύει μία τουλάχιστον από τις ακόλουθες συνθήκες:

- ο τρόπος μεταφοράς των απολήψεων από τις πηγές στην κατανάλωση δεν είναι μονοσήμαντος, αλλά διατίθενται εναλλακτικές διαδρομές νερού και, μάλιστα, με διαφορετικό κόστος·
- πολλαπλοί και αντικρουόμενοι στόχοι πρέπει να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα·
- η συνολική ζήτηση νερού είναι μεγαλύτερη από την συνολική προσφορά του συστήματος.

Συνεπώς, εφόσον προκύπτουν αντικρουόμενες ανάγκες σε συνθήκες περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού, καθώς και εναλλακτικοί τρόποι ικανοποίησης των αναγκών, με διαφοροποίηση μάλιστα του σχετικού κόστους, τότε το πρόβλημα γενικεύεται καθώς αφορά στον εντοπισμό της προσφορότερης πολιτικής διαχείρισης των διαθέσιμων υδατικών πόρων της περιοχής μελέτης – αφορά δηλαδή σε ένα πρόβλημα *βελτιστοποίησης*. Ζητούμενο του προβλήματος είναι η εύρεση μιας βέλτιστης κατανομής των μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου σε κάθε χρονικό βήμα, έτσι ώστε να τηρούνται με αυστηρή ιεραρχία οι ακόλουθες απαιτήσεις:

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

Αποδεικνύεται ότι τα παραπάνω ανάγονται σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, μετασχηματίζοντας τις συνιστώσες του υδροσυστήματος σε συνιστώσες ενός μοντέλου διγράφου, στο οποίο ζητείται η ελαχιστοποίηση του κόστους κατανομής των ροών κατά μήκος ενός εννοιολογικού δικτύου (Koutsoyiannis *et al.*, 2002· Efstratiadis *et al.*, 2004). Στη συνέχεια περιγράφεται το μοντέλο βελτιστοποίησης που, για δεδομένες εισροές στους κόμβους, δεδομένες (και ιεραρχημένες) χρήσεις νερού και περιορισμούς στη λειτουργία του υδροσυστήματος, και δεδομένα χαρακτηριστικά των υδραυλικών έργων, υπολογίζει τις άγνωστες μεταβλητές, με τρόπο ώστε να ικανοποιούνται οι τρεις απαιτήσεις που περιγράφονται παραπάνω. Το υπόβαθρο του μοντέλου κατανομής βασίζεται στο συναφές μαθηματικό πλαίσιο του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ, στο οποίο, εκτός των λοιπών συνιστωσών, λαμβάνεται υπόψη και η λειτουργία ταμιευτήρων (Καραβοκυρός *κ.ά.*, 2004· Ευστρατιάδης *κ.ά.*, 2007). Το πρόβλημα γραμμικής βελτιστοποίησης επιλύεται ρητά σε κάθε χρονικό βήμα, ενώ τα αποτελέσματα του εκάστοτε βήματος χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου για το επόμενο. Το πλεονέκτημα μιας τέτοιας διατύπωσης είναι η ύπαρξη αναλυτικών αλγορίθμων επίλυσης, που εγγυώνται πλήρη ακρίβεια, με σχετικά μικρό υπολογιστικό φόρτο.

7.2 Θεμελιώδεις έννοιες θεωρίας γράφων - Το πρόβλημα μεταφόρτωσης

Υπό ορισμένες προϋποθέσεις (μηδενικές απώλειες λόγω διηθήσεων και διαρροών, μη επιστροφή του καταναλισκόμενου νερού στο σύστημα), η βελτιστοποίηση της κατανομής των ροών του δικτύου διατυπώνεται σε μια ειδική μορφή, γνωστή ως *πρόβλημα μεταφόρτωσης* (transshipment problem), η οποία προέρχεται από την θεωρία γράφων (Deo, 1974· Smith, 1982). Ο *γράφος* (graph) είναι μια μαθηματική οντότητα, που ορίζεται ως ένα σύνολο που αποτελείται από διατεταγμένα ζεύγη σημείων. Κάθε γράφος μπορεί να παρασταθεί με τη μορφή $(\mathcal{N}, \mathcal{A})$, όπου \mathcal{N} ένα σύνολο σημείων που ονομάζονται *κόμβοι*, και \mathcal{A} ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών που ονομάζονται *τόξα* ή *ακμές*. *Διγράφος* (digraph) καλείται ο γράφος του οποίου τα τόξα έχουν προσανατολισμένη φορά, ενώ *δίκτυο* (network) είναι ένας γράφος, στα στοιχεία του οποίου (κόμβοι και τόξα) αντιστοιχούν κάποιες ιδιότητες.

Η τοπολογία ενός γράφου που αποτελείται από n κόμβους και m τόξα περιγράφεται μαθηματικά μέσω του $n \times m$ *μητρώου πρόσπτωσης* (incidence matrix), με τιμές $a_{ij} = 1$ αν η φορά είναι από τον κόμβο i προς το τόξο j , $a_{ij} = -1$ αν η φορά είναι ανάστροφη και $a_{ij} = 0$ αν δεν υπάρχει σύνδεση μεταξύ του κόμβου i και του τόξου k .

Το πρόβλημα μεταφόρτωσης έγκειται στην ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς μιας ποσότητας που εισάγεται σε κάποιους κόμβους που καλούνται *πηγές* (sources) προς τους κόμβους *κατανάλωσης* (sinks), μέσω ενός δικτύου αποτελούμενου από n κόμβους και m τόξα. Κόμβοι στους οποίους δεν υπάρχει ούτε προσφορά ούτε ζήτηση καλούνται *ενδιάμεσοι* (intermediate).

Στο πρόβλημα μεταφόρτωσης γίνονται οι ακόλουθες υποθέσεις:

- η συνολική προσφορά ισούται με την συνολική ζήτηση·
- σε κάθε κόμβο, η συνολική εισερχόμενη ποσότητα ισούται με την συνολική εξερχόμενη μείον την καταναλισκόμενη (εξίσωση συνέχειας)·
- σε κάθε τόξο j , η μεταφερόμενη ποσότητα x_j είναι θετική και δεν μπορεί να ξεπεράσει την μεταφορική ικανότητα, u_j ·
- δεν υπάρχουν απώλειες του μεταφερόμενου φορτίου κατά μήκος μιας διαδρομής.

Στην περίπτωση που δεν ικανοποιείται η πρώτη απαίτηση, θεωρείται ένας εικονικός κόμβος, που απορροφά το πλεόνασμα της προσφοράς. Με τον τρόπο αυτό, ισχύει πάντοτε η συνθήκη:

$$\sum_{i=1}^n y_i = 0 \quad (7.1)$$

όπου y_i η τιμή της ζήτησης ή προσφοράς στον κόμβο i , με θετικό ή αρνητικό πρόσημο, αντίστοιχα.

Η εξίσωση συνέχειας διατυπώνεται στη μητρική μορφή:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

όπου a_{ij} το στοιχείο (i, j) του μητρώου πρόσπτωσης, όπου i ο δείκτης του κόμβου και j ο δείκτης του διασυνδεδεμένου τόξου.

Τέλος, οι περιορισμοί παροχτευτικότητας γράφονται στη μητρική μορφή:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_m \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_m \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

Θεωρώντας σε κάθε τόξο j ένα μοναδιαίο κόστος μεταφοράς, c_j , η κατανομή της προσφοράς y_i στα m τόξα του δικτύου, δηλαδή ο υπολογισμός των μεταφερόμενων ποσοτήτων x_j , διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, με στοχική συνάρτηση:

$$f(x_1, \dots, x_m) = \sum_{j=1}^m c_j x_j \quad (7.4)$$

Η μητρική διατύπωση του προβλήματος είναι:

$$\begin{aligned} &\text{minimize } f(\mathbf{x}) = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ &\text{έτσι ώστε } \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{y} \\ &\mathbf{0} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{aligned} \quad (7.5)$$

όπου \mathbf{x} το διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου, δηλαδή των μεταφερόμενων ποσοτήτων, \mathbf{c} το διάνυσμα τιμών μοναδιαίου κόστους, \mathbf{A} το μητρώο πρόσπτωσης, \mathbf{y} το διάνυσμα προσφοράς και ζήτησης, $\mathbf{0}$ το μηδενικό διάνυσμα, και \mathbf{u} το διάνυσμα χωρητικοτήτων.

Το παραπάνω σύστημα ορίζει ένα πρόβλημα δικτυακού προγραμματισμού (network optimization), το οποίο μπορεί να επιλυθεί αναλυτικά είτε με τον τυπικό αλγόριθμο simplex είτε με μια εξειδικευμένη παραλλαγή αυτού, τη λεγόμενη δικτυακή simplex (Chvátal, 1983, σ. 291-319). Η δικτυακή simplex επιλύει μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού, στα οποία οι συντελεστές των περιορισμών ισότητας λαμβάνουν τιμές 1, -1 ή 0. Ο αλγόριθμος πλεονεκτεί σημαντικά ως προς την ταχύτητα επίλυσης, που μπορεί να είναι έως και δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη σε σχέση με την τυπική μέθοδο simplex.

7.3 Σχηματοποίηση μοντέλου διγράφου

Έστω υδροσύστημα που αποτελείται από τις συνιστώσες του Πίνακα 7.1. Ζητούμενο είναι η αναπαράσταση του συνόλου των μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου μέσω ενός ιδεατού διγράφου, με τρόπο ώστε όλες να αντιστοιχούν στις μεταβλητές ελέγχου ενός προβλήματος μεταφόρτωσης. Δεδομένου ότι ο διγράφος διατηρεί την τοπολογία του πραγματικού δικτύου, επιδιώκεται μια διατύπωση του προβλήματος που να εγγυάται την ικανοποίηση των τριών απαιτήσεων που τέθηκαν στο υποκεφάλαιο 8.1, και συνεπώς να εξασφαλίζει τη βέλτιστη κατανομή των διαθέσιμων υδατικών πόρων στις επιμέρους συνιστώσες του υδροσυστήματος. Αυτό γίνεται με τον ορισμό κατάλληλων τιμών προσφοράς και ζήτησης στους κόμβους, και κατάλληλων τιμών παροχетеυτικότητας και μοναδιαίου κόστους στους κλάδους. Το μοναδιαίο κόστος πρέπει να είναι θετικό, δηλαδή να εκφράζει ποινή, όταν επιδιώκεται απαγόρευση μιας συγκεκριμένης μεταφοράς νερού (π.χ. διατήρηση παροχής υδραγωγείου κάτω από τον σχετικό περιορισμό μέγιστης ροής) και αρνητικό όταν επιβάλλεται μια συγκεκριμένη μεταφορά νερού (π.χ. απόληψη για την ικανοποίηση καταναλωτικού στόχου). Στο μοντέλο εισάγεται και ένας εικονικός σωρευτικός κόμβος, όπου καταλήγουν όλες οι «εκροές», ήτοι:

- η παροχή στην έξοδο του υδρογραφικού δικτύου (κατάντη κόμβος λεκάνης)·
- οι απολήψεις νερού για την ικανοποίηση καταναλωτικών χρήσεων·
- οι απώλειες νερού λόγω διηθήσεων (υδατορεύματα) και διαρροών (υδραγωγεία)·
- η πλεονάζουσα προσφορά υπόγειου νερού, η οποία δεν αντλείται από τις ομάδες γεωτρήσεων.

Ο σωρευτικός κόμβος τίθεται ώστε να ισχύουν οι υποθέσεις του προβλήματος μεταφόρτωσης, και συγκεκριμένα η υπόθεση συνολικής προσφοράς ίσης με τη συνολική ζήτηση.

Πίνακας 7.2: Τύποι κόμβων του μοντέλου διγράφου.

Τύπος	Περιγραφή	Εισροή/εκροή
0	Κόμβος υδρογραφικού δικτύου	Απορροή ανάντη υπολεκανών – Εξωτερική εισροή
1	Κόμβος υδροσυστήματος	Εξωτερική εισροή
2	Αρδευτικός κόμβος	Εξωτερική εισροή
3	Ομάδα γεωτρήσεων	Δυναμικότητα υδροφορέα
4	Σωρευτικός κόμβος	Εκροή ίση με το άθροισμα των εισροών

Πίνακας 7.3: Τύποι κλάδων του μοντέλου διγράφου.

Τύπος	Μεταβλητή μοντέλου υδροσυστήματος	Συνιστώσα δικτύου
0	Παροχή πέραν της τιμής που επιβάλλει ο περιορισμός ελάχιστης ροής (εφόσον υπάρχει)	Υδατόρευμα
1	Απώλειες νερού λόγω διήθησης ή διαρροών	Υδατόρευμα ή υδραγωγείο
2	Μεταφορά νερού κατάντη του υδροσυστήματος	Έξοδος λεκάνης
3	Παροχή μεταξύ των τιμών που επιβάλλουν οι περιορισμοί ελάχιστης και μέγιστης ροής (εφόσον υπάρχουν)	Υδραγωγείο
4	Άντληση υπόγειων νερών μεταξύ των τιμών που επιβάλλουν οι περιορισμοί ελάχιστης και μέγιστης ροής (εφόσον υπάρχουν)	Ομάδα γεωτρήσεων
5	Αποθήκευση πλεονάζουσας προσφοράς υπόγειων νερών	Ομάδα γεωτρήσεων
6	Κατανάλωση νερού	Κόμβος (απλός ή αρδευτικός)
7	Επιστροφή αρδευτικού νερού (αποστράγγιση)	Αρδευτικός κόμβος
8	Ελάχιστη επιθυμητή παροχή για κάλυψη του σχετικού περιορισμού (εφόσον υπάρχει)	Υδατόρευμα
9	Ελάχιστη επιθυμητή παροχή για κάλυψη του σχετικού περιορισμού (εφόσον υπάρχει)	Υδραγωγείο
10	Πλεονασματική παροχή, πέραν του σχετικού περιορισμού μεγίστου (εφόσον υπάρχει)	Υδραγωγείο
11	Ελάχιστη επιθυμητή άντληση για κάλυψη του σχετικού περιορισμού (εφόσον υπάρχει)	Ομάδα γεωτρήσεων
12	Πλεονασματική άντληση, πέραν του σχετικού περιορισμού μεγίστου (εφόσον υπάρχει)	Ομάδα γεωτρήσεων

Το μοντέλο διγράφου περιλαμβάνει 5 τύπους κόμβων και 13 τύπους κλάδων, ο ορισμός των οποίων δίνεται στους Πίνακες 7.2 και 7.3, αντίστοιχα. Η σχηματοποίηση του μοντέλου, δηλαδή η δημιουργία των οντοτήτων και η περιγραφή της τοπολογίας τους, γίνεται πριν την έναρξη της προσομοίωσης. Όσον αφορά στις ιδιότητες των συνιστωσών του διγράφου (εισροές κόμβων, παροχευετικότητες και μοναδιαία κόστη κλάδων), ορισμένες είναι σταθερές, οπότε αποτιμώνται άπαξ, ενώ άλλες είναι

χρονικά μεταβαλλόμενες, και συνεπώς επικαιροποιούνται σε κάθε χρονικό βήμα. Η υπολογιστική διαδικασία για κάθε συνιστώσα του υδροσυστήματος έχει ως εξής:

Οι *κόμβοι* του υδρογραφικού δικτύου και του υδροσυστήματος (κόμβοι υδραγωγείων ή απλοί κόμβοι) αντιμετωπίζονται ως χωριστές οντότητες (κόμβοι τύπου 0 και 1), καθώς στους πρώτους υπάρχει η δυνατότητα φυσικής προσφοράς νερού λόγω απορροής, ενώ στους δεύτερους η προσφορά νερού γίνεται αποκλειστικά μέσω εξωτερικών πηγών. Ο κατάντη κόμβος του υδροσυστήματος, δηλαδή ο κόμβος εξόδου της λεκάνης, συνδέεται με τον σωρευτικό κόμβο μέσω του εικονικού κλάδου τύπου 2, που αναπαριστά την εκροή του πλεονάζοντος νερού από το υδροσύστημα.

Τα *υδατορεύματα* και *υδραγωγεία* αναπαρίστανται από τους κλάδους που συνδέουν τους αντίστοιχους ανάντη και κατάντη κόμβους (κλάδοι τύπου 0 και 3, αντίστοιχα). Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των κλάδων που αναπαριστούν διαδρομές μέσω του δικτύου υδραγωγείων (παροχετευτικότητα, μοναδιαίο κόστος) ταυτίζονται με τα πραγματικά. Στους κλάδους που αντιστοιχούν σε τμήματα υδατορευμάτων, για τα οποία δεν έχει νόημα η θέσπιση φυσικού άνω ορίου παροχής, θεωρείται μια συμβατική τιμή παροχετευτικότητας που είναι μαθηματικά ισοδύναμη της άπειρης. Επιπλέον, το μοναδιαίο κόστος μεταφοράς λαμβάνει μια πολύ μικρή αρνητική τιμή, ώστε οι επιφανειακές απορροές να διοχετεύονται κατά προτεραιότητα στο υδρογραφικό δίκτυο παρά στο δίκτυο των υδραγωγείων.

Στη γενικότερη περίπτωση ύπαρξης απωλειών λόγω διηθήσεων ή διαρροών, καθώς και περιορισμών ελάχιστης και μέγιστης ροής, δημιουργούνται όχι ένας αλλά τέσσερις κλάδοι. Συγκεκριμένα:

- οι κλάδοι τύπου 1 συνδέουν τον ανάντη κόμβο με τον σωρευτικό κόμβο, και αναπαριστούν τη μεταφορά των διηθήσεων και διαρροών από υδατορεύματα και υδραγωγεία, αντίστοιχα.
- οι κλάδοι τύπου 0 και 3 αναπαριστούν την πραγματική διαδρομή κατά μήκος ενός υδατορεύματος ή υδραγωγείου, αντίστοιχα, και μεταφέρουν την επιτρεπόμενη παροχή μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής που επιβάλλουν οι σχετικοί περιορισμοί ελέγχου της ροής.
- οι κλάδοι τύπου 8 και 9 δημιουργούνται παράλληλα στην πραγματική διαδρομή του αντίστοιχου υδατορεύματος ή υδραγωγείου, αντίστοιχα, και μεταφέρουν την επιθυμητή παροχή μέχρι την τιμή που επιβάλλει ο σχετικός περιορισμός ελάχιστης ροής.
- οι κλάδοι τύπου 10 δημιουργούνται παράλληλα στην πραγματική διαδρομή και μεταφέρουν την πλεονάζουσα παροχή του σχετικού υδραγωγείου μεταξύ της τιμής που επιβάλλει ο σχετικός περιορισμός μέγιστης ροής και της παροχετευτικότητας (δεν ορίζονται αντίστοιχοι περιορισμοί σε υδατορεύματα).

Η ύπαρξη διηθήσεων και διαφυγών εισάγει επιπλέον περιορισμούς που αναιρούν τη δικτυακή διατύπωση του μοντέλου βελτιστοποίησης, ήτοι τη δομή του προβλήματος μεταφόρτωσης (βλ. 7.4). Το μοναδιαίο κόστος των σχετικών κλάδων (τύπου 1) είναι ίδιο με αυτό των πραγματικών διαδρομών

(κλάδοι τύπου 0 και 3). Όσον αφορά στις εικονικές διαδρομές που δημιουργούνται για την τήρηση των περιορισμών ελάχιστης και μέγιστης ροής, για τους κλάδους τύπου 8 και 9 είναι αρνητικό, ώστε να επιβάλλεται η μεταφορά της επιθυμητής παροχής, ενώ για τους κλάδους τύπου 10 θετικό, ώστε να εμποδίζεται η υπέρβαση του εν λόγω περιορισμού.

Οι ομάδες γεωτρήσεων αναπαρίστανται ως κόμβοι προσφοράς νερού, η «εισροή» των οποίων αντιπροσωπεύει τη δυναμικότητα του υδροφορέα. Κάθε ομάδα συνδέεται, μέσω δύο εικονικών κλάδων, με τον αντίστοιχο κόμβο του δικτύου που τροφοδοτεί (κόμβος ποταμού ή απλός κόμβος) και τον σωρευτικό κόμβο. Η παροχευτικότητα του πρώτου κλάδου (κλάδος τύπου 4) ταυτίζεται με την αντλητική ικανότητα της ομάδας, ήτοι την αθροιστική ικανότητα των μεμονωμένων γεωτρήσεων που την απαρτίζουν, ενώ η παροχευτικότητα του δεύτερου κλάδου (κλάδος τύπου 5) εξισώνεται με την εισροή. Η παροχή του κλάδου τύπου 4 αντιστοιχεί στην αντλούμενη ποσότητα νερού, ενώ η παροχή του κλάδου τύπου 5 αντιπροσωπεύει την περίσσεια νερού που διατηρείται αποθηκεύεται στον υδροφορέα. Το μοναδιαίο κόστος του κλάδου άντλησης υποδηλώνει ένα πραγματικό οικονομικό μέγεθος (ήτοι μια χαρακτηριστική ιδιότητα της ομάδας γεωτρήσεων) που δίνεται από τον χρήστη, ενώ το κόστος του κλάδου υπόγειας αποθήκευσης είναι μηδενικό, καθώς θεωρείται αδιάφορο αν οι διαθέσιμοι υπόγειοι πόροι παραμένουν ή όχι στον υδροφορέα. Μετά το πέρας των υπολογισμών, η αντλούμενη ποσότητα από κάθε ομάδα γεωτρήσεων επιμερίζεται στις επιμέρους συνιστώσες της ομάδας, με βάση τα ποσοστά συμμετοχής που ορίζει ο χρήστης (στην απλούστερη περίπτωση, η αντλούμενη παροχή ισομοιράζεται στις εν λόγω γεωτρήσεις). Στην περίπτωση ύπαρξης περιορισμών ελάχιστης και μέγιστης άντλησης, δημιουργούνται δύο επιπλέον κλάδοι, ήτοι:

- οι κλάδοι τύπου 11 δημιουργούνται παράλληλα στον κλάδο τύπου 5 και μεταφέρουν την επιθυμητή παροχή μέχρι την τιμή που επιβάλλει ο σχετικός περιορισμός ελάχιστης άντλησης·
- οι κλάδοι τύπου 12 δημιουργούνται παράλληλα στον κλάδο τύπου 5 και μεταφέρουν την πλεονάζουσα παροχή μεταξύ της τιμής που επιβάλλει ο σχετικός περιορισμός μέγιστης άντλησης και της αντλητικής ικανότητας της ομάδας.

Τέλος, σε κόμβους στους οποίους ορίζονται στόχοι κατανάλωσης δημιουργούνται εικονικοί κλάδοι (κλάδοι τύπου 6) που συνδέουν τις θέσεις ζήτησης με τον σωρευτικό κόμβο. Η παροχευτικότητα κάθε τέτοιου κλάδου είναι ίση με την επίκαιρη ζήτηση, ενώ το μοναδιαίο κόστος του είναι αρνητικό, ώστε να επιβάλλει την πραγματοποίηση απολήψεων για την ικανοποίηση του εν λόγω στόχου. Στην περίπτωση που ποσοστό της κατανάλωσης επιστρέφει στο δίκτυο, τότε δημιουργείται μία ακόμη διαδρομή (κλάδος τύπου 7), που συνδέει τη θέση ζήτησης με τον κόμβο επιστροφής. Οι επιστροφές νερού εισάγουν επιπλέον περιορισμούς στο μαθηματικό μοντέλο του διγράφου, που αναιρούν τη δικτυακή διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης (βλ. 7.5).

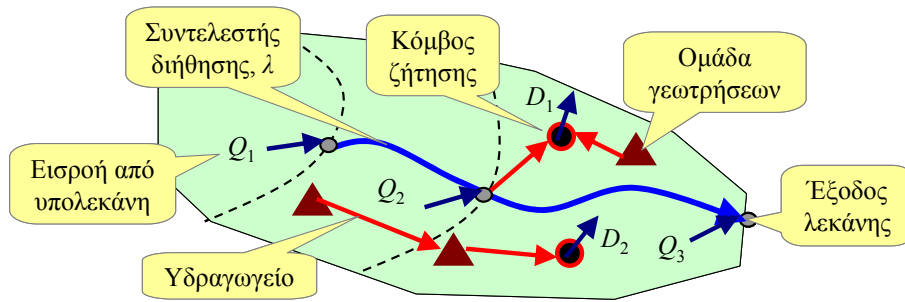
Στον Πίνακα 7.4 συνοψίζονται ο απαιτούμενος αριθμός των κόμβων και κλάδων που εισάγονται στο μοντέλο διγράφου για κάθε συνιστώσα του υδροσυστήματος. Ειδικότερα, για κάθε στόχο και

λειτουργικό περιορισμό του συστήματος εισάγεται ένας εικονικός κλάδος, το μοναδιαίο κόστος του οποίου εξαρτάται από το επίπεδο προτεραιότητας του αντίστοιχου στόχου/περιορισμού. Ειδικότερα, στην περίπτωση στόχων κατανάλωσης και περιορισμών ελάχιστης επιθυμητής παροχής ή άντλησης, το κόστος είναι αρνητικό, ώστε να υποχρεώσει τη μεταφορά νερού. Στην αντίστροφη περίπτωση περιορισμών μέγιστης επιδιωκόμενης παροχής ή άντλησης, το κόστος είναι θετικό ώστε να επιβάλει ποινή στην παραβίαση του εν λόγω περιορισμού. Τα κόστη αυτά είναι, κατ' απόλυτη τιμή, μια τάξη μεγέθους μικρότερα την ποινής που σχετίζεται με την ικανοποίηση των φυσικών περιορισμών. Λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο καθορισμού τους δίνονται στο υποκεφάλαιο 7.5.

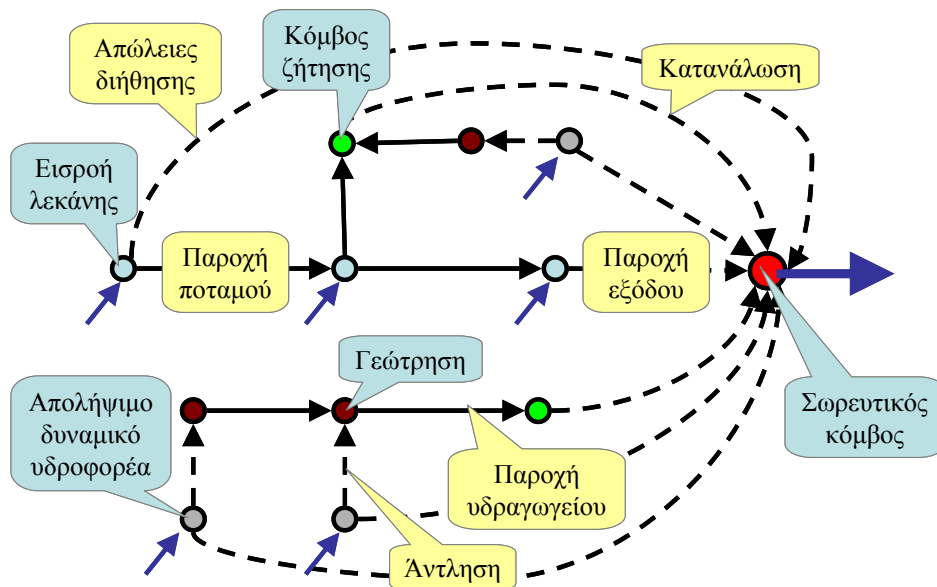
Πίνακας 7.4: Απαιτούμενος αριθμός κόμβων και κλάδων που εισάγονται στο μοντέλου διγράφου για κάθε συνιστώσα του υδροσυστήματος.

Συνιστώσα υδροσυστήματος	Πλήθος κόμβων	Πλήθος κλάδων
Ενδιάμεσος κόμβος υδατορεύματος ή υδραγωγείου	1	0
Έξοδος λεκάνης	1	1
Ομάδα γεωτρήσεων	1	2
Υδατόρευμα ή υδραγωγείο χωρίς απώλειες	2	1
Υδατόρευμα ή υδραγωγείο με απώλειες	2	2
Στόχος κατανάλωσης, χωρίς δυνατότητα επιστροφής νερού	1	1
Στόχος κατανάλωσης, με δυνατότητα επιστροφής νερού	1	2
Περιορισμός ελάχιστης ή μέγιστης παροχής	0	1
Περιορισμός ελάχιστης ή μέγιστης άντλησης	0	1

Στο Σχήμα 7.1 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, είναι γνωστές οι επίκαιρες εισροές λόγω απορροής στους τρεις κόμβους του υδρογραφικού δικτύου, Q_1 , Q_2 και Q_3 , αντίστοιχα. Στο ανάντη κλάδο υδατορεύματος, είναι επίσης γνωστός ο συντελεστής διήθησης λ , που αποτελεί παράμετρο του μοντέλου. Επιπλέον, είναι γνωστή η επίκαιρη ζήτηση για δύο καταναλωτικές χρήσεις D_1 και D_2 , αντίστοιχα, οι παροχευετικότητες και τα μοναδιαία κόστη των υδραγωγείων, καθώς και η αντλητική ικανότητα και τα μοναδιαία κόστη των ομάδων γεωτρήσεων.



Σχήμα 7.1: Σχηματική παράσταση ενός υποθετικού υδροσυστήματος.



Σχήμα 7.2: Παράδειγμα μετασχηματισμού των συνιστωσών του υποθετικού υδροσυστήματος σε συνιστώσες του μοντέλου διγράφου.

Στο Σχήμα 7.2 απεικονίζεται ο μετασχηματισμός του υποθετικού υδροσυστήματος του παραδείγματος σε μοντέλο διγράφου. Με συνεχή γραμμή απεικονίζονται οι κλάδοι που εκφράζουν πραγματικές διαδρομές νερού (υδατορεύματα και υδραγωγεία), οι οποίοι διατηρούν την τοπολογία και τις χαρακτηριστικές τους ιδιότητες (παροχευτικότητα και κόστος). Επιπλέον, εισάγονται εικονικοί κλάδοι που «μεταφέρουν» την παροχή που καταλήγει στην έξοδο της λεκάνης, τις απολήψεις, τις απώλειες λόγω διήθησης και το υπολειπόμενο (μετά την πραγματοποίηση των αντλήσεων) απολήψιμο δυναμικό του υδροφορέα, στο σωρευτικό κόμβο, η εκροή του οποίου ισούται με το σύνολο της προσφοράς νερού στο συγκεκριμένο χρονικό βήμα. Η φυσική μεταφορά νερού κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου γίνεται χωρίς κόστος (στην πραγματικότητα με οριακό αρνητικό κόστος), ενώ οι εκροές μέσω των υδραγωγείων και γεωτρήσεων γίνονται με τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται το πραγματικό κόστος μεταφοράς και άντλησης, αντίστοιχα. Αν θεωρηθεί ότι η χρήση νερού που αντιστοιχεί στη ζήτηση D_1 είναι σε υψηλότερο επίπεδο προτεραιότητας σε σχέση με τη D_2 , τότε στον

αντίστοιχο εικονικό κλάδο που μεταφέρει την κατανάλωση νερού τίθεται μεγαλύτερο μοναδιαίο αρνητικό κόστος, ώστε να πραγματοποιηθεί πρώτα η εκροή για το στόχο 1 και μετά για το στόχο 2.

7.4 Προσομοίωση διαρροών και διηθήσεων

Στην περίπτωση που το υδροσύστημα περιλαμβάνει στοιχεία μεταφοράς με γραμμικές απώλειες, δηλαδή υδατορεύματα με διηθήσεις ή υδραγωγεία με διαρροές, τότε στο πρόβλημα βελτιστοποίησης εισάγονται επιπλέον περιορισμοί. Έστω στοιχείο μεταφοράς με συντελεστή διαρροών, λ , στο οποίο εισέρχεται ποσότητα νερού x , όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.3. Αν x_1 η ποσότητα νερού που καταλήγει στον κατάντη κόμβο και x_2 οι κατά μήκος απώλειες, ισχύουν οι ακόλουθες προφανείς σχέσεις:

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 &= x \\ x_1 &= (1 - \lambda) x \\ x_2 &= \lambda x \end{aligned} \quad (7.6)$$

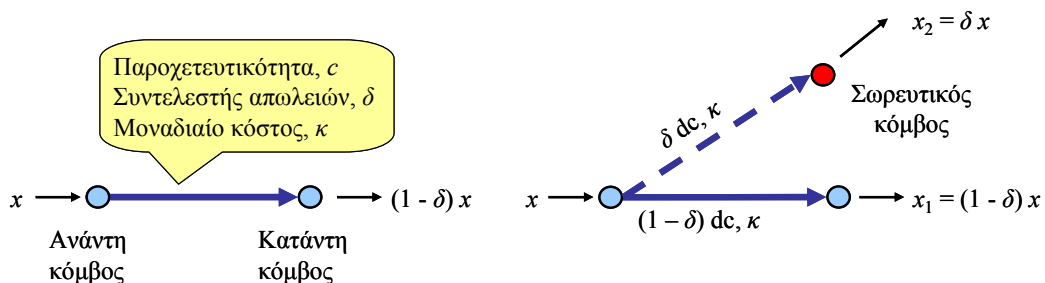
Με συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων, προκύπτει ο φυσικός περιορισμός:

$$x_2 - \frac{\lambda}{1 - \lambda} x_1 = 0 \quad (7.7)$$

που σε μητρική μορφή γράφεται:

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (7.8)$$

όπου \mathbf{A} μητρώο με στοιχεία από το σύνολο $\{-1, \lambda_i / 1 - \lambda_i, 0\}$ και i ο δείκτης του στοιχείου μεταφοράς. Συνεπώς, αν και η σχέση (7.7), η οποία τίθεται επιπρόσθετα των εξισώσεων συνέχειας στους κόμβους, εξακολουθεί να είναι γραμμική, οι συντελεστές της δεν λαμβάνουν πλέον τιμές από το σύνολο $\{-1, 1, 0\}$, όπως συμβαίνει με τα στοιχεία του μητρώου πρόσπτωσης \mathbf{A} . Αυτό σημαίνει ότι δεν ισχύουν οι μαθηματικές υποθέσεις του μοντέλου μεταφόρτωσης, και συνεπώς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η δικτυακή μέθοδος simplex για την επίλυση του προβλήματος.



Σχήμα 7.3: Μετασηματισμός στοιχείου μεταφοράς με απώλειες σε συνιστώσες μοντέλου διγράφου.

7.5 Προσομοίωση επιστροφών νερού

Η αναπαράσταση των επιστροφών νερού διαμέσου των αρδευτικών κόμβων παρουσιάζει ομοιότητες με την περίπτωση των απωλειών σε υδατορεύματα και υδραγωγεία. Έστω d η επίκαιρη ζήτηση σε έναν αρδευτικό κόμβο και μ το ποσοστό της κατανάλωσης που επιστρέφει σε έναν άλλο κόμβο του υδросυστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.4. Αν x είναι η ολική απόληψη, x_1 η καθαρή ποσότητα που καταναλώνεται και x_2 η ποσότητα που επιστρέφει, ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned}x_1 + x_2 &= x \\x_1 &= (1 - \mu)x \\x_2 &= \mu x\end{aligned}\quad (7.9)$$

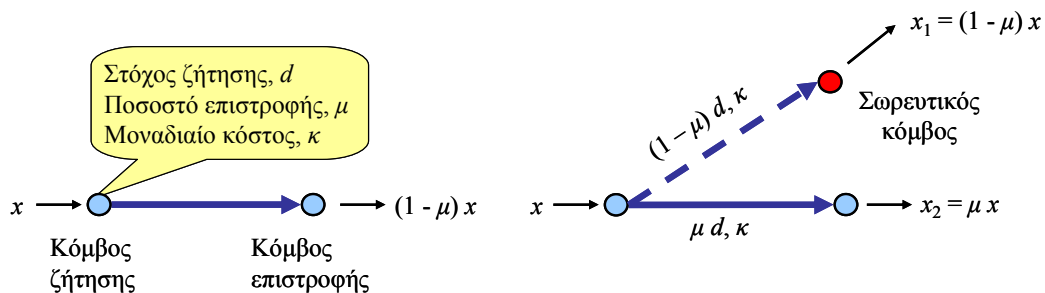
Με συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων, προκύπτει ο φυσικός περιορισμός:

$$x_2 - \frac{\mu}{1 - \mu} x_1 = 0 \quad (7.10)$$

που σε μητρική μορφή γράφεται:

$$\mathbf{M} \mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (7.11)$$

όπου \mathbf{M} μητρώο με στοιχεία από το σύνολο $\{-1, \mu_i / 1 - \mu_i, 0\}$ και i ο δείκτης του κόμβου. Κατά συνέπεια, και σε αυτή την περίπτωση δεν ισχύουν οι μαθηματικές υποθέσεις του μοντέλου μεταφόρτωσης, καθώς εκτός των εξισώσεων συνέχειας τίθενται επιπλέον περιορισμοί, με συντελεστές εκτός του συνόλου $\{-1, 1, 0\}$.



Σχήμα 7.4: Μετασηματισμός κόμβου ζήτησης με επιστροφή σε συνιστώσες μοντέλου διγράφου.

7.6 Αναδρομικός υπολογισμός μοναδιαίου κόστους

Ο τρόπος καθορισμού των τιμών μοναδιαίου κόστους συνιστά ένα εξαιρετικά σημαντικό στοιχείο του μαθηματικού πλαισίου, καθώς εξασφαλίζει την ικανοποίηση των τριών απαιτήσεων που τέθηκαν στο υποκεφάλαιο 7.1. Ως γνωστό, 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 ή άντλησης, το

κόστος οφείλει να είναι αρνητικό, ώστε να υποχρεώσει την μεταφορά νερού. Αντίθετα, στην περίπτωση περιορισμών μέγιστης παροχής ή άντλησης, το κόστος οφείλει να 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, ώστε να εξασφαλίζεται κατά προτεραιότητα η ικανοποίηση των στόχων και περιορισμών έναντι της ελαχιστοποίησης του κόστους άντλησης και μεταφοράς των υδατικών πόρων της λεκάνης.

Οι μεταβλητές του μοντέλου, όπως έχουν αντιστοιχιστεί στους κλάδους του δικτύου, ομαδοποιούνται σε τέσσερα επίπεδα σημαντικότητας, έτσι ώστε το μοναδιαίο κόστος (κατ' απόλυτη τιμή) κάθε κλάδου που ανήκει στο επίπεδο k να ξεπερνά το αθροιστικό κόστος των κλάδων όλων των προηγούμενων κατηγοριών, δηλαδή:

$$|c|^{[k]} = \sum_{j=1}^{n(k)} |c_j| + \varepsilon \quad (7.12)$$

όπου c_j το μοναδιαίο κόστος του κλάδου j , $n(k)$ το πλήθος των κλάδων που κατατάσσονται έως το k επίπεδο σημαντικότητας ($k = 0, 1, 2, 3$) και ε μια μικρή θετική τιμή. Άμεση συνέπεια της (7.12) είναι αφενός η ανεξάρτητη ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους κάθε κατηγορίας και αφετέρου η κατά προτεραιότητα ελαχιστοποίηση των τιμών κόστους που ανήκουν σε υψηλότερες κατηγορίες.

Υπενθυμίζεται ότι κάθε κλάδος αναπαριστά μια συγκεκριμένη διεργασία με αρνητικό, μηδενικό ή θετικό μοναδιαίο κόστος, ανάλογα με το αν η πραγματοποίησή της είναι επιθυμητή, αδιάφορη ή ανεπιθύμητη, αντίστοιχα. Ο υπολογισμός των επιμέρους τιμών κόστους γίνεται με μια αναδρομική διαδικασία, που ξεκινά από τα χαμηλότερα επίπεδα. Συγκεκριμένα, χωρίς κόστος πραγματοποιούνται οι εξής διεργασίες, που εντάσσονται στο **μηδενικό επίπεδο** σημαντικότητας:

- η μεταφορά της επιθυμητής παροχής στα υδατορεύματα, μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής που ορίζουν οι σχετικοί λειτουργικοί περιορισμοί (κλάδοι τύπου 0).
- η πραγματοποίηση διηθήσεων στα υδατορεύματα (κλάδοι τύπου 1).
- η αποθήκευση του πλεονασματικής διαθεσιμότητας υπόγειων νερών (κλάδοι τύπου 5).
- η μεταφορά νερού κατάντη του υδροσυστήματος (κλάδος τύπου 2).

Κάθε άλλη διεργασία ή, ισοδύναμα, κάθε άλλος τύπος κλάδου, κατατάσσεται σε μη μηδενικό επίπεδο σημαντικότητας. Συγκεκριμένα:

Στο **επίπεδο 1** εντάσσονται οι διεργασίες με πραγματικό κόστος, δηλαδή:

- η μεταφορά παροχής μέσω των υδραγωγείων, μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής που ορίζουν οι σχετικοί λειτουργικοί περιορισμοί (κλάδοι τύπου 3).
- η πραγματοποίηση διαρροών στα υδραγωγεία (κλάδοι τύπου 1).

- η άντληση μέσω των ομάδων γεωτρήσεων, μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής που ορίζουν οι σχετικοί λειτουργικοί περιορισμοί (κλάδοι τύπου 4).

Τα κόστη όλων των κλάδων υπολογίζονται άμεσα, με βάση το μοναδιαίο κόστος μεταφοράς (κλάδοι τύπου 1 και 3) ή άντλησης (κλάδοι τύπου 4). Στο αρχικό κόστος προστίθεται η ελάχιστη τιμή ε , ώστε ακόμα και αν μια ροή πραγματοποιείται χωρίς κόστος, να διαφοροποιείται σε σχέση με τις ροές του μηδενικού επιπέδου. Αυτό εξασφαλίζει ότι οι πλεονάζουσες επιφανειακές εισροές μεταφέρονται με φυσικό τρόπο, μέσω του υδρογραφικού δικτύου, και όχι μέσω του δικτύου των υδραγωγείων, ενώ τα πλεονάζοντα υπόγεια νερά διατηρούνται αποθηκευμένα, και δεν αντλούνται μέσω των ομάδων γεωτρήσεων.

Το **επίπεδο 2** αναφέρεται στην ικανοποίηση των στόχων και λειτουργικών περιορισμών, με βάση τη σειρά προτεραιότητας που ορίζει ο χρήστης. Αν επιδιώκεται η μεταφορά, άντληση ή απόληψη νερού, τότε το κόστος είναι αρνητικό, διαφορετικά, είναι θετικό. Με αρνητικό κόστος πραγματοποιούνται οι εξής διεργασίες:

- η κατανάλωση νερού για την ικανοποίηση του σχετικού στόχου ζήτησης (κλάδοι τύπου 6).
- η μεταφορά παροχής μέσω υδατορευμάτων και υδραγωγείων για την ικανοποίηση των σχετικών περιορισμών ελάχιστης ροής (κλάδοι τύπου 8 και 9).
- η απόληψη υπόγειων νερών μέσω των ομάδων γεωτρήσεων για την ικανοποίηση των σχετικών περιορισμών ελάχιστης άντλησης (κλάδοι τύπου 11).

Ομοίως, με θετικό κόστος πραγματοποιούνται οι εξής διεργασίες:

- η μεταφορά πλεονάζουσας παροχής μέσω των υδραγωγείων, καθ' υπέρβαση του σχετικού περιορισμού μέγιστης ροής (κλάδοι τύπου 10).
- η άντληση πλεονάζουσας παροχής μέσω των ομάδων γεωτρήσεων, καθ' υπέρβαση του σχετικού περιορισμού μέγιστης άντλησης (κλάδοι τύπου 12).

Οι επιμέρους τιμές κόστους, κατ' απόλυτη τιμή, εξαρτώνται από τη σειρά προτεραιότητας (ιεραρχία), $\pi(k)$, κάθε στόχου ή λειτουργικού περιορισμού, k . Δύο ή περισσότεροι στόχοι μπορούν να ενταχθούν στην ίδια ιεραρχία. Έστω $N^{[\pi]}$ το πλήθος των στόχων που ανήκουν στην ιεραρχία π και $K(\pi)$ το αθροιστικό κόστος όλων των κλάδων μέχρι την τρέχουσα ιεραρχία (στους οποίους, προφανώς, περιλαμβάνονται και όλοι οι κλάδοι που εντάσσονται στα προηγούμενα επίπεδα σημαντικότητας). Τότε, το κόστος (σε απόλυτη τιμή) του κλάδου που αντιστοιχεί στο στόχο k με ιεραρχία $\pi(k)$ ισούται με το τρέχον αθροιστικό κόστος, το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$K(\pi) = K(\pi - 1) + N^{[\pi-1]} [K(\pi - 1) + \varepsilon] \quad (7.13)$$

όπου $K(0)$ το αθροιστικό κόστος των κλάδων που ανήκουν στα επίπεδα σημαντικότητας 0 και 1. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι μεταξύ δύο στόχων που εντάσσονται σε διαφορετική ιεραρχία, ικανοποιείται πρώτα αυτός που βρίσκεται στην υψηλότερη. Επιπλέον, εξασφαλίζεται ότι όλες οι διεργασίες του επιπέδου 2 υλοποιούνται κατά προτεραιότητα σε σχέση με όλες τις προηγούμενες. Συνεπώς, το μοντέλο πρώτα επιδιώκει την ικανοποίηση των στόχων και λειτουργικών περιορισμών, και ακολούθως τον εντοπισμό της οικονομικότερης κατανομής των διαθέσιμων υδατικών πόρων στο υδροσύστημα.

Τέλος στο **επίπεδο 3** εντάσσονται οι κλάδοι τύπου 7, που μεταφέρουν τις αποστραγγίσεις, ήτοι τις επιστροφές ποσοστού του αρδευτικού νερού που καταναλώθηκε. Πρόκειται για φυσικό περιορισμό, με μοναδιαίο κόστος ίσο με το άθροισμα (κατ' απόλυτη τιμή) όλων των επιμέρους τιμών κόστους.

7.7 Επικαιροποίηση ιδιοτήτων διγράφου

Η διατύπωση του μαθηματικού μοντέλου του διγράφου προϋποθέτει τη διαμόρφωση ενός πλήθους μητρώων, συγκεκριμένα:

- του μητρώου πρόσπτωσης **A**, με στοιχεία από το σύνολο $\{-1, 1, 0\}$, που περιγράφει τις εξισώσεις συνέχειας των κόμβων με βάση την τοπολογία του μοντέλου, δηλαδή τον τρόπο σύνδεσης των κόμβων και κλάδων·
- του μητρώου απωλειών **Λ**, με στοιχεία από το σύνολο $\{-1, \lambda_i / 1 - \lambda_i, 0\}$, που περιγράφει τις εξισώσεις μεταφοράς ενός σταθερού ποσοστού λ_i της διερχόμενης παροχής των υδατορευμάτων και υδραγωγείων εκτός του υδροσυστήματος, δηλαδή στο σωρευτικό κόμβο·
- του μητρώου επιστροφών **M**, με στοιχεία από το σύνολο $\{-1, \mu_i / 1 - \mu_i, 0\}$, που περιγράφει τις εξισώσεις μεταφοράς ενός σταθερού ποσοστού μ_i της καταναλισκόμενης ποσότητας κάθε κόμβου σε κάποιον άλλο κόμβο του υδροσυστήματος·
- του διανύσματος προσφοράς **y**, που περιγράφει τις εισροές επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων στους κόμβους του δικτύου και τις ομάδες γεωτρήσεων, και την αρνητική προσφορά (ζήτηση) στον σωρευτικό κόμβο του διγράφου·
- του διανύσματος χωρητικότητας **u**, που περιγράφει την πραγματική ή εικονική μεταφορική ικανότητα των κλάδων του διγράφου·
- του διανύσματος μοναδιαίου κόστους **c**, που περιγράφει το πραγματικό ή εικονικό κόστος μεταφοράς νερού, θετικό ή αρνητικό, διαμέσου των κλάδων του διγράφου.

Τα στοιχεία των μητρώων πρόσπτωσης **A**, απωλειών **Λ** και επιστροφών **M** ορίζονται άπαξ (ήτοι στην αρχή της προσομοίωσης), καθώς πρόκειται για σταθερά μεγέθη του υδροσυστήματος. Ομοίως, άπαξ

ορίζονται τα στοιχεία του διανύσματος μοναδιαίου κόστους \mathbf{c} . Από την άλλα πλευρά, τα στοιχεία του διανύσματος προσφοράς \mathbf{y} είναι μεταβλητά και υπολογίζονται ως εξής:

$$y_i = \begin{cases} Q_i + I_i & \text{στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου} \\ I_i & \text{στους λοιπούς κόμβους του υδροσυστήματος} \\ PC_i & \text{στις ομάδες γεωτρήσεων} \end{cases} \quad (7.14)$$

όπου Q_i η εισροή λόγω επιφανειακής και υπόγειας απορροής, I_i η εισροή από εξωτερικές πηγές και PC_i η αντλητική ικανότητα της αντίστοιχης ομάδας γεωτρήσεων. Προφανώς, τα παραπάνω μεγέθη (πλην της αντλητικής ικανότητας) επικαιροποιούνται σε κάθε χρονικό βήμα. Στο σωρευτικό κόμβο τίθεται ως ζήτηση (με αρνητικό πρόσημο) το σύνολο της προσφοράς νερού στο υδροσύστημα, Y , έτσι ώστε να ικανοποιείται η αναγκαία συνθήκη (7.1). Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως μαθηματικά ισοδύναμη της άπειρης χωρητικότητας στους κλάδους τύπου 0 (κλάδοι υδατορευμάτων) και 2 (κλάδος που μεταφέρει την απορροή εξόδου της λεκάνης), ήτοι :

$$u^{[0]} = u^{[2]} = Y \quad (7.15)$$

Τα λοιπά στοιχεία του διανύσματος \mathbf{u} , δηλαδή οι πεπερασμένες χωρητικότητες των κλάδων, του διγράφου αντιστοιχούν είτε σε πραγματικά είτε σε εικονικά μεγέθη. Τα πρώτα αναφέρονται στους φυσικούς περιορισμούς του δικτύου, ήτοι την παροχτευτικότητα των υδραγωγείων και την αντλητική ικανότητα των ομάδων γεωτρήσεων. Τα υπόλοιπα εκφράζουν επιθυμητά μεγέθη, όπως η ζήτηση νερού, καθώς και όρια που προκύπτουν από τους περιορισμούς ελάχιστων και μέγιστων παροχών και αντλήσεων. Συγκεκριμένα:

Στην περίπτωση κόμβου με επίκαιρη αρδευτική ζήτηση D και ποσοστό επιστροφής μ (όπου $\mu > 0$ μόνο για αρδευτικούς κόμβους), η χωρητικότητα του εικονικού κλάδου που συνδέει τον εν λόγω κόμβο με το σωρευτικό (κλάδος τύπου 6) δίνεται από τη σχέση:

$$u^{[6]} = D (1 - \mu) \quad (7.16)$$

Στην περίπτωση υδραγωγείου παροχτευτικότητας DC, με επίκαιρους περιορισμούς ελάχιστης και μέγιστης ροής Q_{\min} και Q_{\max} , αντίστοιχα, και συντελεστή διαρροών λ , οι χωρητικότητες των σχετικών κλάδων τύπου 1 (απώλειες λόγω διαρροών), 3 (παροχή μεταξύ του ελάχιστου και μέγιστου ορίου), 9 (παροχή έως την ελάχιστη επιθυμητή) και 10 (παροχή πέραν της επιτρεπόμενης) δίνονται από τις σχέσεις:

$$u^{[1]} = \lambda DC \quad (7.17)$$

$$u^{[3]} = [\min (DC, Q_{\max}) - \min (DC, Q_{\min})] (1 - \lambda) \quad (7.18)$$

$$u^{[9]} = \min (DC, Q_{\min}) (1 - \lambda) \quad (7.19)$$

$$u^{[10]} = \max [(0 - \min (DC, Q_{\max})) (1 - \lambda)] \quad (7.20)$$

Στα υδατορεύματα όπου δεν υπάρχουν περιορισμοί παροχευτικότητας και μέγιστης ροής, εφόσον υπάρχει περιορισμός ελάχιστης επιθυμητής παροχής, τότε η χωρητικότητα του κλάδου τύπου 8, ο οποίος μεταφέρει την παροχή έως την ελάχιστη επιθυμητή, ισούται με:

$$u^{[8]} = Q_{\min} \quad (7.21)$$

Τέλος, στην περίπτωση ομάδας γεωτρήσεων αντλητικής ικανότητας PC, με επίκαιρους περιορισμούς ελάχιστης και μέγιστης άντλησης P_{\min} και P_{\max} , αντίστοιχα, οι χωρητικότητες των κλάδων τύπου 4 (άντληση μεταξύ του ελάχιστου και μέγιστου ορίου), 11 (άντληση έως την ελάχιστη επιθυμητή) και 12 (άντληση πέραν της επιτρεπόμενης) δίνονται από τις σχέσεις:

$$u^{[4]} = \min (PC, P_{\max}) - \min (PC, P_{\min}) \quad (7.22)$$

$$u^{[11]} = \min (PC, P_{\min}) \quad (7.23)$$

$$u^{[12]} = \max [0 - \min (PC, P_{\max})] \quad (7.24)$$

7.8 Επίλυση προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού

Με γνωστά πλέον τα στοιχεία των μητρώων, διαμορφώνεται το ακόλουθο πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού:

$$\begin{aligned} & \text{minimize } f(\mathbf{x}) = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ & \text{έτσι ώστε } \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{y} \\ & \quad \mathbf{\Lambda} \mathbf{x} = \mathbf{0} \\ & \quad \mathbf{M} \mathbf{x} = \mathbf{0} \\ & \quad \mathbf{0} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{aligned} \quad (7.25)$$

Το εν λόγω πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι ελαφρά τροποποιημένο σε σχέση με το τυποποιημένο μοντέλο μεταφόρτωσης, διατηρεί ωστόσο ένα εξαιρετικά ισχυρό πλεονέκτημα, που είναι η *αραιή* (sparse) δομή των μητρώων περιορισμών, δηλαδή η ύπαρξη πολλών μηδενικών στοιχείων. Επιπλέον, μέσω μιας ειδικής διαδικασίας, επιδιώκεται η τοποθέτηση των μη μηδενικών στοιχείων όσο το δυνατό πιο κοντά στη διαγώνιο. Η δομή αυτή επιτρέπει την εφαρμογή ειδικών παραλλαγών της μεθόδου simplex (όχι ωστόσο της δικτυακής simplex), που εγγυώνται πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα επίλυσης σε σχέση με τον συμβατικό αλγόριθμο.

8 Μοντέλο διόδευσης ροών στο υδρογραφικό δίκτυο

8.1 Περιγραφή του προβλήματος και παραδοχές

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία για την Εκτίμηση και Διαχείριση του Πλημμυρικού Κινδύνου δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην προσαρμογή εργαλείων κατάλληλων για την προσομοίωση των σχετικών υδρολογικών διεργασιών σε περιοχές υψηλού πλημμυρικού ρίσκου. Επειδή η μοντελοποίηση των πλημμυρών απαιτεί σχετικά λεπτομερείς χωρικές και χρονικές αναλύσεις, η επιλογή του μοντέλου ελέγχεται από τη διαθέσιμη κατανεμημένη υδρολογική πληροφορία. Η αξία των δεδομένων (κυρίως των δειγμάτων στάθμης-παροχής) είναι αναμφισβήτητη, καθώς η ποιότητα της βαθμονόμησης και, συνακόλουθα, της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου, εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα αξιόπιστων παρατηρήσεων σε πολλαπλές θέσεις. Από την άλλη πλευρά, η αραιότητα των δεδομένων αποτελεί παγκόσμιο πρόβλημα των υδρολογικών μελετών, που γίνεται όλο και πιο σοβαρό εξαιτίας της συρρίκνωσης και υποβάθμισης των μετρητικών υποδομών. Συνεπώς, είναι κρίσιμη η ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων που είναι φειδωλά σε απαιτήσεις δεδομένων (Efstratiadis *et al.*, 2009).

Στην κατεύθυνση αυτή, προσαρμόστηκε η δομή του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, ώστε να αναπαριστά τις υδρολογικές διεργασίες σε ημερήσια χρονική κλίμακα, η οποία είναι ικανοποιητική για τη μελέτη πλημμυρικών φαινομένων σε σχετικά μεγάλες λεκάνες. Στη κλίμακα αυτή (καθώς και σε λεπτότερες), η κύρια τροποποίηση του μοντέλου αφορά στην αναπαράσταση του φαινομένου χρονικής ανάσχεσης της ροής κατά τη διαδρομή του πλημμυρικού κύματος στο υδρογραφικό δίκτυο, ήτοι την ενσωμάτωση διεργασιών *υδραυλικής διόδευσης* (routing). Σε αντίθεση με τη μηνιαία προσομοίωση, στην οποία η απορροή ανάντη θεωρείται στο σύνολό της και εντός του ίδιου χρονικού βήματος διαθέσιμη κατάντη, στην ημερήσια ανάλυση η απορροή «μεταφέρεται» κατάντη με χρονική υστέρηση, και επιπλέον οι αιχμές της εξομαλύνονται λόγω της δυνατότητας προσωρινής αποθήκευσης νερού κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου.

Στα τυπικά υδρολογικά πακέτα πλημμυρών, τα οποία προφανώς εμπεριέχουν μοντέλα διόδευσης, οι απαιτούμενες χρονοσειρές εισόδου (επιφανειακές βροχοπτώσεις) καθώς και τα δεδομένα ελέγχου (χρονοσειρές παροχών ή μεμονωμένα υδρογραφήματα πλημμυρών) δίνονται σε ωριαία ή λεπτότερα διαστήματα, ενώ για τους υδραυλικούς υπολογισμούς ζητούνται οι αναλυτικές υδρομορφολογικές ιδιότητες του υδρογραφικού δικτύου. Επειδή τέτοιας λεπτομέρειας πληροφορίες είναι εξαιρετικά σπάνιες για τις ελληνικές, τουλάχιστον, λεκάνες, η ημερήσια εκδοχή του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ βασίζεται στην παραδοχή περιορισμένης διαθεσιμότητας δεδομένων. Συγκεκριμένα, ως υδρολογικές

είσοδοι απαιτούνται αποκλειστικά ημερήσια επιφανειακά ύψη βροχής και δυνητικής εξατμοδιαπνοής⁵ στις υπολεκάνες, τα οποία προέρχονται από την επεξεργασία σημειακών παρατηρήσεων συμβατικών υδρομετεωρολογικών σταθμών (π.χ. βροχόμετρα), καθώς και δεδομένα παροχής (συστηματικά ή μη) με συχνότητα μία τιμή ανά ημέρα (από υδρομετρήσεις ή επεξεργασία παρατηρήσεων σταθμημέτρου).

Εκτός από τον περιορισμό των δεδομένων, στην ανάπτυξη της ημερήσιας εκδοχής του μοντέλου χρειάστηκε να αντιμετωπιστούν τα ακόλουθα ζητήματα:

- Λόγω της δυναμικής ανταλλαγής δεδομένων εισόδου και εξόδου μεταξύ των μοντέλων υπόγειας υδρολογίας και κατανομής των ροών του υδροσυστήματος, σε κάθε χρονικό βήμα απαιτείται μια επαναληπτική διαδικασία (βροχωτή δομή), η οποία είναι ασύμβατη με την απαίτηση διαδοχικών χρονικών περιόδων (σειριακή προσομοίωση) που υιοθετούν τα αριθμητικά σχήματα διόδευσης.
- Η αδρομερής χρονική διακριτότητα των χρονοσειρών βροχόπτωσης δεν είναι συμβατή με τη λεπτή ανάλυση (ωριαία ή μικρότερη) που απαιτείται στη μοντελοποίηση της διόδευσης.
- Δεν υπάρχει πλήρης χρονική αντιστοιχία μεταξύ των προσομοιωμένων χρονοσειρών παροχής (μέσες ημερήσιες τιμές) και των αντίστοιχων παρατηρημένων (στιγμιαίες παροχές), ειδικά όταν αναφερόμαστε σε πλημμυρικά φαινόμενα.

Συνοπτικά, τα παραπάνω προβλήματα αντιμετωπίστηκαν με βάση τις εξής παραδοχές, οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια του κεφαλαίου:

- Λόγω της έλλειψης λεπτής χρονικής κλίμακας δεδομένων κατακρήμνισης, εφαρμόζεται μια τεχνική επιμερισμού, με βάση την οποία οι ημερήσιες χρονοσειρές απορροής των υπολεκανών, στις οποίες αθροίζεται η επιφανειακή απορροή που υπολογίζεται από το μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας (βλ. 5.3) και η πηγαία απορροή που παράγεται από το μοντέλο υπόγειας υδρολογίας, αναλύονται σε ωριαία χρονικά βήματα. Τα λεπτής ανάλυσης υδρογραφήματα που προκύπτουν αντιπροσωπεύουν μια υποθετική (πλην όμως ρεαλιστική και μαθηματικά συνεπή) χρονική κατανομή της απορροής εντός της ημέρας.
- Η υπολογιστική διαδικασία γίνεται σε δύο φάσεις. Αρχικά, εφαρμόζεται η ίδια διαδικασία με τη μηνιαία εκδοχή (χωρίς χρονισμό των παροχών), από την οποία προκύπτει μια εκτίμηση της πηγαίας απορροής και των απολήψεων. Με γνωστά όλα δεδομένα του υδατικού ισοζυγίου εκτός των εισροών από το ανάντη υδρογραφικό δίκτυο, και μεταβαίνοντας διαδοχικά προς κατάντη, παράγονται τα πλήρη (για όλη την περίοδο προσομοίωσης) υδρογραφήματα εισόδου στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου, τα οποία αποτελούν είσοδο του μοντέλου διόδευσης.

⁵ Αντίθετα από τη βροχόπτωση, η δυνητική εξατμοδιαπνοή παρουσιάζει σχετικά μικρή μεταβλητότητα, οπότε μπορούν να θεωρηθούν κοινές ημερήσιες τιμές ανά μήνα.

- Στο μοντέλο δεν ζητούνται γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου (διατομές, κλίσεις, συντελεστές απωλειών), καθώς για τη διόδευση των ροών υιοθετούνται εννοιολογικές (υδρολογικές) προσεγγίσεις με πολύ μικρό αριθμό παραμέτρων (το πολύ δύο), οι οποίες εκτιμώνται ή βαθμονομούνται με βάση τις παρατηρήσεις παροχής. Για τη διόδευση των υδρογραφημάτων εφαρμόζεται είτε η μέθοδος του γραμμικού κινηματικού κύματος (για σχετικά μεγάλες κατά μήκος κλίσεις) είτε ένα σχήμα διάχυσης κύματος Muskingum, εισάγοντας μόνο μία ή δύο παραμέτρους για κάθε κλάδο του υδρογραφικού δικτύου, αντίστοιχα. Οι παράμετροι εκτιμώνται εμπειρικά ή βαθμονομούνται με βάση τα διαθέσιμα δείγματα παροχών, υποθέτοντας ότι οι στιγμιαίες παρατηρήσεις είναι αντιπροσωπευτικές των συναθροισμένων μέσων ημερήσιων παροχών του μοντέλου. Η προσέγγιση αυτή είναι εξαιρετικά φειδωλή σε δεδομένα, υπολογιστικά απλή και ταχεία, ενώ επιτρέπει την επίλυση του προβλήματος από τα ανάντη προς τα κατόντη.

8.2 Επιμερισμός μέσω ημερήσιων παροχών

Έστω V_t ο όγκος απορροής που παράγεται από μια υπολεκάνη του υδροσυστήματος την ημέρα t και εισάγεται ως σημειακή εισροή στον κατόντη κόμβο της. Αν n η διάρκεια της ημέρας ($n = 86\,400$ s), ζητείται η διαμόρφωση ενός συνεπούς και ρεαλιστικού υδρογραφήματος στο χρονικό διάστημα $[0, n]$, το οποίο περιγράφεται από μια συνεχή συνάρτηση παροχής $q_t(\tau)$, τέτοια ώστε:

$$\int_{\tau=0}^n q_t(\tau) d\tau = V_t \quad (8.1)$$

$$q_t(0) = q_{t-1}(n) \quad (8.2)$$

Η πρώτη συνθήκη εξασφαλίζει ότι ο ημερήσιος όγκος του υδρογραφήματος στο αντίστοιχο διάστημα $[0, n]$ ισούται με τον δεδομένο όγκο απορροής V_t (διατήρηση ημερήσιου όγκου), ενώ η δεύτερη συνθήκη εγγυάται ότι η τιμή της παροχής στην αρχή της ημέρας t ισούται με την παροχή στο πέρας της προηγούμενης ημέρας $t - 1$ (συνέχεια μεταξύ διαδοχικών ημερών). Για κάθε ημέρα της περιόδου προσομοίωσης και για κάθε υπολεκάνη, διαμορφώνεται μια συνάρτηση παροχής $q_t(\tau)$, μέσω μιας διαδικασίας επιμερισμού, και στη συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές της ανά ώρα, ήτοι για $\tau = 3\,600, 7\,200, \dots, 86\,400$ s. Η υπολογιστική διαδικασία οδηγεί σε μονοσήμαντες (προσδιοριστικές) λύσεις του προβλήματος, ενώ προϋποθέτει ορισμένες παραδοχές που εξηγούνται στη συνέχεια.

Αρχικά, εκτιμώνται η αρχική και τελική τιμή της συνάρτησης παροχής που αντιστοιχεί στην ημέρα t , με βάση τις σχέσεις:

$$q_t(0) = \frac{V_{t-1} + V_t}{2n} \quad (8.3)$$

$$q_t(n) = \frac{V_t + V_{t+1}}{2n} \quad (8.4)$$

Συνεπώς, θεωρείται ότι η στιγμιαία παροχή στην αρχή της ημέρας ($\tau = 0$) ισούται με τη μέση παροχή της τρέχουσας (t) και της προηγούμενης ($t - 1$) ημέρας, ενώ η στιγμιαία παροχή στο πέρας της ημέρας ($\tau = n$) ισούται με τη μέση παροχή της τρέχουσας (t) και της επόμενης ($t + 1$) ημέρας. Με τον τρόπο αυτό, ικανοποιείται η συνθήκη (8.2). Τονίζεται ότι ο χρονοσειρές όγκων απορροής V_t (ή, ισοδύναμα, μέσων ημερήσιων παροχών $Q_t = V_t / n$) θεωρούνται γνωστές για όλη την περίοδο προσομοίωσης, από τη συνδυασμένη εφαρμογή των τριών μοντέλων, χωρίς τη θεώρηση των διεργασιών διόδευσης.

Συγκρίνοντας τις τιμές των $q_t(0)$, $q_t(n)$ και Q_t προκύπτουν οι εξής περιπτώσεις:

- Αν $q_t(0) = q_t(n)$, η παροχή στη διάρκεια της ημέρας διατηρείται αμετάβλητη, οπότε $q_t(\tau) = q_t(0)$.
- Αν $q_t(0) < Q_t < q_t(n)$ ή $q_t(0) > Q_t > q_t(n)$, δηλαδή η μέση ημερήσια παροχή περικλείεται από τις χρονικά ακραίες στιγμιαίες τιμές της, διαμορφώνεται μια συνάρτηση παροχής που περιγράφει τον αντίστοιχο ανοδικό ή καθοδικό κλάδο του υδρογραφήματος, μέσω της σχέσης δύναμης:

$$q_t(\tau) = q_t(0) + a k^b \quad (8.5)$$

όπου a , b συντελεστές που υπολογίζονται ρητά με βάση την αρχή διατήρησης του ημερήσιου όγκου (εξ. 8.1) και τη γνωστή τιμή στο πέρας του χρονικού διαστήματος, $q_t(n)$. Συνδυάζοντας τις δύο σχέσεις προκύπτει:

$$b = \frac{q_t(n) - q_t(0)}{Q_t - q_t(0)} - 1 \quad (8.6)$$

$$a = \frac{q_t(n) - q_t(0)}{n^b} \quad (8.7)$$

Για μεγάλες τιμές του εκθέτη b (>10), ο συντελεστής a γίνεται πολύ μικρός, οπότε, για λόγους αριθμητικής ευστάθειας, αντί της σχέσης (8.5) χρησιμοποιείται η προσέγγιση $q_t(\tau) = q_t(0)$.

- Αν $q_t(0) < Q_t$ και $q_t(n) < Q_t$, δηλαδή η μέση ημερήσια παροχή είναι μεγαλύτερη από τις χρονικά ακραίες τιμές στιγμιαίες της, τότε διαμορφώνεται ένα τριγωνικό υδρογράφημα που δίνεται από την εξίσωση:

$$q_t(\tau) = \begin{cases} q_t(0) + \frac{q_p - q_t(0)}{n_p} \tau & 0 \leq \tau \leq n_p \\ q_t(n) + \frac{q_p - q_t(n)}{n - n_p} (n - \tau) & n_p < \tau \leq n \end{cases} \quad (8.8)$$

όπου q_p η παροχή αιχμής του υδρογραφήματος και n_p ο χρόνος πραγματοποίησης της αιχμής. Με την παραδοχή ότι $n_p = n / 3$ (θεωρώντας δηλαδή ότι η παροχή αυξάνει έως την 8^η ώρα της ημέρας και εν συνεχεία μειώνεται), και με βάση την αρχή διατήρησης του ημερήσιου όγκου (εξ. 8.1), η αιχμή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_p = 2Q_t - \frac{q_t(0) n_p + q_t(n) (n - n_p)}{n} \quad (8.9)$$

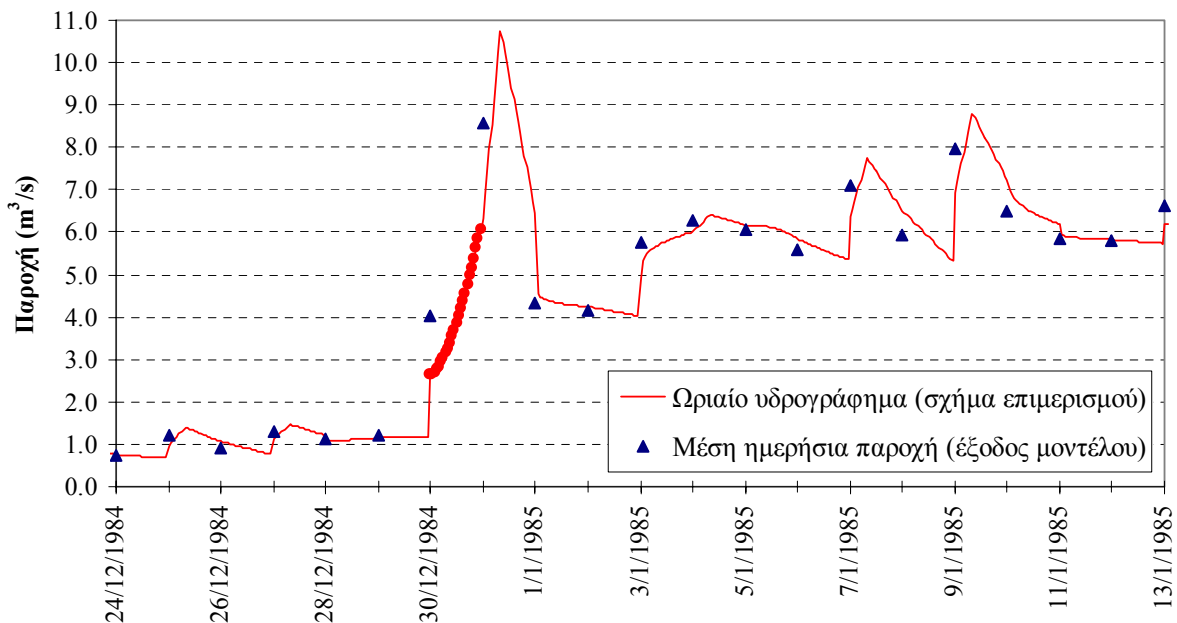
- Αν $q_i(0) > Q_i$ και $q_i(n) > Q_i$, δηλαδή η μέση ημερήσια παροχή είναι μικρότερη από τις χρονικά ακραίες στιγμιαίες τιμές της, τότε διαμορφώνεται ένα αντίστροφο τριγωνικό υδρογράφημα το οποίο, εκτός από την αρχή διατήρησης του ημερήσιου όγκου, θα πρέπει να εξασφαλίζει μη αρνητικές τιμές σε όλο το διάστημα $[0, n]$. Στην περίπτωση αυτή, ο χρόνος πραγματοποίησης της ελάχιστης τιμής του υδρογραφήματος n_L δεν θεωρείται δεδομένος, αλλά εκτιμάται μέσω δοκιμών. Συγκεκριμένα, εντοπίζεται ο χρόνος n_L κατά τον οποίο μεγιστοποιείται η συνάρτηση:

$$q_L = 2Q_i - \frac{q_i(0) n_L + q_i(n) (n - n_L)}{n} \quad (8.10)$$

Η διαδικασία αναζήτησης γίνεται με δοκιμές, θεωρώντας ωριαίο χρονικό βήμα, ήτοι $\Delta t = 3600$ s. Εφόσον ζητείται το μέγιστο μεταξύ των ελάχιστων παροχών q_L (όπου η τιμή q_L αντιστοιχεί στην κορυφή του αντίστροφου τριγωνικού υδρογραφήματος), και το εν λόγω μέγιστο είναι προφανώς μη αρνητικό (αφού $Q_i \geq 0$). Με δεδομένα, πλέον τα q_L και n_L , οι τεταγμένες του υδρογραφήματος δίνονται από τη σχέση:

$$q_i(\tau) = \begin{cases} q_i(0) + \frac{q_L - q_i(0)}{n_L} \tau & 0 \leq \tau \leq n_L \\ q_i(n) + \frac{q_L - q_i(n)}{n - n_L} (n - \tau) & n_L < \tau \leq n \end{cases} \quad (8.11)$$

Στο Σχήμα 8.1 δίνεται ένα παράδειγμα επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών που παράγονται από το ημερήσιο υδρολογικό μοντέλο σε υδρογραφήματα ωριαίας χρονικής ανάλυσης.



Σχήμα 8.1: Παράδειγμα επιμερισμού μέσων ημερήσιων παροχών σε υδρογραφήματα ωριαίας ανάλυσης. Με έντονο χρώμα απεικονίζεται ο ανοδικός κλάδος στη διάρκεια της 30/12/1984.

8.3 Θεωρητικό πλαίσιο διόδευσης υδρογραφημάτων

Είναι γνωστό ότι εφόσον κατά μήκος ενός υδατορεύματος δεν πραγματοποιούνται πλευρικές εισροές, ένα υδρογράφημα (πλημμυρικό κύμα) που εισάγεται ανάντη θα εμφανιστεί στα κατάντη με χρονική υστέρηση, μειωμένη αιχμή και αυξημένη χρονική διασπορά (Σχήμα 8.2). Το φαινόμενο είναι γνωστό ως *διόδευση* (routing), ενώ το σχετικό πρόβλημα, δηλαδή η μαθηματική αναπαράσταση της χωρικής και χρονικής εξέλιξης της στάθμης $y(x, t)$ και της παροχής $q(x, t)$ του υδατορεύματος, κατά κανόνα περιγράφεται ικανοποιητικά από τις διαφορικές εξισώσεις μονοδιάστατης μη μόνιμης ροής βαθμιαίας μεταβολής σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια (Κουτσογιάννης, 1999, σ. 113). Οι κύριες παραδοχές που διέπουν την εν λόγω προσέγγιση είναι οι ακόλουθες:

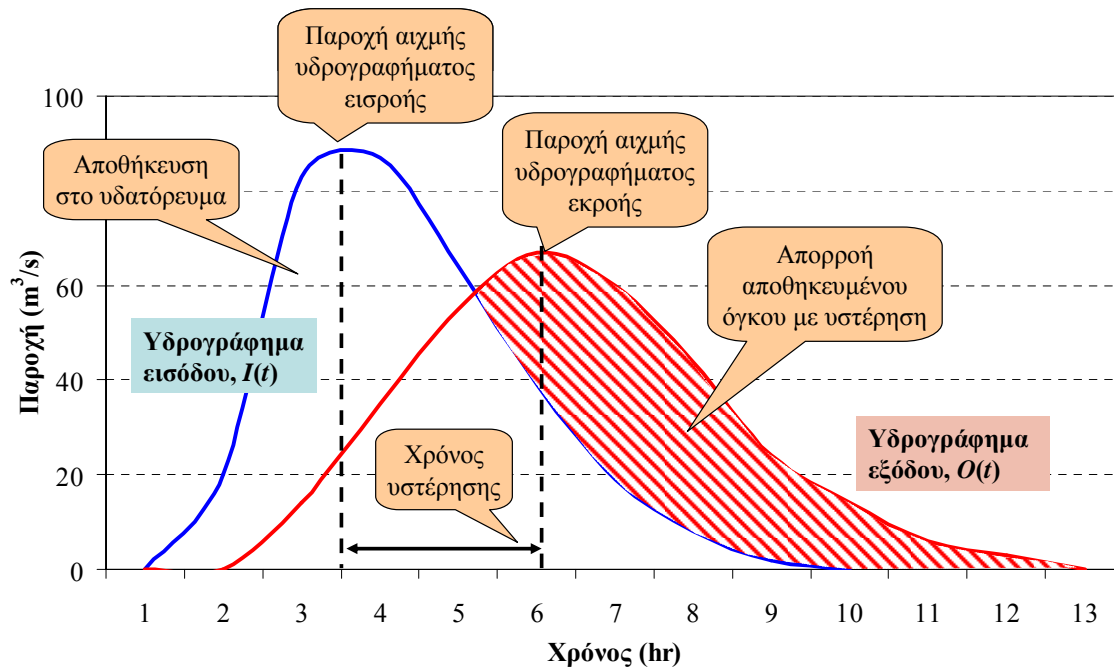
- ισχύουν οι εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της ποσότητας κίνησης (εξισώσεις St. Venant).
- η κατά μήκος κλίση του αγωγού είναι σχετικά ήπια, ώστε η ροή να μην είναι υπερκρίσιμη.
- τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διατομών του είναι σταθερά (δεν λαμβάνονται υπόψη μεταφορές φερτών, επικαθήσεις, κτλ.).
- τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του αγωγού είναι χρονικά αμετάβλητα, και συνεπώς μπορούν να εφαρμοστούν οι συντελεστές τριβών (π.χ. συντελεστές Manning) της μόνιμης ομοιόμορφης ροής.
- η ροή είναι σχεδόν ευθύγραμμη, οπότε αγνοείται η συμβολή των μαιανδρισμών.
- αγνοούνται οι απώλειες λόγω διαστολής και συστολής των διατομών του υδατορεύματος.
- αγνοούνται οι πρόσθετες απώλειες τριβών που σχετίζονται με την εσωτερική απώλεια ιξώδους σε μη Νευτώνεια ρευστά.
- ο αγωγός έχει αρχική μη μηδενική παροχή νερού (δεν επιτρέπεται να είναι ξηρός).

Σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές, η εξίσωση συνέχειας γράφεται:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = q_L \quad (8.12)$$

όπου A είναι η επιφάνεια της υγρής διατομής, q η παροχή κατά μήκος του του κύριου άξονα ροής x , q_L η πλευρική παροχή ανά μονάδα μήκους, και t ο χρόνος. Επισημαίνεται ότι η επιφάνεια είναι συνάρτηση του βάθους ροής y , ενώ η παροχή είναι επίσης συνάρτηση του βάθους ροής καθώς και της μέσης ταχύτητας v κατά τη διεύθυνση x (καθώς $q = v A$). Αν το πλάτος της διατομής B θεωρηθεί σταθερό, τότε $A(x, t) = B y(x, t)$ και $q(x, t) = B v(x, t) y(x, t)$ και συνεπώς η (8.12) γράφεται στην ισοδύναμη μορφή:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + y \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{q_L}{B} \quad (8.13)$$



Σχήμα 8.2: Τυπική μορφή μεταβολής ενός υδρογραφήματος μεταξύ δύο διατομών.

Η εξίσωση διατήρησης της ποσότητας κίνησης ή εξίσωση ορμής, γνωστή και ως *δυναμικό μοντέλο*, γράφεται στη γενική μορφή:

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} - v_{LX} \frac{q_L}{gA} \quad (8.14)$$

όπου S_f είναι η κλίση της γραμμής ενέργειας, S_0 η κλίση του πυθμένα της κοίτης του υδατορεύματος, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και v_{LX} η συνιστώσα της ταχύτητας του πλευρικού κύματος που είναι παράλληλη στον άξονα της ροής. Η παραπάνω σχέση, η οποία είναι απλοποιημένη σε σχέση με την πληρέστερη μορφή των αρχικών εξισώσεων St. Venant, εκφράζει την ισορροπία των ακόλουθων μεγεθών, εκφρασμένων ανά μονάδα βάρους:

- των δυνάμεων βαρύτητας, S_0 .
- των δυνάμεων τριβής, S_f .
- της διαφοράς των δυνάμεων πίεσης, $\partial y / \partial x$.
- της μεταθετικής επιτάχυνσης, $(v / g) (\partial v / \partial x)$.
- της τοπικής επιτάχυνσης, $(1 / g) (\partial v / \partial t)$.
- της συμβολής της πλευρικής παροχής, $(v_{LX} q_L) / (g A)$.

Οι θεμελιώδεις σχέσεις (8.12) ή (8.13) και (8.14) χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μια εξίσωση τριβών (ήτοι μια σχέση στάθμης-παροχής, π.χ. εξίσωση Manning) καθώς και με σχέσεις που συνδέουν

μεταξύ τους τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού. Τελικά, προκύπτει ένα σύστημα μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων που δεν είναι δυνατό να επιλυθούν αναλυτικά. Οι τεχνικές επίλυσης που εφαρμόζονται περιγράφονται με τον όρο *υδραυλικές μέθοδοι*, οι οποίες βασίζονται είτε σε σχήματα πεπερασμένων διαφορών είτε σε απλοποιήσεις των εξισώσεων, ώστε αυτές να επιδέχονται αναλυτική επίλυση. Στην εν λόγω προσέγγιση, είναι αναγκαίος ο καθορισμός των αρχικών και των οριακών συνθηκών. Οι πρώτες εκφράζονται με τη συνθήκη μόνιμης ροής σε όλο το μήκος του αγωγού στο χρόνο $t = 0$, ενώ οι δεύτερες, για το ανάντη πέρας του μήκους ολοκλήρωσης διατυπώνονται με τη μορφή ενός γνωστού υδρογραφήματος εισροής, $q(x = 0, t)$, ενώ για το κατόντη πέρας κατά κανόνα διατυπώνονται μέσω μιας γνωστής σχέσης στάθμης-παροχής $q = f(y)$.

Η απλούστερη και πλέον εύχρηστη κατηγορία αριθμητικών τεχνικών είναι οι *υδρολογικές μέθοδοι*, οι οποίες δεν αντιμετωπίζουν την πλήρη χωροχρονική εξέλιξη του φαινομένου αλλά ελέγχουν την στάθμη και την παροχή σε δύο σημεία, ανάντη και κατόντη (είσοδος και έξοδος υδατορεύματος). Το ενδιάμεσο τμήμα του αγωγού θεωρείται ως κλειστό υδρολογικό σύστημα, όπου η εξίσωση ποσότητας κίνησης αντικαθίσταται από μια συνάρτηση απόκρισης κλειστού τύπου ή από μια εννοιολογική σχέση (Κουτσογιάννης, 1999, σ. 126). Ειδικότερα, αντί της εξίσωσης ορμής χρησιμοποιείται (ή υπονοείται) μια σχέση έκφρασης του αποθηκευμένου όγκου συναρτήσει των άλλων μεταβλητών που υπεισέρχονται στην εξίσωση συνέχειας, ήτοι:

$$S(t) = \varphi[I(t), I_L(t), O(t)] \quad (8.15)$$

όπου $I(t)$ η εισροή στην ανάντη διατομή, $I_L(t)$ η πλευρική εισροή κατά μήκος του αγωγού και $O(t)$ η εκροή στην κατόντη διατομή.

Συστηματική και κριτική επισκόπηση των βιβλιογραφικών προσεγγίσεων του προβλήματος γίνεται από τον Koussis (2009). Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι δύο μεθοδολογίες που ενσωματώθηκαν στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, ενώ στο υποκεφάλαιο 9.4 εξηγείται η υλοποίησή τους για τον υπολογισμό της χωροχρονικής κατανομής των παροχών του υδρογραφικού δικτύου, στα πλαίσια της διαδικασίας προσομοίωσης.

8.4 Χειρισμός του προβλήματος διόδευσης σε μεμονωμένους κλάδους

Στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, η μέθοδος διόδευσης που εφαρμόζεται διαφοροποιείται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε κλάδου του υδρογραφικού δικτύου (γεωμετρία, κατά μήκος κλίση). Ειδικότερα, η διόδευση των υδρογραφήματων υλοποιείται είτε με τη μέθοδο του κινηματικού κύματος είτε με ένα σχήμα Muskingum, που ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων διάχυσης κύματος. Οι δύο αυτές προσεγγίσεις αποσκοπούν στην απλοποίηση της αρχής διατήρησης της ποσότητας κίνησης (εξ. 8.14), θεωρώντας ότι δεν υπάρχει πλευρική τροφοδοσία του υδατορεύματος (καθώς όλες οι εισροές και εκροές πραγματοποιούνται στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου), και αγνοώντας κάποιους

όρους με αμελητέα επίδραση στη μεταβολή της ποσότητας κίνησης. Ανάλογα με τους όρους που αγνοούνται, διαμορφώνονται δύο κατηγορίες μοντέλων διάδευσης, τα οποία επιλύονται με αντίστοιχα αριθμητικά σχήματα, όπως εξηγείται στη συνέχεια.

8.4.1 Μοντέλο κύματος διάχυσης με επίλυση κατά Muskingum

Όταν η κατά μήκος κλίση S_0 του αγωγού είναι πολύ ήπια (της τάξης του 0.002 ή μικρότερη), τότε η επιτάχυνση του νερού, δηλαδή η ποσότητα:

$$\frac{Dv(x, t)}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \quad (8.16)$$

γίνεται εξαιρετικά μικρή. Συγκεκριμένα, οι όροι της τοπικής και της μεταθετικής επιτάχυνσης της εξίσωσης ποσότητας κίνησης (8.14) είναι μικρότεροι των S_f και S_0 κατά δύο τάξεις μεγέθους, οπότε με απαλογή τους η εν λόγω εξίσωση γράφεται:

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (8.17)$$

Συνεπώς, η μεταβολή της γραμμής ενέργειας οφείλεται στις δυνάμεις βαρύτητας και στη διαφορά των δυνάμεων πίεσης εξαιτίας της μεταβολής της στάθμης από ανάντη προς κατόντη. Η παραπάνω σχέση σε συνδυασμό με την εξίσωση συνέχειας (8.12), στην οποία ο όρος της πλευρικής παροχής q_L είναι μηδενικός (δεν υπάρχει εισροή ή εκροή νερού κατά μήκος του αγωγού), αποτελούν ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων που είναι πολύ πιο απλό σε σχέση με τις πλήρεις εξισώσεις St. Venant. Το μοντέλο που προκύπτει είναι γνωστό ως *κύμα διάχυσης* (diffusion wave) ή *κύμα μηδενικής αδράνειας* (noninertia wave), και ενδείκνυται για προβλήματα διάδευσης πλημμυρών σε πεδινά υδατορεύματα.

Το μοντέλο κύματος διάχυσης συνιστά το εννοιολογικό υπόβαθρο του γνωστού σχήματος επίλυσης Muskingum. Η φερώνυμη μέθοδος, η οποία εντάσσεται στις υδρολογικές προσεγγίσεις, προτάθηκε από τον McCarthy (1938), και υπό ορισμένες προϋποθέσεις αποτελεί προσεγγιστική λύση τόσο των εξισώσεων του κύματος διάχυσης όσο και αυτών του κινηματικού κύματος, οι οποίες περιγράφονται στο εδάφιο 8.4.2 (Cunge, 1969).

Για την εφαρμογή της μεθόδου, η εξίσωση συνέχειας διατυπώνεται ως εξίσωση διαφορών:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = I(t) - O(t) \quad (8.18)$$

όπου $S(t)$ ο όγκος νερού που είναι αποθηκευμένος μεταξύ της ανάντη και κατόντη διατομής, $I(t)$ το γνωστό υδρογράφημα εισροής και $O(t)$ το ζητούμενο υδρογράφημα εκροής. Η αριθμητική προσέγγιση της παραπάνω σχέσης στο χρονικό διάστημα $\Delta t = [t, t - 1]$ μέσω ενός απλού σχήματος οπίσθιων διαφορών γράφεται:

$$\frac{S_t - S_{t-1}}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t-1}}{2} - \frac{O_t + O_{t-1}}{2} \quad (8.19)$$

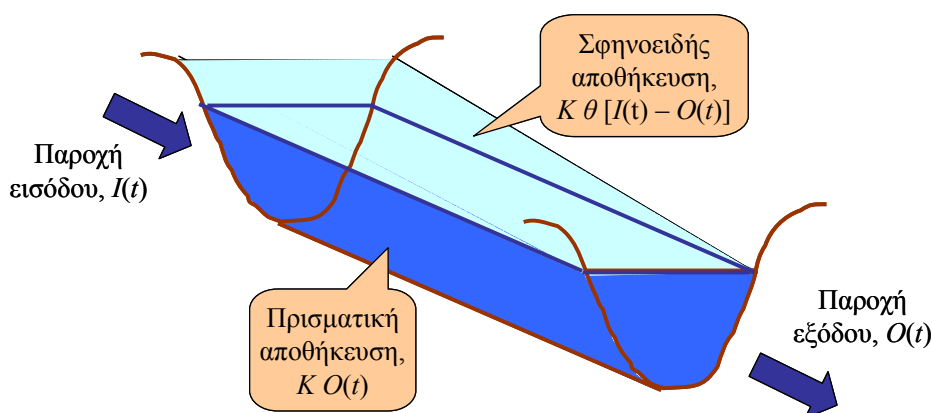
Μεταφέροντας τα άγνωστα μεγέθη S_t , O_t στο αριστερό μέλος λαμβάνεται η σχέση:

$$\left(\frac{S_t}{\Delta t} + \frac{O_t}{2}\right) = \left(\frac{I_t + I_{t-1}}{2}\right) + \left(\frac{S_{t-1}}{\Delta t} - \frac{O_{t-1}}{2}\right) \quad (8.20)$$

Για την επίλυση της (8.20) απαιτείται ο προσδιορισμός μιας ακόμη σχέσης της μορφής (8.15) που συνδέει την εκροή $O(t)$ με την αποθήκευση $S(t)$. Η κλασική μέθοδος Muskingum χρησιμοποιεί την εμπειρική γραμμική σχέση:

$$S(t) = K [\theta I(t) + (1 - \theta)O(t)] \quad (8.21)$$

όπου θ αδιάστατη παράμετρος και K χρονική παράμετρος, η οποία εκφράζει το μέσο χρόνο διαδρομής από την είσοδο μέχρι την έξοδο του υδατορεύματος (ακριβέστερα, τη χρονική απόσταση μεταξύ των κέντρων βάρους των υδρογραφημάτων εισροής και εκροής). Όπως φαίνεται στο σκαρίφημα του Σχήματος 8.3, η εμπειρική σχέση απόκρισης (8.21) περιλαμβάνει δύο συνιστώσες αποθήκευσης, την *πρισματική* (prism storage) και τη *σφηνοειδή* (wedge storage). Η πρισματική συνιστώσα, $K O(t)$, υποδηλώνει τον όγκο που αποθηκεύεται μεταξύ των διατομών σε συνθήκες ομοιόμορφης ροής, στις οποίες το βάθος ροής είναι σταθερό, ενώ η σφηνοειδής αποθήκευση, $K \theta [I(t) - O(t)]$, σχετίζεται με τη μεταβολή της στάθμης κατά μήκος του αγωγού. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.2, στα αρχικά στάδια της χρονικής εξέλιξης του φαινομένου, η στάθμη μειώνεται από τα ανάντη προς τα κατόντη, καθώς αποθηκεύεται νερό στο ποτάμι λόγω ανάσχεσης της πλημμύρας, ενώ στη συνέχεια η στάθμη αυξάνει από τα ανάντη προς τα κατόντη, καθώς ο αποθηκευμένος όγκος απορρέει με υστέρηση. Η παράμετρος θ ορίζεται στο διάστημα $[0, 0.50]$, με τυπική τιμή $\theta = 0.20$ για φυσικούς αγωγούς. Η οριακή τιμή $\theta = 0$ αντιστοιχεί στο μοντέλο γραμμικού ταμιευτήρα (όπου η τρέχουσα εκροή εξαρτάται μόνο από την εκροή του προηγούμενου βήματος), ενώ τιμή $\theta = 0.50$ αντιστοιχεί σε πλήρη σφήνα. Τιμές εκτός των παραπάνω ορίων δεν έχουν φυσικό νόημα, καθώς για $\theta > 0.50$ η αιχμή του υδρογραφήματος αυξάνει καθώς μεταβαίνουμε στα κατόντη, ενώ για $\theta < 0$ η αποθήκευση μειώνεται με την αύξηση της παροχής εισροής (Brutsaert, 2005, σ. 230).



Σχήμα 8.3: Οι έννοιες της πρισματικής και σφηνοειδούς αποθήκευσης της συνάρτησης απόκρισης του μοντέλου Muskingum (εξ. 8.21).

Συνδυάζοντας τις (8.20) και (8.21) προκύπτει η ακόλουθη αναδρομική εξίσωση:

$$O_t = c_0 I_t + c_1 I_{t-1} + c_2 O_{t-1} \quad (8.22)$$

όπου:

$$c_0 = \frac{-2K\theta + \Delta t}{2K(1-\theta) + \Delta t} \quad (8.23)$$

$$c_1 = \frac{2K\theta + \Delta t}{2K(1-\theta) + \Delta t} \quad (8.24)$$

$$c_2 = \frac{2K(1-\theta) - \Delta t}{2K(1-\theta) + \Delta t} \quad (8.25)$$

Οι συντελεστές είναι συνάρτηση των K , θ και Δt και ικανοποιούν την προφανή σχέση $c_0 + c_1 + c_2 = 1$. Με δεδομένο το υδρογράφημα εισόδου, και συνεπώς γνωστές την τρέχουσα και προηγούμενη τιμή της εισροής I_t και I_{t-1} , αντίστοιχα, και με γνωστή την εκροή του προηγούμενου βήματος O_{t-1} , είναι δυνατός ο βήμα-προς-βήμα υπολογισμός της επίκαιρης εκροής O_t . Για την εφαρμογή της αναδρομικής σχέσης απαιτείται ο προσδιορισμός των ακόλουθων μεγεθών:

- του υπολογιστικού βήματος, Δt .
- των παραμέτρων K και θ .
- των τιμών της εισροής, I_0 , και εκροής, O_0 , στην έναρξη της προσομοίωσης (αρχικές συνθήκες).

Συγκεκριμένα, το υπολογιστικό βήμα Δt ταυτίζεται με το χρονικό βήμα ανάλυσης (επιμερισμού) των ημερήσιων παροχών, που στη γενική περίπτωση είναι ωριαίο, ήτοι $\Delta t = 3600 \text{ s}^6$. Η παράμετροι K και θ δίνονται από το χρήστη, και εκτιμώνται με βάση τα χαρακτηριστικά του υδατορεύματος (διατομή, μήκος, κλίση, συντελεστής απωλειών). Προφανώς, οι δύο παράμετροι μπορούν να εκτιμηθούν με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια εφόσον διατίθενται πραγματικά υδρογραφήματα εισροής και εκροής. Γενικά, για δεδομένο μήκος L του αγωγού, όσο μειώνεται η κλίση ο χρόνος K αυξάνει, ενώ, αντίθετα, η τιμή της παραμέτρου θ μειώνεται. Η εν λόγω τιμή λαμβάνεται πρακτικά μηδενική για υδατορεύματα εξαιρετικά ήπιας κλίσης και με πλευρική υπερχειλίση, οπότε η ροή προσομοιάζει τη λειτουργία γραμμικού ταμιευτήρα. Αντίθετα, για σχετικά απότομες κλίσεις και καλά διαμορφωμένες διατομές, η παράμετρος θ προσεγγίζει την ανώτερη οριακή τιμή 0.50.

Στον προσδιορισμό των μεγεθών Δt , K και θ , είναι αναγκαίο να εξασφαλίζεται ότι οι υπολογιζόμενες εκροές θα είναι μη αρνητικές. Στην ιδανική περίπτωση, θα πρέπει να ισχύει $K = \Delta t$, που σημαίνει ότι το υπολογιστικό βήμα να ταυτίζεται με το μέσο χρόνο διαδρομής του κύματος στο υδατόρευμα. Αν

⁶ Με δεδομένη την έλλειψη υδρομετρικών και βροχομετρικών δεδομένων λεπτής χρονικής ανάλυσης, δεν έχει νόημα η εφαρμογή μικρότερου χρονικού βήματος. Εξάλλου, η χρήση του μοντέλου προορίζεται για μεσαίες και μεγάλες λεκάνες, όπου οι χρόνοι διαδρομής είναι αντίστοιχης τάξης μεγέθους.

αυτό δεν είναι εφικτό, τότε για την αποφυγή αρνητικών παροχών, το υπολογιστικό βήμα Δt θα πρέπει να επιλέγεται στο διάστημα (Hjelmfelt Jr., 1985):

$$2 K \theta \leq \Delta t \leq 2 K(1 - \theta) \quad (8.26)$$

Πρακτικά, για να υπάρχει ακρίβεια στους υπολογισμούς, το χρονικό βήμα θα πρέπει να λαμβάνεται μεταξύ των τιμών $K/3$ και $K/4$ (Κουτσογιάννης, 1999, σ. 130).

Στην υλοποίηση της διαδικασίας διόδευσης, με δεδομένο ότι το χρονικό βήμα Δt είναι σταθερό για όλους τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου (αφού ταυτίζεται με τη χρονική διακριτότητα των υδρογραφημάτων), η αριθμητική ευστάθεια εξασφαλίζεται με χωρική διακριτοποίηση κάθε κλάδου j σε N_j επιμέρους τμήματα (υπο-κλάδους), ίσου μήκους, $L_j' = L_j / N_j$, έτσι ώστε ο χρόνος διαδρομής στα εν λόγω τμήματα να ικανοποιεί της συνθήκες ευστάθειας. Για την εφαρμογή της μεθόδου, ο χρήστης ορίζει, για κάθε κλάδο j , την αδιάστατη παράμετρο θ_j , τον συνολικό χρόνο διαδρομής K_j , και έναν αδιάστατο συντελεστή δ_j , που εκφράζει το επιθυμητό χρονικό βήμα υπολογισμών ως ποσοστό του K_j . Συνεπώς, το (ακέραιο) πλήθος των υπο-κλάδων του υδατορεύματος προκύπτει από τη σχέση:

$$N_j = \text{Round}(\delta_j K_j / \Delta t) \quad (8.27)$$

Έχοντας προσδιορίσει το πλήθος N_j , η αναδρομική σχέση (8.22) εφαρμόζεται διαδοχικά στους υπο-κλάδους, θεωρώντας κοινό χρόνο διαδρομής $K_j' = K_j / N_j$ και υπολογίζοντας τους συντελεστές βάρους c_{j0} , c_{j1} , και c_{j2} συναρτήσει των K_j' , θ_j και Δt . Στη συνέχεια, με γνωστό το υδρογράφημα εισροής του πρώτου υπο-κλάδου, παράγεται το υδρογράφημα εκροής, το οποίο ταυτίζεται με το υδρογράφημα εισροής του δεύτερου υπο-κλάδου. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την έξοδο του τελευταίου υπο-κλάδου, όπου παράγεται το υδρογράφημα εκροής του κατάντη κόμβου του υπόψη υδατορεύματος. Επισημαίνεται ότι μεταξύ των υπο-κλάδων δεν πραγματοποιούνται εισροές ή εκροές νερού. Οι εν λόγω διεργασίες του υδροσυστήματος αναφέρονται αποκλειστικά στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου και όχι στους ενδιάμεσους (υπολογιστικούς) κόμβους του αριθμητικού σχήματος επίλυσης.

Τέλος, όσον αφορά στις αρχικές συνθήκες, σε όλους τους κλάδους θεωρείται μια ελάχιστη τιμή ροής, q_{\min} , η οποία διατηρείται σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης (αλλά αφαιρείται από το τελικό ισοζύγιο), ώστε να εξασφαλίζεται η συνθήκη μη μηδενικής παροχής.

8.4.2 Μοντέλο κινηματικού κύματος

Στο μοντέλο του κινηματικού κύματος, η εξίσωση ποσότητας κίνησης (8.14) απλοποιείται περαιτέρω, καθώς αγνοείται και ο όρος $\partial y / \partial x$, οπότε λαμβάνει τη στοιχειώδη μορφή $S_t = S_0$. Συνεπώς, η ταχύτητα και η παροχή είναι μονοσήμαντες συναρτήσεις της στάθμης ή, ισοδύναμα, της επιφάνειας, ήτοι:

$$q(x, t) = f[A(x, t)] \quad (8.28)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει:

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial x} = c(A) \frac{\partial A}{\partial x} \quad (8.29)$$

όπου το μέγεθος $c(A)$ έχει διαστάσεις ταχύτητας και εξαρτάται από τη γεωμετρία της διατομής και τη σχέση απωλειών τριβής που χρησιμοποιείται. Συνεπώς, αν θεωρηθεί μηδενική πλευρική παροχή, η εξίσωση συνέχειας (8.12) γράφεται:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -c(A) \frac{\partial A}{\partial x} \quad (8.30)$$

η οποία έχει γενική λύση:

$$A(x, t) = \varphi(t - x / c) \quad (8.31)$$

Η συνάρτηση φ καθορίζεται από τη οριακή συνθήκη για $x = 0$, ενώ για δεδομένη χωροχρονική εξέλιξη της επιφάνειας $A(x, t)$, η εξέλιξη της παροχής προκύπτει άμεσα από την (8.28). Το μέγεθος c στην εξίσωση (8.31) εκφράζει την ταχύτητα του κινηματικού κύματος, δεδομένου ότι για έναν παρατηρητή που κινείται προς τα κατάντη με ταχύτητα c , η μορφή του κύματος (A, q, y) παραμένει αμετάβλητη. Αν η τιμή του c θεωρηθεί σταθερή, τότε προκύπτει το λεγόμενο γραμμικό κινηματικό κύμα, το οποίο μετακινείται προς τα κατάντη με ταχύτητα c , χωρίς καμία μεταβολή του σχήματός του, άρα και χωρίς εξομάλυνση της παροχής αιχμής (Κουτσογιάννης, 1999, σ. 121-123).

Η υπολογιστική υλοποίηση του παραπάνω μοντέλου είναι εξαιρετικά απλή, καθώς το υδρογράφημα εξόδου προκύπτει με απλή χρονική μετατόπιση των τεταγμένων του υδρογραφήματος εισόδου, ήτοι:

$$O_t = I_{t-K} \quad (8.32)$$

όπου K ο χρόνος υστέρησης του συγκεκριμένου κλάδου του υδρογραφικού δικτύου, που αποτελεί τη μοναδική παράμετρο του μοντέλου και ορίζεται από τον χρήστη. Αν L το μήκος του υδατορεύματος, τότε προφανώς ισχύει $c = L / K$. Το μοντέλο του κινηματικού κύματος εφαρμόζεται σε τμήματα του δικτύου με σχετικά μεγάλη κλίση S_0 , τέτοια ώστε η μεταβολή της στάθμης να είναι πολύ μικρή σε σχέση με την κλίση του πυθμένα, και συνεπώς να μπορεί να αγνοηθεί από την εξίσωση ποσότητας κίνησης ο όρος $\partial y / \partial x$ που οφείλεται στη διαφορά πίεσης. Αν η κλίση είναι σημαντική (κατά κανόνα αυτό αφορά σε ορεινά τμήματα του υδρογραφικού δικτύου), η ταχύτητα του κύματος c είναι μεγάλη, με συνέπεια να μειώνεται ο χρόνος υστέρησης K . Εφόσον $K < \Delta t$, θεωρείται ότι στον συγκεκριμένο κλάδο δεν πραγματοποιείται διόδευση, δηλαδή το υδρογράφημα που εισέρχεται στον ανάντη κόμβο του υδατορεύματος μεταφέρεται κατάντη χωρίς χρονική υστέρηση και, προφανώς, χωρίς μεταβολή των χαρακτηριστικών του (χρόνος βάσης, χρόνος ανόδου, παροχή αιχμής).

9 Υπολογιστική διαδικασία προσομοίωσης

9.1 Ορισμοί - Δεδομένα εισόδου

Ως προσομοίωση νοείται η υπολογιστική διαδικασία της βήμα-προς-βήμα αναπαράστασης των επιφανειακών, υπόγειων και ανθρωπογενών διεργασιών (αντλήσεις, απολήψεις), με ζητούμενο την εκτίμηση όλων των μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου του υδροσυστήματος για συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα. Το χρονικό βήμα της προσομοίωσης είναι μηνιαίο ή ημερήσιο· στη δεύτερη περίπτωση παρέχεται η δυνατότητα κατ' επιλογήν ενεργοποίησης του μοντέλου διόδευσης των ωριαίων παροχών που παράγονται από το σχήμα επιμερισμού στο υδρογραφικό δίκτυο.

Τα δεδομένα εισόδου της προσομοίωσης είναι:

- η τοπολογία του δικτύου και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των γεωγραφικών οντοτήτων (π.χ. εκτάσεις υπολεκανών, μήκη υδατορευμάτων, ακμές κυττάρων, ενώσεις και τομές γεωγραφικών επιπέδων, κτλ.), τα οποία παράγονται από το ΣΓΠ και δεν μπορούν να τροποποιηθούν από τον χρήστη·
- τα χαρακτηριστικά μεγέθη του υδροσυστήματος που δεν έχουν γεωγραφική αναφορά και μπορούν να τροποποιηθούν από τον χρήστη (π.χ. παροχετευτικότητες και μοναδιαία κόστη υδραγωγείων)·
- οι παράμετροι των μοντέλων επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας, οι οποίες είτε ορίζονται από τον χρήστη είτε υπολογίζονται (στο σύνολό τους ή τμηματικά) από το μοντέλο βελτιστοποίησης·
- οι υδρολογικές και διαχειριστικές χρονοσειρές εισόδου (επιφανειακή βροχόπτωση και δυνητική εξατμοδιαπνοή υπολεκανών, χρονοσειρές ζήτησης, εξωτερικές εισροές)·
- οι αρχικές και οριακές συνθήκες των μοντέλων επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας (βλ. 9.2)·
- τα υπολογιστικά μεγέθη της διαδικασίας διόδευσης (αριθμητικό σχήμα επίλυσης και σχετικές παράμετροι)·
- διάφορες γενικές επιλογές που αφορούν σε χρονικά μεγέθη (π.χ. έναρξη και λήξη προσομοίωσης), αλγοριθμικές παραμέτρους (π.χ. κριτήρια σύγκλισης και τερματισμού αριθμητικών μεθόδων) και μαθηματικές εκφράσεις (π.χ. για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας των αγωγών που συνδέουν υπόγειες δεξαμενές)·
- οι χρονοσειρές ελέγχου (μετρημένες παροχές υπολεκανών, υδατορευμάτων ή πηγών, στάθμες υδροφορέα), τα κριτήρια καλής προσαρμογής και οι συντελεστές στάθμισης των κριτηρίων.

Οι χρονοσειρές ελέγχου, τα κριτήρια προσαρμογής και οι συντελεστές στάθμισης χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του καθολικού μέτρου επίδοσης, ήτοι της στοχικής συνάρτησης της βαθμονόμησης, με βάση την οποία αξιολογείται η καταλληλότητα του μοντέλου ως προς την αναπαραγωγή των παρατηρημένων αποκρίσεων του υδροσυστήματος. Οι συνιστώσες της διαδικασίας βαθμονόμησης εξηγούνται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 10.

9.2 Αρχικοποίηση

Η *αρχικοποίηση* (initialization) της προσομοίωσης περιλαμβάνει μια σειρά εργασιών που γίνονται άπαξ, και αφορούν στον υπολογισμό όλων των χρονικά αμετάβλητων μεγεθών και μητρώων που χρησιμοποιούνται στα επιμέρους μοντέλα. Σε αυτές περιλαμβάνονται:

- ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών του μοντέλου διόδευσης·
- η κατασκευή των μητρώων του σχήματος επίλυσης της υπόγειας ροής·
- η κατασκευή των μητρώων και διανυσμάτων του μοντέλου διγράφου·
- η επαναφορά των αρχικών τιμών των μεταβλητών κατάστασης (αποθέματα δεξαμενών)·

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη του μοντέλου διόδευσης είναι η τάξη των κλάδων και οι παράμετροι των σχημάτων επίλυσης (πλήθος υπο-κλάδων, χρόνοι υστέρησης, συντελεστές Muskingum).

Τα μητρώα του σχήματος επίλυσης της υπόγειας ροής αφορούν στα σταθερά γεωμετρικά μεγέθη του υπόγειου συστήματος και τις δύο παραμέτρους των δεξαμενών (υδραυλική αγωγιμότητα, ειδική απόδοση). Στα σταθερά γεωμετρικά μεγέθη περιλαμβάνονται οι επιφάνειες των κυττάρων, τα υψόμετρα πυθμένα και οροφής, οι αποστάσεις μεταξύ των κέντρων βάρους τους (μήκη αγωγών) και τα μήκη των κοινών ακμών τους. Εφόσον έχει οριστεί συνθήκη αδιαπέρατου ορίου μεταξύ δύο δεξαμενών, τότε το μήκος της κοινής τους ακμής τους λαμβάνεται μηδενικό. Η περίπτωση αυτή αποτελεί και τη μοναδική οριακή συνθήκη του μοντέλου.

Τα σταθερά μεγέθη του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού, από την επίλυση του οποίου προκύπτει η βέλτιστη κατανομή των ροών του υδροσυστήματος σε κάθε χρονικό βήμα, είναι το μητρώο πρόσπτωσης (όπου περιγράφεται η τοπολογία του διγράφου), τα μητρώα απωλειών και επιστροφών, καθώς και το διάνυσμα μοναδιαίου κόστους. Τα εν λόγω κόστη υπολογίζονται με βάση την αναδρομική διαδικασία του υποκεφαλαίου 7.6. Η τοποθέτηση των στοιχείων των μητρώων γίνεται με τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται μια διάταξη με ισχυρή διαγώνιο.

Οι αρχικές συνθήκες αφορούν στις τιμές όλων των μεταβλητών κατάστασης του μοντέλου στην έναρξη της προσομοίωσης, καθώς και στις παροχές των πηγών. Ως μεταβλητές κατάστασης νοούνται οι στάθμες (ή, ισοδύναμα, τα αποθέματα) των εννοιολογικών δεξαμενών του επιφανειακού και υπόγειου συστήματος. Εφόσον το χρονικό βήμα της προσομοίωσης είναι μηνιαίο, τότε για κάθε

συνδυασμό υπολεκάνης και μονάδας υδρολογικής απόκρισης αντιστοιχεί μία δεξαμενή που αντιπροσωπεύει την ακόρεστη ζώνη, ενώ στο ημερήσιο χρονικό βήμα διαμορφώνονται ξεχωριστές δεξαμενές για την ανώτατη και κατώτατη ακόρεστη ζώνη. Συνεπώς, αν NB το πλήθος των υπολεκανών και NH το πλήθος των ΜΥΑ, στην πρώτη περίπτωση ορίζονται $NB \times NH$ αρχικές συνθήκες, ενώ στη δεύτερη $2 \times NB \times NH$. Επειδή οι υπολογισμοί στο μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας αναφέρονται σε μοναδιαίες επιφάνειες (όλες οι μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου διατυπώνονται ως ισοδύναμα ύψη νερού), ως αρχικές συνθήκες λαμβάνονται οι στάθμες και όχι τα αποθέματα.

Όσον αφορά στο υπόγειο σύστημα, με γνωστή την αρχική στάθμη $w_{i,0}$ κάθε δεξαμενής, υπολογίζεται το αντίστοιχο αρχικό απόθεμα από τη σχέση:

$$V_{i,0} = S_{yi} A_i w_{i,0} \quad (9.1)$$

όπου S_{yi} η ειδική απόδοση της περιοχής του υδροφορέα που καταλαμβάνει το κύτταρο i και A_i το εμβαδόν του.

Τέλος, οι αρχικές παροχές των πηγών είναι αναγκαίες για την εφαρμογή του πρώτου κύκλου της επαναληπτικής διαδικασίας στο πρώτο χρονικό βήμα, προκειμένου να δοθεί μια αρχική εκτίμηση της υπόγειας απορροής των υπολεκανών (βλ. 9.3).

9.3 Προσομοίωση χωρίς διόδευση

Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της απλής διαδικασίας προσομοίωσης σε ένα χρονικό βήμα (μηνιαίο ή ημερήσιο, χωρίς διόδευση), με συνδυασμένη εφαρμογή των μοντέλων επιφανειακής υδρολογίας, υπόγειας υδρολογίας και κατανομής των υδατικών πόρων. Στο διάγραμμα δίνεται σχηματικά ο τρόπος ανταλλαγής των δεδομένων εισόδου και εξόδου των επιμέρους μοντέλων, με τελικό ζητούμενο τον υπολογισμό όλων των μεταβλητών του επιφανειακού και υπόγειου υδατικού ισοζυγίου του υδροσυστήματος.

Αρχικά, εφαρμόζεται το μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας, με διαφορετικές παραμέτρους για κάθε ΜΥΑ. Στο μοντέλο εισάγονται η επιφανειακή βροχόπτωση και η δυνητική εξατμοδιαπνοή κάθε υπολεκάνης, καθώς και η τρέχουσα αποθήκευση υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη (ή επιμερισμένη στην άνω και κάτω ζώνη, εφόσον το χρονικό βήμα είναι ημερήσιο) για κάθε συνδυασμό υπολεκάνης-ΜΥΑ. Για δεδομένες τιμές παραμέτρων ανά ΜΥΑ (6 ή 7, για μηνιαία και ημερήσια προσομοίωση, αντίστοιχα), το μοντέλο εκτιμά την πραγματική εξατμοδιαπνοή, την επιφανειακή απορροή, την κατείδυση και την αποθήκευση υγρασίας στο πέρας του χρονικού βήματος. Η κατανεμημένη απορροή από κάθε συνδυασμό υπολεκάνης-ΜΥΑ ολοκληρώνεται στην επιφάνεια των υπολεκανών, ενώ η κατείδυση από κάθε συνδυασμό υπολεκάνης-ΜΥΑ ολοκληρώνεται στην επιφάνεια των υποκείμενων υπόγειων κυττάρων, αποτελώντας μία από τις τρεις συνιστώσες φόρτισής τους (βλ. 6.2).

Οι λοιπές φορτίσεις προέρχονται από τις απώλειες λόγω διήθησης κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου και τις αντλήσεις μέσω των γεωτρήσεων, που στο σημείο αυτό είναι άγνωστες.

Τόσο οι διηθήσεις όσο και οι αντλήσεις εκτιμώνται από το μοντέλο κατανομής των υδατικών πόρων, είσοδος του οποίου είναι η προσφορά νερού στους κόμβους του υδροσυστήματος. Ειδικότερα, στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου, η προσφορά νερού περιλαμβάνει την επιφανειακή και υπόγεια απορροή των ανάντη υπολεκανών, καθώς και πιθανές εξωτερικές πηγές (π.χ. εκτροπή νερού από άλλη λεκάνη). Ωστόσο, από τα παραπάνω μεγέθη, δεν είναι γνωστή η τρέχουσα υπόγεια απορροή, ήτοι η εκφόρτιση των πηγών, η οποία υπολογίζεται από το μοντέλο υπόγειας υδρολογίας. Στο σημείο αυτό προκύπτει η ανάγκη επαναληπτικών κύκλων, καθώς η παροχή των πηγών εξαρτάται από την τρέχουσα κατείδυση (η οποία είναι γνωστή) καθώς και τις άγνωστες απώλειες λόγω διήθησης στο ανάντη υδρογραφικό δίκτυο. Επιπλέον, η εν λόγω παροχή επηρεάζεται από τις ανάντη αντλήσεις, οι οποίες είναι επίσης άγνωστες. Τέλος, αν στη λεκάνη πραγματοποιούνται συνδυασμένες απολήψεις επιφανειακών και υπόγειων νερών, προκειμένου να ικανοποιηθούν υδατικές ανάγκες που ενδέχεται να είναι ανταγωνιστικές, τότε η κατανομή τους εξαρτάται και πάλι από τις άγνωστες εκροές των πηγών.

Ο χειρισμός του προβλήματος γίνεται με την εφαρμογή ενός υπολογιστικού βρόχου, ως εξής:

Έστω t το επίκαιρο χρονικό βήμα και k δείκτης που υποδηλώνει τον τρέχοντα επαναληπτικό κύκλο. Στο αρχικό στάδιο (εκτός του κύκλου) υπολογίζονται όλες οι μεταβλητές του επιφανειακού υδατικού ισοζυγίου, μεταξύ των οποίων η επιφανειακή απορροή των υπολεκανών $Q_{i,t}^{[0]}$ (η οποία μεταφέρεται ως σημειακή εισροή στον αντίστοιχο κόμβου εξόδου i) και η φόρτιση των υπόγειων δεξαμενών j λόγω κατείδυσης, $G_{j,t}^{[0]}$ (ο μηδενικός δείκτης υποδηλώνει ότι οι υπολογισμοί γίνονται εκτός του βρόχου).

Ο επαναληπτικός κύκλος περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1: Δίνεται μια αρχική εκτίμηση της υπόγειας απορροής των υπολεκανών, $B_{i,t}^{[k]}$ (στην οποία αθροίζονται οι παροχές όλων των πηγών της υπολεκάνης, οι οποίες μεταφέρονται, μαζί με την επιφανειακή απορροή, ως σημειακές εισροές στον αντίστοιχο κόμβου εξόδου i), υποθέτοντας στον πρώτο κύκλο την παροχή των πηγών του προηγούμενου χρονικού βήματος, και στους υπόλοιπους κύκλους την παροχή που προκύπτει από την επίλυση του μοντέλου υπόγειων νερών του αμέσως προηγούμενου κύκλου, ήτοι:

$$B_{i,t}^{[k]} = \begin{cases} B_{i,t-1}^* & k = 1 \\ B_{i,t}^{[k-1]} & k > 1 \end{cases} \quad (9.2)$$

όπου $B_{i,t-1}^*$ υποδηλώνει τη βέλτιστη εκτίμηση της υπόγειας απορροής του προηγούμενου βήματος, μετά την ολοκλήρωση της επαναληπτικής διαδικασίας.

Βήμα 2: Υπολογίζονται οι εισροές σε όλους τους κόμβους του μοντέλου διγράφου και διαμορφώνεται το διάνυσμα προσφοράς-ζήτησης $\mathbf{y}^{[k]}$, σύμφωνα με τη σχέση (7.14).

Βήμα 3: Επιλύεται το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, από το οποίο προκύπτει η βέλτιστη κατανομή των ροών του υδροσυστήματος, ήτοι οι παροχές των υδατορευμάτων και υδραγωγείων, οι απώλειες λόγω διηθήσεων στα υδατορεύματα και διαρροών στα υδραγωγεία, οι απολήψεις νερού από τους κόμβους του υδροσυστήματος και οι αντλήσεις από τις ομάδες γεωτρήσεων. Οι τελευταίες επιμερίζονται στις γεωτρήσεις κάθε ομάδας, με βάση τους συντελεστές βάρους που έχουν οριστεί (στην απλούστερη περίπτωση, η αντλούμενη ποσότητα ισομοιράζεται στις γεωτρήσεις κάθε ομάδας).

Βήμα 4: Υπολογίζονται οι φορτίσεις των υπόγειων δεξαμενών j , ανηγμένες στις επιφάνειες των κυττάρων (ήτοι διατυπωμένες ως ισοδύναμα ύψη νερού). Σε αυτές περιλαμβάνονται η κατείδυση $g_{j,t}^{[0]}$ από τα υπερκείμενα επιφανειακά στοιχεία (συνδυασμός υπολεκανών και ΜΥΑ), η διήθηση $d_{j,t}^{[k]}$ από το υπερκείμενο υδρογραφικό δίκτυο, και η άντληση $w_{j,t}^{[k]}$.

Βήμα 5: Με δεδομένες τις φορτίσεις, επιλύεται το μοντέλο υπόγειας ροής, έξοδοι του οποίου είναι οι στάθμες των υπόγειων δεξαμενών, οι παροχές των πηγών και οι υπόγειες εκφορτίσεις εκτός λεκάνης (π.χ. απώλειες προς τη θάλασσα ή προς γειτονικές λεκάνες).

Βήμα 6: Για όλες τις πηγές του υδροσυστήματος, υπολογίζεται η απόκλιση μεταξύ της τρέχουσας και προηγούμενης εκτίμησης της παροχής εκφόρτισης. Αν η μέγιστη απόκλιση είναι μικρότερη από κάποια τιμή ανοχής που ορίζει ο χρήστης (κριτήριο σύγκλισης) ή ο αριθμός των επαναλήψεων υπερβεί κάποιο ανώτατο όριο που επίσης ορίζει ο χρήστης (κριτήριο τερματισμού), τότε η διαδικασία τερματίζεται, διαφορετικά επανέρχεται στο πρώτο βήμα.

Συνήθως, για τη σταθεροποίηση της παροχής των πηγών, επαρκεί ένας μόνο κύκλος επαναλήψεων, κάτι που καθιστά το παραπάνω σχήμα επίλυσης πολύ αποδοτικό, από πλευράς υπολογιστικού φόρτου. Αν στο υδροσύστημα δεν υπάρχουν πηγές, τότε προφανώς δεν προκύπτει η ανάγκη επαναλήψεων.

9.4 Ημερήσια προσομοίωση με διόδευση

Σύμφωνα με τις παραδοχές του υποκεφαλαίου 8.1, εφόσον ζητείται η αναπαράσταση των φαινομένων διόδευσης στην ημερήσια χρονική κλίμακα, τότε η υπολογιστική διαδικασία της προσομοίωσης εκτελείται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο εφαρμόζεται το τυπικό σχήμα σύζευξης των μοντέλων επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας και κατανομής των υδατικών πόρων του υδροσυστήματος που εξηγήθηκε προηγουμένως, θεωρώντας μηδενική ανάρτηση στο υδρογραφικό δίκτυο. Στο δεύτερο στάδιο, θεωρώντας γνωστές τις παροχές των πηγών και τις απολήψεις από τους κόμβους του δικτύου, εφαρμόζεται η υπολογιστική διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια, για την αναπαράσταση των υδροδυναμικών διεργασιών του δικτύου, ήτοι τη διόδευση της απορροής.

Η επίλυση του προβλήματος για το σύνολο του δικτύου γίνεται σειριακά, από τους πλέον ανάντη κόμβους του δικτύου (κόμβους κεφαλής) προς τα κατόντη. Η διόδευση υλοποιείται για κάθε κλάδο υδατορεύματος χωριστά, εφαρμόζοντας το σχήμα επίλυσης που προβλέπεται για τον συγκεκριμένο

κλάδο (γραμμικό κινηματικό κύμα ή κύμα διάχυσης Muskingum). Στους κόμβους συμβολής, πρώτα ολοκληρώνονται οι υπολογισμοί σε όλα τα συμβάλλοντα υδατορεύματα και, στη συνέχεια, η διαδικασία προχωρά προς τα κατάντη. Για το σκοπό αυτό, σε κάθε κλάδο ορίζεται μια *τάξη* (routing order), με την οποία ελέγχεται η διαδοχή των υπολογισμών. Ο πλέον κατάντη κλάδος που καταλήγει στην έξοδο της λεκάνης λαμβάνει τη μεγαλύτερη τάξη, ενώ ο πλέον ανάντη τη μικρότερη. Σε δίκτυα δενδροειδούς μορφής (όπου σε έναν τουλάχιστον κόμβο πραγματοποιείται συμβολή κλάδων), δύο ή περισσότεροι κλάδοι μπορούν να ανήκουν στην ίδια τάξη· στην περίπτωση αυτή δεν έχει σημασία η σειρά των υπολογισμών.

Η γενική διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

Βήμα 1: Υπολογίζονται τα ωριαία υδρογραφήματα όλων των υπολεκανών, μέσω του σχήματος επιμερισμού των χρονοσειρών μέσης ημερήσιας παροχής (βλ. 8.2).

Βήμα 2: Ακολουθώντας την ιεραρχία των κλάδων του δικτύου (τάξη διόδευσης), παράγεται το ωριαία υδρογράφημα εισόδου, ήτοι η καθαρή (μετά την αφαίρεση των απολήψεων και των απωλειών λόγω διήθησης) παροχή εισροής στον ανάντη κόμβο.

Βήμα 3: Με εφαρμογή του σχήματος επίλυσης, υπολογίζεται το ωριαίο υδρογράφημα εξόδου που καταλήγει στον κατάντη κόμβο του υδατορεύματος.

Βήμα 4: Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία για όλους τους κλάδους του δικτύου, όλα τα ωριαία μεγέθη των κόμβων και κλάδων του δικτύου συναθροίζονται σε μέση ημερήσια κλίμακα. Ο έλεγχος της προσαρμογής του μοντέλου γίνεται με βάση τις εν λόγω χρονοσειρές παροχής, και όχι τις αρχικές εκτιμήσεις που προκύπτουν από το πρώτο στάδιο της προσομοίωσης (πριν την πραγματοποίηση της διόδευσης).

Το πιο κρίσιμο σημείο της μεθοδολογίας αφορά στην παραγωγή των υδρογραφημάτων εισόδου, η οποία υλοποιείται ως εξής: Έστω ο κλάδος (i, j) , όπου i ο δείκτης του ανάντη και j ο δείκτης του κατάντη κόμβου του⁷. Εφόσον έχουν ολοκληρωθεί οι υπολογισμοί για το ανάντη υδρογραφικό δίκτυο, οι οποίοι αφορούν στους κλάδους μικρότερης τάξης, τότε στον κόμβο i είναι γνωστά τα ακόλουθα μεγέθη του υδατικού ισοζυγίου (εκφρασμένα σε μονάδες μέσης ωριαίας ή μέσης ημερήσιας παροχής):

- τα ωριαία υδρογραφήματα εξόδου, $O_i^{[k, i]}$, όλων των κλάδων (k, i) που συμβάλλουν στον κόμβο i , τα οποία έχουν υπολογιστεί από το μοντέλο διόδευσης·
- τα ωριαία υδρογραφήματα, $Q_i^{[m, i]}$, όλων των υπολεκανών m με έξοδο στον κόμβο i , τα οποία παράγονται από το σχήμα επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών, οι οποίες εκτιμώνται στο

⁷ Υπενθυμίζεται ότι στο μοντέλο θεωρείται ότι κατάντη κάθε κόμβου ορίζεται ένας και μόνο ένας κλάδος υδατορεύματος και, επιπλέον, κάθε υπολεκάνη διατρέχεται από έναν και μόνο ένα υδατόρευμα, με εξαίρεση τις ανάντη υπολεκάνες που απορρέουν στους κόμβους κεφαλής του υδρογραφικού δικτύου.

πρώτο στάδιο της προσομοίωσης· τα εν λόγω υδρογραφήματα θεωρείται ότι μεταφέρονται στην έξοδο κάθε υπολεκάνης με χρονική υστέρηση $\Delta\tau_m$, όπου η ποσότητα $\Delta\tau_m$ εκφράζει το πλήθος των χρονικών βημάτων που απαιτούνται για τη «μεταφορά» της απορροής από το κέντρο βάρους της υπολεκάνης στον κόμβο εξόδου και αποτελεί παράμετρο του μοντέλου·

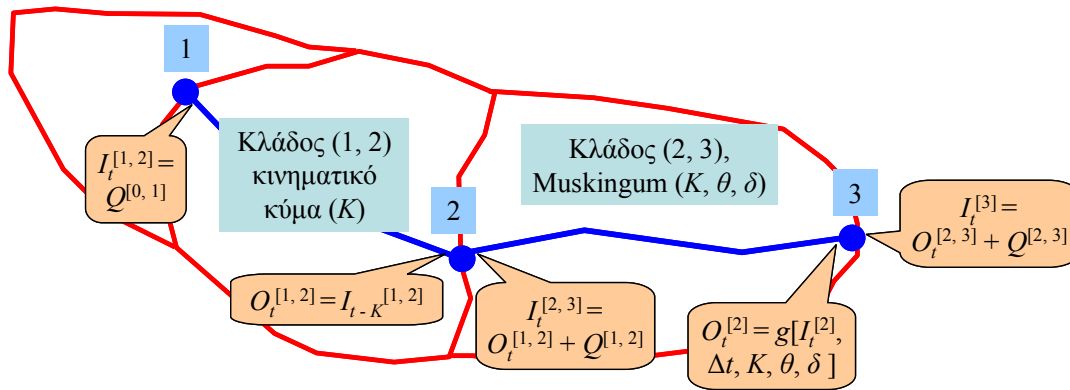
- οι λοιπές σημειακές διεργασίες που πραγματοποιούνται στον κόμβο i (εισροές από εξωτερικές πηγές, υδραγωγεία και ομάδες γεωτρήσεων, εκροές προς υδραγωγεία, απολήψεις), σε ημερήσια κλίμακα, οι οποίες έχουν υπολογιστεί από το μοντέλο κατανομής των ροών του υδροσυστήματος.

Ειδικότερα, αν $PI_i^{[i]}$, $PO_i^{[i]}$ είναι οι σημειακές εισροές και εκροές, αντίστοιχα, που αναφέρονται στον κόμβο i , τότε το υδρογράφημα εισόδου του κλάδου (i, j) προκύπτει από την εξίσωση συνέχειας:

$$I_t^{[i,j]} = (1 - \lambda_{ij}) \max \left[0, \sum_{k=1}^{NR(i)} O_t^{[k,i]} + \sum_{m=1}^{NB(i)} Q_{t-\Delta\tau}^{[m,i]} + PI_i^{[i]} - PO_i^{[i]} \right] \quad (9.3)$$

όπου λ_{ij} ο συντελεστής απωλειών λόγω διηθήσεων κατά μήκος του κλάδου (i, j) , $NR(i)$ το πλήθος των κλάδων που συμβάλλουν στον κόμβο i , και $NB(i)$ το πλήθος των υπολεκάνων που έχουν έξοδο στον κόμβο i . Στην παραπάνω σχέση, οι απώλειες αφαιρούνται πριν τη διόδευση (ώστε να απλουστευτούν οι υπολογισμοί του μοντέλου διόδευσης, δηλαδή να μην υπάρχει κατανεμημένη παροχή εκροής κατά μήκος του κλάδου), ενώ δεν επιτρέπεται η παραγωγή αρνητικής παροχής, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι οι σημειακές εκροές $PO_i^{[i]}$ έχουν εκτιμηθεί στο προγενέστερο στάδιο, κατά το οποίο το σύνολο της εισερχόμενης απορροής ανάντη είχε θεωρηθεί πλήρως διαθέσιμη για την πραγματοποίηση απολήψεων εντός του χρονικού βήματος. Επισημαίνεται ακόμη ότι ενώ τα μεγέθη $O_t^{[k,i]}$ και $Q_t^{[m,i]}$ παρουσιάζουν χρονική διακύμανση εντός της ημέρας, τα μεγέθη $PI_i^{[i]}$ και $PO_i^{[i]}$ θεωρούνται σταθερά στη διάρκεια του 24ώρου, ήτοι ίσα με την αντίστοιχη μέση ημερήσια παροχή που έχει εκτιμηθεί από το μοντέλο βελτιστοποίησης των ροών του υδροσυστήματος.

Μετά το πέρας των υπολογισμών για το σύνολο του υδρογραφικού δικτύου, επαναπροσδιορίζονται οι μέσες ημερήσιες παροχές των κλάδων, με ανακατασκευή του υδατικού ισοζυγίου των κόμβων και προσθήκη των απωλειών λόγω διηθήσεων. Το εν λόγω ισοζύγιο είναι προσεγγιστικό, καθώς ενδέχεται να υπάρχουν «λογιστικές» αποκλίσεις λόγω των διαφορετικών μοντέλων εκτίμησης των παροχών των υδατορευμάτων και των απολήψεων του υδροσυστήματος. Συγκεκριμένα, λόγω του μη συγχρονισμού των απορροών (τόσο κατά τη διαδρομή τους στις υπολεκάνες όσο και στο υδρογραφικό δίκτυο), είναι δυνατό να εμφανιστούν αρνητικές παροχές στην εξίσωση (9.3), που σημαίνει ότι οι απολήψεις (για την ακρίβεια η διαθέσιμη παροχή του δικτύου) έχουν υπερεκτιμηθεί. Πάντως, με δεδομένο ότι οι ανασχές που πραγματοποιούνται κατά μήκος του δικτύου είναι σημαντικές μόνο κατά τη διάρκεια ισχυρών πλημμυρικών φαινομένων, στη διάρκεια των οποίων η προσφορά νερού λόγω απορροής υπερβαίνει, προφανώς, κατά πολύ τη ζήτηση, το σφάλμα της διαδικασίας αναμένεται να είναι από αμελητέο έως πολύ μικρό.



Σχήμα 9.1: Παράδειγμα επίλυσης του μοντέλου διάδευσης στο υδρογραφικό δίκτυο (I_t : υδρογράφημα εισόδου, O_t : υδρογράφημα εξόδου, Q_t : υδρογράφημα υπολεκάνης).

Στο παράδειγμα του Σχήματος 9.1 περιγράφεται η πορεία επίλυσης κατά μήκος ενός υποθετικού δικτύου που περιλαμβάνει δύο κλάδους, τρεις κόμβους και τρεις υπολεκάνες. Στο δίκτυο θεωρείται ότι δεν υπάρχουν άλλες εισροές εκτός από την απορροή των υπολεκανών, ενώ δεν πραγματοποιούνται εκροές. Αρχικά υπολογίζεται το υδρογράφημα εισόδου, $I_t^{[1,2]}$, του πλέον ανάντη κλάδου (1, 2), το οποίο ισούται με την παροχή εξόδου $Q_t^{[0,1]}$ της υπολεκάνης που τροφοδοτεί τον κόμβο 1, η οποία μεταφέρεται με χρονική υστέρηση (ο δείκτης του ανάντη κόμβου της υπολεκάνης είναι μηδενικός, που υποδηλώνει ότι η τελευταία δεν διατρέχεται από υδατόρευμα). Αν υποτεθεί ότι για τη διάδευση των υδρογραφημάτων κατά μήκος του κλάδου (1, 2) επιλέγεται το μοντέλο κινηματικού κύματος, με παράμετρο χρονικής υστέρησης K , τότε το υδρογράφημα εξόδου, $O_t^{[1,2]}$, ισούται με το $I_t^{[1,2]}$ μετατοπισμένο κατά K ώρες. Στη συνέχεια, υπολογίζεται το υδρογράφημα εισόδου $I_t^{[2,3]}$ του αμέσως κατάντη κλάδου (2, 3). Στο εν λόγω υδρογράφημα αθροίζονται το διοδευμένο υδρογράφημα $O_t^{[1,2]}$ και η χρονικά μετατοπισμένη παροχή εξόδου $Q_t^{[1,2]}$ της υπολεκάνης που τροφοδοτεί τον κόμβο 2. Αν υποτεθεί ότι για τη διάδευση κατά μήκος του κλάδου (2, 3) επιλέγεται το μοντέλο κύματος διάχυσης Muskingum με παραμέτρους K , θ και δ , τότε αφού προσδιοριστεί το απαιτούμενο πλήθος υπο-τμημάτων στα οποία πρέπει να χωριστεί ο εν λόγω κλάδος και υπολογιστούν οι τρεις συντελεστές στάθμισης, παράγεται το υδρογράφημα εξόδου, $O_t^{[2,3]}$, ως γραμμικός συνδυασμός των $I_t^{[2,3]}$, $I_{t-1}^{[2,3]}$ και $O_{t-1}^{[2,3]}$. Τέλος, το υδρογράφημα κατάντη του κόμβου εξόδου της λεκάνης (κόμβος 3) προκύπτει προσθέτοντας στο διοδευμένο υδρογράφημα $O_t^{[2,3]}$ την παροχή εξόδου $Q_t^{[2,3]}$ της υπολεκάνης που τροφοδοτεί τον εν λόγω κόμβο, μετατοπισμένη κατά την αντίστοιχη χρονική υστέρηση.

10 Βαθμονόμηση παραμέτρων

10.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα τις ακόλουθες κατηγορίες παραμέτρων:

- έξι ή επτά παραμέτρους για κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης, ανάλογα με αν εφαρμόζεται μηνιαίο ή ημερήσιο χρονικό βήμα, αντίστοιχα·
- δύο παραμέτρους (υδραυλική αγωγιμότητα, πορώδες) για κάθε υπόγεια δεξαμενή·
- μία παράμετρο (υδραυλική αγωγιμότητα) για κάθε πηγή και για κάθε εικονική δεξαμενή που υλοποιεί υπόγειες διαφυγές εκτός λεκάνης·
- μία παράμετρο (συντελεστής διήθησης) για κάθε κλάδο υδατορεύματος·

Αν και οι εν λόγω παράμετροι έχουν κάποιο αδρομερές φυσικό υπόβαθρο, είναι εξαιρετικά αβέβαιη η απευθείας εκτίμησή τους, με βάση π.χ. τυπικές τιμές ανάλογα με τον τύπο του εδάφους. Πρακτικά, ο μόνος τρόπος ασφαλούς προσδιορισμού τους είναι η έμμεση προσαρμογή τους με σύγκριση των ιστορικών παρατηρήσεων με τις προσομοιωμένες αποκρίσεις του μοντέλου που αναφέρονται στις ίδιες συνιστώσες του υδροσυστήματος, 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 (βελτιστοποίηση).

Στο υποκεφάλαιο 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 την αβεβαιότητα των διεργασιών δυσχεραίνουν σημαντικά τη διαδικασία βαθμονόμησής τους.

Το μεθοδολογικό πλαίσιο εκτίμησης των παραμέτρων του μοντέλου μέσω βαθμονόμησης 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. Εφαρμόζονται μεθοδολογίες αιχμής, κατάλληλες για ολική και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, όπου στην πρώτη περίπτωση παράγεται μια μεμονωμένη βέλτιστη λύση, ενώ στη δεύτερη παράγεται ένα σύνολο λύσεων, που περιγράφουν βέλτιστους συμβιβασμούς μεταξύ των αντικρουόμενων κριτηρίων. Στα υποκεφάλαια 10.2 και 10.3 εξηγείται το μαθηματικό υπόβαθρο των μέτρων προσαρμογής και των αλγορίθμων, αντίστοιχα. Ακόμη, στο Κεφάλαιο 11 δίνονται ορισμένες κατευθυντήριες αρχές, για την πλέον συνδυασμένη αξιοποίηση των υπολογιστικών εργαλείων και της εμπειρίας του χρήστη, με σκοπό την παραγωγή εύρωστων λύσεων που εξασφαλίζουν επαρκή προγνωστική ικανότητα.

10.2 Κριτήρια καλής προσαρμογής

Για τον έλεγχο της προσαρμογής του μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταξύ ενός πλήθους αριθμητικών κριτηρίων, που αναφέρονται σε μία ή περισσότερες μεταβλητές απόκρισης. Συγκεκριμένα, ο έλεγχος γίνεται ως προς τις ακόλουθες χρονοσειρές:

- χρονοσειρές παροχής κατάντη κόμβων του υδρογραφικού δικτύου·
- χρονοσειρές παροχής στην έξοδο υπολεκανών·
- χρονοσειρές παροχής πηγών·
- χρονοσειρές στάθμης υπόγειων δεξαμενών.

Οι ιστορικές χρονοσειρές μπορεί να μην είναι πλήρεις. Στην περίπτωση αυτή, η σύγκριση μεταξύ μετρημένων και προσομοιωμένων χρονοσειρών γίνεται μόνο για το κοινό δείγμα τιμών τους. Για κάθε κριτήριο που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη μεταβλητή, f_i , εισάγεται ένας μη αρνητικός συντελεστής βάρους, w_i . Με συνάθροιση των m επιμέρους κριτηρίων, προκύπτει ένα καθολικό μέτρο σφάλματος,

$F(\boldsymbol{\theta})$, ως προς τις άγνωστες παραμέτρους, $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$, που αποτελεί τη στοχαστική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης, ήτοι:

$$F(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^m w_i f_i(\boldsymbol{\theta}) \quad (10.1)$$

Συμβατικά, όλα τα μέτρα ορίζονται κατά τρόπο ώστε η λύση του προβλήματος, η οποία αντιστοιχεί στις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων, $\boldsymbol{\theta}^* = (\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_n^*)$, να βρίσκεται στην κατεύθυνση ελαχιστοποίησης της στοχαστικής συνάρτησης. Είναι προφανές ότι με την εφαρμογή διαφορετικών συντελεστών βάρους, προκύπτει διαφορετική, κάθε φορά, βέλτιστη λύση.

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

10.2.1 Αποτελεσματικότητα

Συμβολίζοντας με y_t την παρατηρημένη και με $y'_t(\boldsymbol{\theta})$ την προσομοιωμένη τιμή της μεταβλητής y στο χρονικό βήμα t , με την τελευταία να είναι προφανώς συνάρτηση του διανύσματος παραμέτρων $\boldsymbol{\theta}$ ⁸, τότε η συνάρτηση προσαρμογής μπορεί να διατυπωθεί ως ένα μέτρο «απόστασης» μεταξύ των y_t και y'_t , για όλο τον χρονικό ορίζοντα της περιόδου ελέγχου, 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:

$$EFF = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (y_t - y'_t)^2}{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2} \quad (10.2)$$

όπου \bar{y} η μέση τιμή της παρατηρημένης χρονοσειράς⁹. 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).

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

⁸ Για λόγους απλούστευσης, θα απαλείφεται στη συνέχεια η διατύπωση ως προς τις παραμέτρους $\boldsymbol{\theta}$.

⁹ Τονίζεται ότι, σε περίπτωση που το δείγμα των παρατηρήσεων είναι μικρότερο από το δείγμα των μετρήσεων, η μέση τιμή των τελευταίων πρέπει να υπολογιστεί για την κοινή χρονική περίοδο.

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 *et 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 μεγιστοποίηση του συγκεκριμένου μέτρου οδηγεί στη θεωρητικά βέλτιστη προσαρμογή των προσομοιωμένων αποκρίσεων y_i' στις αντίστοιχες παρατηρήσεις y_i . Πάντως, ακόμα και υψηλές τιμές της αποτελεσματικότητας δεν εγγυώνται απαραίτητα μια καλή προγνωστική ικανότητα του μοντέλου, με δεδομένο ότι το εν λόγω μέτρο είναι ευαίσθητο σε παράγοντες όπως το μέγεθος και η χρονική διακριτότητα του δείγματος¹⁰, η ύπαρξη εξωκείμενων τιμών και η μεροληψία (McCuen *et al.*, 2006).

10.2.2 Μεροληψία

Μια στοιχειώδης απαίτηση, που συχνά τίθεται στα υδρολογικά μοντέλα, είναι η αναπαραγωγή του 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 μέτρων μέσου τετραγωνικού σφάλματος, όπως η αποτελεσματικότητα. Συνεπώς, για τον έλεγχο της αναπαραγωγής της παρατηρημένης μέσης τιμής εισάγεται ένα μέτρο *μεροληψίας* (bias), που ορίζεται ως:

$$\text{AVERBIAS} = \frac{\bar{y}' - \bar{y}}{\bar{y}} \quad (10.3)$$

όπου \bar{y}' η μέση τιμή της προσομοιωμένης χρονοσειράς και \bar{y} της παρατηρημένης για το ίδιο μήκος δείγματος. Στην ΥΔΡΟΓΕΙΟ, το μέτρο μεροληψίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνδυαστικά με την αποτελεσματικότητα ή μεμονωμένα, εφόσον υπάρχουν χονδρικές εκτιμήσεις σχετικά με τη μέση τιμή

¹⁰ Όσο πιο πυκνές είναι οι παρατηρήσεις σε ένα υδρολογικό γεγονός (π.χ. το υδρογράφημα μια πλημμύρας), τόσο μειώνεται η τιμή της αποτελεσματικότητας του μοντέλου που το περιγράφει.

μιας μεταβλητής, χωρίς να υπάρχει επαρκές δείγμα μετρήσεων ώστε να μπορεί να γίνει βήμα-προς-βήμα σύγκριση των επιμέρους τιμών. Είναι προφανές ότι αν $EFF = 1$, τότε $BIAS = 0$, 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 $AVERBIAS = 0$ (αναπαράγεται ακριβώς η παρατηρημένη μέση τιμή της μεταβλητής) αλλά $EFF = 0$. Δηλαδή, η αβεβαιότητα του μοντέλου «μέσης τιμής» ταυτίζεται με την υδρολογική αβεβαιότητα, όπως αυτή εκφράζεται μέσω της τυπικής απόκλισης.

Εκτός της μέσης τιμής, ορίζονται μέτρα μεροληψίας ως προς δύο ακόμη τυπικούς στατιστικούς δείκτες, την τυπική απόκλιση, σ_y , τον συντελεστή μεταβλητότητας, δηλαδή τον λόγο της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή. Τα αντίστοιχα μέτρα διατυπώνονται ως:

$$SDEVBIAS = \frac{\sigma_{y'} - \sigma_y}{\sigma_y} \quad (10.4)$$

$$CVARBIAS = \frac{\sigma_{y'} / \bar{y}' - \sigma_y / \bar{y}}{\sigma_y / \bar{y}} \quad (10.5)$$

Θετική τιμή της μεροληψίας υποδηλώνει υπερεκτίμησή του αντίστοιχου δείκτη, ενώ αρνητική υποδηλώνει υποεκτίμησή του. Επισημαίνεται ότι στη διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης, επειδή στόχος είναι ο μηδενισμός της μεροληψίας, όλα τα σχετικά μέτρα εκφράζονται ως απόλυτες τιμές.

10.2.3 Σφάλμα μηδενικών παροχών

Το σφάλμα των μηδενικών παροχών είναι ένα εμπειρικό μέτρο, με το οποίο ελέγχεται αν το μοντέλο αναπαράγει φαινόμενα διακοπής της ροής ή, αντίστροφα, μηδενίζει αδικαιολόγητα την απορροή 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:

$$z_t = \begin{cases} y_t & \text{αν } y_t' = 0 \\ y_t' & \text{αν } y_t = 0 \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (10.6)$$

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα αναπαραγωγής των μηδενικών τιμών υπολογίζεται ως:

$$e_0 = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{t=1}^T z_t^2} \quad (10.7)$$

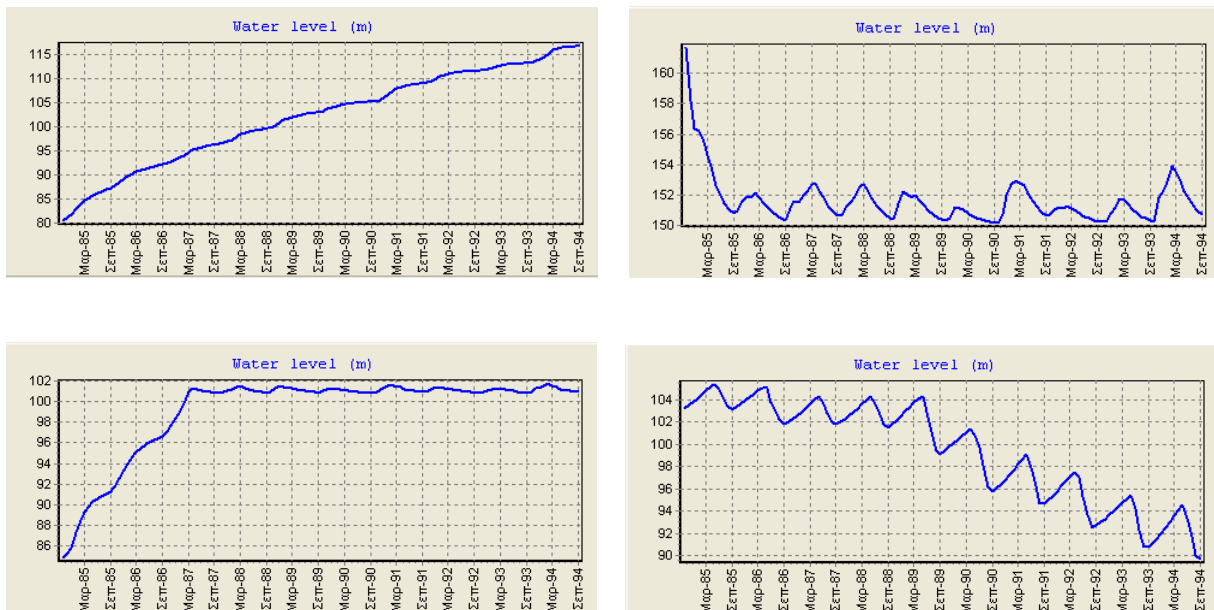
όπου T_0 ο αριθμός των χρονικών βημάτων κατά τα οποία το μοντέλο είτε δεν αναπαράγει την παρατηρημένη μηδενική τιμή ($y_i' > 0, y_i = 0$) είτε μηδενίζει την παροχή, ενώ κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα ($y_i' = 0, y_i > 0$).

10.2.4 Σφάλμα τάσεων

Στο μοντέλο υπόγειας υδρολογίας, επειδή η χωρική κλίμακα των κυττάρων είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με την τοπική κλίμακα των πιεζομέτρων, είναι σχετικά επισφαλής η προσαρμογή των παραμέτρων του μοντέλου με βάση παρατηρήσεις στάθμης· πρόκειται για μια γνωστή δυσχέρεια του αντίστροφου προβλήματος της υδρογεωλογίας. Ακόμα περισσότερο, όταν δεν υπάρχουν καθόλου μετρήσεις στάθμης ή όταν αυτές περιορίζονται σε μικρή έκταση του υδροφορέα, είναι πιθανό να δημιουργηθούν συνθήκες μη ρεαλιστικής αναδιανομής του αποθηκευμένου υπόγειου νερού. Αυτό αληθεύει ιδιαίτερα για τα συνδυαστικά μοντέλα, που βαθμονομούνται αποκλειστικά με βάση μετρήσεις επιφανειακών νερών. Στην περίπτωση αυτή, οι παράμετροι που σχετίζονται με τις υπόγειες δεξαμενές, ιδιαίτερα τις περιμετρικές που αναρρυθμίζουν την κατείσδυση των ορεινών περιοχών, είναι, στην πράξη, μη ελεγχόμενες. Έτσι, προκειμένου να αναπαραχθούν οι χρονοσειρές παροχής, πραγματοποιούνται μη ρεαλιστικές μεταφορές υπόγειου νερού, με αποτέλεσμα κάποιες δεξαμενές να ταπεινώνονται και άλλες να γεμίζουν συστηματικά. Κατά συνέπεια, ορισμένες χρονοσειρές αποθήκευσης (ή ισοδύναμα στάθμης) εμφανίζουν θετική ή αρνητική τάση, η οποία είναι ασυνεπής με τη φυσική του συστήματος, δεδομένου ότι πρόκειται για υδρολογικές μεταβλητές που οφείλουν να ακολουθούν τη γενική υδρολογική δίαιτα της περιοχής μελέτης, που προφανώς εξαρτάται από την εποχιακή κατανομή των βροχοπτώσεων. Μια άλλη περίπτωση μη ρεαλιστικής απεικόνισης της δίαιτας των υπόγειων νερών αφορά σε απότομη άνοδο ή πτώση της στάθμης ορισμένων δεξαμενών κατά τα αρχικά χρονικά βήματα της προσομοίωσης, γεγονός που κατά κανόνα αποδίδεται σε λανθασμένο ορισμό των αρχικών συνθηκών του μοντέλου υπόγειας υδρολογίας.

Χαρακτηριστικές περιπτώσεις μη συνεπών διακυμάνσεων της στάθμης απεικονίζονται στα τέσσερα διαγράμματα του Σχήματος 10.1. Στο διάγραμμα πάνω αριστερά παρατηρείται συστηματική άνοδος της στάθμης σε διάστημα μιας δεκαετίας, χωρίς μάλιστα εποχιακές διακυμάνσεις. Συνεπώς, η προσομοιωμένη στάθμη της υπόγειας δεξαμενής προσεγγίζεται από μια σχεδόν τέλεια γραμμική τάση, η οποία προφανώς δεν μπορεί να αντιπροσωπεύει την υδρολογική δίαιτα ενός υδροφορέα. Προφανώς, η παράμετρος υδραυλικής αγωγιμότητας που έχει τεθεί για το συγκεκριμένο κύτταρο είναι πολύ χαμηλή, με αποτέλεσμα να συσσωρεύεται νερό διαχρονικά. Στο διάγραμμα πάνω δεξιά παρατηρείται απότομη πτώση της στάθμης στο διάστημα των πρώτων μηνών της προσομοίωσης, ενώ στη συνέχεια η διακύμανση είναι λογική, καθώς ακολουθεί την εποχιακή διακύμανση των βροχοπτώσεων. Στην περίπτωση αυτή, η αρχική στάθμη που έχει τεθεί είναι υπερβολικά υψηλή, και η δεξαμενή αδειάζει γρήγορα μέχρι να επιτευχθεί ισορροπία του πεδίου ροής στη γειτονιά της. Στο διάγραμμα κάτω αριστερά παρατηρείται μια μικτή εικόνα που επίσης κρίνεται μη συνεπής – τα πρώτα χρόνια της

προσομοίωσης εμφανίζεται γραμμική αύξηση της στάθμης και στη συνέχεια η στάθμη ισορροπεί με ανεπαίσθητες εποχιακές διακυμάνσεις. Τέλος, στο διάγραμμα κάτω δεξιά παρατηρείται συστηματική πτώση της στάθμης, αν και εμφανίζονται εποχιακές διακυμάνσεις. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στον ορισμό υπερβολικά υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας, με συνέπεια τη συστηματική εκκένωση της δεξαμενής, ή σε εντατικές αντλήσεις, εξαιτίας των οποίων εξαντλούνται τα ρυθμιστικά αποθέματα της περιοχής. Εφόσον ισχύει το δεύτερο, τότε η αναπαραγωγή της στάθμης μπορεί να είναι ρεαλιστική – για το λόγο αυτό απαιτείται ενδελεχής διερεύνηση των συνθηκών εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων της περιοχής. Βεβαίως, εφόσον περιοριστούν ή ακόμα και διακοπούν οι αντλήσεις, ο υδροφορέας πρέπει να επανέλθει σε κατάσταση ισορροπίας.



Σχήμα 10.1: Χαρακτηριστικές περιπτώσεις μη συνεπών διακυμάνσεων της στάθμης των δεξαμενών υπόγειου νερού (προσαρμογή από: Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2009).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, υλοποιήθηκε ένα εμπειρικό μέτρο ποιότητας, μέσω του οποίου ελέγχεται η υπερετήσια τάση ανύψωσης ή ταπείνωσης της στάθμης των υπόγειων δεξαμενών, ώστε να είναι συνεπής με τις πιεζομετρικές παρατηρήσεις στη λεκάνη. Η ύπαρξη τάσης ανιχνεύεται μέσω της δοκιμής *Mann-Kendall* (rank correlation test), όπως περιγράφεται από τον Kottegoda (1980, p. 32-34). Η δοκιμή υλοποιείται ως εξής: Για μια δεδομένη χρονοσειρά $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, υπολογίζεται η τυποποιημένη κανονική μεταβλητή:

$$T = r / \sqrt{\sigma_r^2} \quad (10.8)$$

όπου:

$$r = 4P / [N(N-1)] \quad (10.9)$$

$$\sigma_r^2 = 2(2N+5) / [9N(N-1)]$$

και P ο αριθμός όλων των ζευγών $\{x_i, x_j, j > i\}$ με $x_i < x_j$. Θεωρώντας αμφίπλευρο έλεγχο (δηλαδή τόσο για θετική όσο και για αρνητική τάση) και επίπεδο σημαντικότητας α , απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση μη ύπαρξης τάσης εφόσον $|T| < z_{\alpha/2}$. Με βάση τον παραπάνω έλεγχο, και με θεώρηση επιπέδου σημαντικότητας $\alpha = 95\%$, οπότε $z_{\alpha/2} = 1.96$, εισάγεται ένα εμπειρικό μέτρο, για την εισαγωγή ποινης στα κύτταρα εκείνα των οποίων η μηνιαία στάθμη εμφανίζει στατιστικά σημαντική τάση. Το μέτρο αυτό υπολογίζεται από τη σχέση:

$$e_T = \max(0, |T| - 1.96) \quad (10.10)$$

Επισημαίνεται ότι το παραπάνω σφάλμα δεν έχει νόημα να χρησιμοποιείται για τα εικονικά κύτταρα που αντιπροσωπεύουν συγκέντρωση των υπόγειων διαφυγών προς τη θάλασσα, τα οποία εξ ορισμού παρουσιάζουν θετική τάση, όπως και για τα 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.

10.3 Εργαλεία βελτιστοποίησης

10.3.1 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 γενική μαθηματική διατύπωση του προβλήματος είναι η ακόλουθη:

$$\min \mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{g}[w_1 f_1(\boldsymbol{\theta}), w_2 f_2(\boldsymbol{\theta}), \dots, w_m f_m(\boldsymbol{\theta})], \boldsymbol{\theta} \in \Theta \quad (10.11)$$

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. Το εύρος αυτό προσδιορίζεται από τον χρήστη, ακολουθώντας τις αρχές που αναπτύσσονται στο υποκεφάλαιο 11.1.

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:

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{j=1}^m w_j f_j(\boldsymbol{\theta}) \quad (10.12)$$

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 10.3.2. Από την επίλυσή του προκύπτει ένα βέλτιστο σύνολο παραμέτρων θ^* , 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 10.3.3, 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 2.4.2. 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 (Ευστρατιάδης, 2008· Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2009).

10.3.2 Ο εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου

Ο *εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου* (Ευστρατιάδης, 2001· Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2002· Rozos *et al.*, 2004· Ευστρατιάδης, 2008) χειρίζεται προβλήματα μη γραμμικής βελτιστοποίησης συστημάτων υδατικών πόρων, τα οποία παρουσιάζουν σημαντικές δυσχέρειες που οφείλονται στις ιδιαιτερότητες των μη κυρτών χώρων αναζήτησης (ύπαρξη τοπικών ακροτάτων σε πολλαπλές κλίμακες, ασυνέχειες, γεωμετρικές ανωμαλίες, κλπ.). Πρόκειται για μια ευρετική τεχνική, στην οποία επιχειρείται η σύζευξη διαφορετικών μεθοδολογικών προσεγγίσεων και ορισμένων πρωτότυπων στοιχείων. Ενσωματώνοντας στρατηγικές τοπικής και ολικής αναζήτησης σε ένα ενιαίο αλγοριθμικό σχήμα, εξασφαλίζεται ευελιξία κινήσεων σε μη κυρτές επιφάνειες απόκρισης, ταυτόχρονα με τη δυνατότητα ταχείας διερεύνησης των κυρτών περιοχών των εν λόγω επιφανειών.

Η διαδικασία αναζήτησης ακολουθεί το γενικό πρότυπο των *εξελικτικών αλγορίθμων* (evolutionary algorithms)¹¹. Η εξέλιξη των λύσεων γίνεται κατά στάδια, που με βάση τη σχετική ορολογία ονομάζονται *γενιές* (generations). Σε κάθε γενιά, ένα ή περισσότερα άτομα αντικαθίσταται από νέα σημεία (απογόνους), διατηρώντας σταθερό μέγεθος πληθυσμού. Οι απόγονοι παράγονται είτε από τη διασταύρωση πολλαπλών γονέων, στη βάση ενός τροποποιημένου σχήματος *κατερχόμενου απλόκου* (downhill simplex)¹², είτε μέσω *μετάλλαξης*¹³ (mutation). Ο αλγόριθμος αναζητά βελτιωμένες λύσεις,

¹¹ 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).

¹² 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

αν όμως δεν μπορεί να βρει τέτοιες επιδιώκει να διερευνήσει νέες περιοχές του εφικτού χώρου, αποδεχόμενος λύσεις που μπορεί να είναι χειρότερες από τις προηγούμενες. Η πιθανότητα αποδοχής τέτοιων λύσεων ρυθμίζεται αυτόματα, μέσω μιας προσαρμοστικής στρατηγικής *προσομοιωμένης απόπτωσης* (simulated annealing)¹⁴.

Κατά σύμβαση, θεωρείται το πρόβλημα ελαχιστοποίησης μιας βαθμωτής συνάρτησης n μεταβλητών (παραμέτρων). Ο αλγόριθμος απαιτεί τον ορισμό τεσσάρων στοιχείων εισόδου:

- του μεγέθους του πληθυσμού, p , όπου $p \geq n + 1$.
- δύο παραμέτρων του χρονοδιαγράμματος απόπτωσης, λ και β .
- της πιθανότητας μετάλλαξης, p_m .

Ο χώρος αναζήτησης οριοθετείται από δύο ζεύγη διανυσμάτων, $[\mathbf{x}^{\text{low}}, \mathbf{x}^{\text{up}}]$ και $[\mathbf{x}^{\text{min}}, \mathbf{x}^{\text{max}}]$, τα οποία περιγράφουν τα «εξωτερικά» και «εσωτερικά» όρια μεταβολής των παραμέτρων, αντίστοιχα. Τα εσωτερικά όρια δεν είναι δεσμευτικά, και μπορούν να παραβιαστούν κατά τη διαδικασία αναζήτησης, ενώ, αντίθετα, δεν επιτρέπεται ποτέ η υπέρβαση των αντίστοιχων εξωτερικών, τα οποία υποδηλώνουν φυσικά ή μαθηματικά όρια των παραμέτρων του μοντέλου. Στο υποκεφάλαιο 11.2 εξηγείται το σκεπτικό των διπλών ορίων των παραμέτρων και δίνονται ορισμένες κατευθυντήριες αρχές για τον προσδιορισμό τους.

Ο αρχικός πληθυσμός $\mathcal{P}^{[0]}$ αποτελείται από p τυχαία σημεία (διανύσματα), ομοιόμορφα καταναμημένα στο εσωτερικό πεδίο $[\mathbf{x}^{\text{min}}, \mathbf{x}^{\text{max}}]$. Οι συντεταγμένες κάθε σημείου γεννώνται ως τυχαίοι αριθμοί από

τις κορυφές ενός απλόκου στο n -διάστατο χώρο. Το άπλοκο διερευνά το πεδίο αναζήτησης, πραγματοποιώντας τυποποιημένες προσδιοριστικές κινήσεις που εξασφαλίζουν σύγκλιση στο εγγύτερο τοπικό ακρότατο (ανάκλαση ως προς τη χειρότερη κορυφή, επέκταση στην κατεύθυνση της ανάκλασης, συμπίεση προς το κεντροειδές του, συρρίκνωση γύρω από τη καλύτερη κορυφή).

¹³ Ο όρος προέρχεται από τους γενετικούς αλγορίθμους και υποδηλώνει τυχαίες μεταβολές κάθε κλίμακας που λαμβάνουν χώρα σε πολύ μικρό ποσοστό του πληθυσμού, επιτρέποντας τη μετάβαση σε απομακρυσμένες, σε σύγκριση με τον τρέχοντα πληθυσμό, περιοχές του πεδίου αναζήτησης.

¹⁴ *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 απόπτωσης, που εισήγαγαν στη βελτιστοποίηση μη γραμμικών συναρτήσεων οι Kirkpatrick *et al.* (1983).

μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[x_i^{\min}, x_i^{\max}]$. Σε κάθε σημείο, υπολογίζεται η τιμή της στοχαστικής συνάρτησης και, στη συνέχεια, ορίζεται η αρχική τιμή της θερμοκρασίας, ίση με τη διαφορά μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης τιμής, δηλαδή:

$$T^{[0]} = \max \{f_1^{[0]}, \dots, f_p^{[0]}\} - \min \{f_1^{[0]}, \dots, f_p^{[0]}\} \quad (10.1)$$

Έστω $\mathcal{P}^{[k]}$ ο πληθυσμός της k γενιάς, που αποτελείται από το σύνολο $\{\mathbf{x}_1^{[k]}, \dots, \mathbf{x}_p^{[k]}\}$. Η υπολογιστική διαδικασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα (για λόγους απλούστευσης, παραλείπεται ο δείκτης της γενιάς):

Βήμα 1: Υπολογίζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά του πληθυσμού, δηλαδή η μέση τιμή, μ_x , και η τυπική απόκλιση, σ_x , των συντεταγμένων.

Βήμα 2: Διαμορφώνεται ένα άπλοκο $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{n+1}\}$ με τυχαία επιλογή των κορυφών του από τον πληθυσμό, όπου η κορυφή s_1 αντιστοιχεί στην καλύτερη (μικρότερη) και s_{n+1} στην χειρότερη (υψηλότερη) τιμή της στοχαστικής συνάρτησης. Το σημείο s_1 διατηρείται εξ ορισμού στον πληθυσμό, ενώ κάθε άλλο σημείο μπορεί να αντικατασταθεί, όπως περιγράφεται στο επόμενο βήμα. Με τον τρόπο αυτό, προφυλάσσεται η βέλτιστη λύση που έχει έως τότε εντοπιστεί, από τον κίνδυνο αφανισμού της που οφείλεται στους τυχαίους μηχανισμούς επιλογής των εξελικτικών διαδικασιών.

Βήμα 3: Από το υποσύνολο $\{s_2, \dots, s_{n+1}\}$, που περιλαμβάνει όλες τις κορυφές του απλόκου πλην της καλύτερης, επιλέγεται μια κορυφή \mathbf{w} ως υποψήφια για να αντικατασταθεί. Πρόκειται για το σημείο που μεγιστοποιεί την τροποποιημένη συνάρτηση:

$$g(\mathbf{s}) = f(\mathbf{s}) + u T \quad (10.2)$$

όπου u τυχαίος αριθμός που παράγεται από μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0, 1]$. Με βάση τη σχέση (10.2), η τροποποιημένη συνάρτηση περιλαμβάνει δύο συνιστώσες, την τιμή της στοχαστικής συνάρτησης $f(\mathbf{s})$ και τον τυχαίο όρο $u T$, που εξαρτάται από την τιμή της επίκαιρης θερμοκρασίας. Στα αρχικά στάδια της διαδικασίας αναζήτησης, ο βαθμός τυχειότητας κατά την επιλογή του σημείου που αντικαθίσταται είναι σημαντικός, καθώς η θερμοκρασία είναι υψηλή. Σταδιακά, η θερμοκρασία μειώνεται, οπότε μειώνεται και η επίδραση του τυχαίου όρου. Στην οριακή περίπτωση όπου $T \rightarrow 0$, η κορυφή που αντικαθίσταται είναι εξ ορισμού η χειρότερη, που σημαίνει ότι η διαδικασία ακολουθεί τη λογική του αλγορίθμου Nelder-Mead, υιοθετώντας μια πορεία τοπικής βελτιστοποίησης.

Βήμα 4: Γεννάται ένα νέο σημείο \mathbf{r}_0 αναστρέφοντας το άπλοκο ως προς την κορυφή \mathbf{w} , σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{g} + (0.5 + u) (\mathbf{g} - \mathbf{w}) \quad (10.3)$$

όπου u τυχαίος ομοιόμορφος αριθμός στο διάστημα $[0, 1]$ και:

$$\mathbf{g} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{s}_i - \mathbf{w} \right) \quad (10.4)$$

Για $u = 0.5$, ο γεωμετρικός μετασχηματισμός ταυτίζεται με την ανάκλαση της διαδικασίας Nelder-Mead, διαφορετικά περιγράφει μια διαταραχή γύρω από το σημείο ανάκλασης.

Βήμα 5: Εφόσον $f(\mathbf{r}_0) < f(\mathbf{w})$, που υποδηλώνει ότι η κίνηση προς την κατεύθυνση της ανάκλασης οδηγεί σε βελτίωση της τιμής της συνάρτησης, το σημείο \mathbf{r}_0 αντικαθιστά την κορυφή \mathbf{w} στον πληθυσμό και η διαδικασία προχωρά στο βήμα 6α, διαφορετικά προχωρά στο βήμα 6β.

Βήμα 6α: Με δεδομένο ότι η ανάκλαση είναι επιτυχής, εξετάζεται αν μπορεί να βρεθεί μια ακόμα καλύτερη λύση, είτε μέσω επέκτασης του απλόκου στην κατεύθυνση που ορίζει το διάνυσμα $\mathbf{r}_0 - \mathbf{g}$, είτε μέσω εξωτερικής συμπίεσής του, προς την αντίθετη κατεύθυνση. Το σχετικό κριτήριο ελέγχει αν $f(\mathbf{r}_0) < f(\mathbf{s}_1)$, δηλαδή αν η λύση που εντοπίστηκε στο προηγούμενο βήμα υπερτερεί σε σχέση με την καλύτερη κορυφή του απλόκου.

Αν $f(\mathbf{r}_0) < f(\mathbf{s}_1)$, η διαφορά $\mathbf{r}_0 - \mathbf{g}$ υποδηλώνει την διεύθυνση της κλίσης, ή ισοδύναμα την κατεύθυνση ελαχιστοποίησης της συνάρτησης. Το γεγονός αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό, δεδομένου ότι ο εντοπισμός της κλίσης σε μια μη ομαλή επιφάνεια απόκρισης, που εξασφαλίζει μια ταχεία μετάβαση προς κάποιο τοπικό ακρότατο, είναι δύσκολος, ειδικά όταν το πλήθος των μεταβλητών ελέγχου είναι μεγάλο. Στην περίπτωση αυτή, πραγματοποιείται μια σειρά βημάτων επέκτασης στην κατεύθυνσή της ανάκλασης, σύμφωνα με την αναδρομική σχέση:

$$\mathbf{r}_s = \mathbf{g} + \eta_s (\mathbf{r}_0 - \mathbf{g}) \quad (10.5)$$

όπου $\eta_s = \eta_{s-1} + u$, με $\eta_0 = 1$. Η επέκταση του απλόκου συνεχίζεται όσο εντοπίζονται εφικτές λύσεις που βελτιώνουν την τιμή της συνάρτησης, επιταχύνοντας έτσι σημαντικά την διαδικασία αναζήτησης.

Αντίθετα, αν $f(\mathbf{r}_0) > f(\mathbf{s}_1)$, το άπλοκο συμπίεζεται εξωτερικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{g} + (0.25 + 0.5 u) (\mathbf{r}_0 - \mathbf{g}) \quad (10.6)$$

Εφόσον επιτευχθεί βελτίωση της συνάρτησης, το σημείο \mathbf{r}_1 αντικαθιστά το \mathbf{r}_0 .

Μετά την ολοκλήρωση των διαδικασιών του βήματος 6α, ο όγκος του απλόκου, και συνακόλουθα η διασπορά του πληθυσμού, έχει αυξηθεί σε σύγκριση με τον αρχικό όγκο, καθώς ο απόγονος που παράγεται βρίσκεται εκτός των ορίων που διαμορφώνονται από τις συντεταγμένες των γονέων του, δηλαδή τις κορυφές του απλόκου \mathcal{S} . Στη συνέχεια, η υπολογιστική διαδικασία μεταβαίνει στο βήμα 9.

Βήμα 6β: Με δεδομένο ότι η ανάκλαση είναι ανεπιτυχής, δηλαδή $f(\mathbf{r}_0) > f(\mathbf{w})$, δοκιμάζεται μια άλλη πορεία, είτε εντός είτε εκτός των ορίων του απλόκου, στην προσπάθεια εντοπισμού ενός τοπικού ακροτάτου. Το σχετικό κριτήριο ελέγχει αν $g(\mathbf{r}_0) > g(\mathbf{w})$, δηλαδή αν η τιμή της τροποποιημένης συνάρτησης στο σημείο ανάκλασης είναι χειρότερη σε σχέση με τη συμβατικά χειρότερη κορυφή. Αν το κριτήριο είναι αληθές, η υπολογιστική διαδικασία μεταβαίνει στο βήμα 7α, διαφορετικά μεταβαίνει στο βήμα 7β.

Βήμα 7α: Έχοντας απορρίψει το σημείο ανάκλασης \mathbf{r}_0 , πραγματοποιείται εσωτερική συμπίεση του απλόκου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{g} - (0.25 + 0.5 u) (\mathbf{g} - \mathbf{r}_0) \quad (10.7)$$

Εφόσον $\mathbf{r}_1 < \mathbf{r}_0$, το σημείο εσωτερικής συμπίεσης αντικαθιστά το σημείο ανάκλασης στον πληθυσμό.

Αν $f(\mathbf{r}_1) > f(\mathbf{s}_{n+1})$, δηλαδή το σημείο εσωτερικής συμπίεσης είναι χειρότερο ακόμη και από την χειρότερη κορυφή του απλόκου, το τελευταίο συρρικνώνεται γύρω από την καλύτερη κορυφή \mathbf{s}_1 , ώστε $\mathbf{s}'_i = 0.5 (\mathbf{s}_1 + \mathbf{s}_i)$ για κάθε $i = 2, \dots, n + 1$. Πρόκειται για τον μοναδικό γεωμετρικό μετασχηματισμό, στον οποίο αντικαθίστανται περισσότερα του ενός μέλη του πληθυσμού.

Η μείωση του όγκου του απλόκου, τόσο μέσω εσωτερικής συμπίεσης όσο και, πολύ περισσότερο, μέσω συρρίκνωσης, υποδηλώνει τη σύγκλιση του πληθυσμού γύρω από κάποιο τοπικό ακρότατο. Αυτό ενεργοποιεί τον μηχανισμό μείωσης της θερμοκρασίας κατά έναν συντελεστή λ , που είναι παράμετρος του χρονοδιαγράμματος ανόπτησης. Η τυπική τιμή της εν λόγω παραμέτρου είναι 0.99, που εξασφαλίζει αργό ρυθμό μείωσης της θερμοκρασίας, και συνακόλουθα του βαθμού τυχαιότητας στη διαδικασία αναζήτησης. Σε διαφορετική περίπτωση, ελλοχεύει ο κίνδυνος να μηδενιστεί, πρακτικά, η θερμοκρασία του συστήματος από τα πρώτα ήδη στάδια αναζήτησης, με κίνδυνο τον εγκλωβισμό του αλγορίθμου σε κάποιο μη αποδεκτό τοπικό ακρότατο, που απέχει σημαντικά από τη θεωρητικά βέλτιστη λύση.

Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω, η υπολογιστική διαδικασία μεταβαίνει στο βήμα 9.

Βήμα 7β: Αν $g(\mathbf{r}_0) < g(\mathbf{w})$, το σημείο ανάκλασης \mathbf{r}_0 γίνεται αποδεκτό παρόλο που χειροτερεύει την τιμή της συνάρτησης. Στην περίπτωση αυτή, εξετάζεται αν είναι δυνατή η διαφυγή από το τρέχον τοπικό ακρότατο και ο εντοπισμός μιας νέας περιοχής έλξης. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιείται ένα δεδομένο πλήθος βημάτων επέκτασης (τα τάξης των τριών έως πέντε) σύμφωνα με την (10.5), με τη διαφορά ότι τώρα η αναζήτηση γίνεται προς την κατεύθυνση μεγιστοποίησης της συνάρτησης. Η διαφορά των τιμών της συνάρτησης σε δύο διαδοχικά σημεία αποτελεί μέτρο της κλίσης της. Εφόσον η κλίση γίνει αρνητική, γεγονός που υποδηλώνει ότι το νέο σημείο υπερπηδά την περιοχή έλξης όπου έχει εγκλωβιστεί το άπλοκο, το σημείο που προκύπτει αντικαθιστά το \mathbf{r} . Η παραπάνω στρατηγική, η οποία βασίζεται σε μια ελαφρά τροποποίηση του σχήματος ανόπτησης-απλόκου που προτείνουν οι Pan and Wu (1998), επιτρέπει στο άπλοκο να ξεφεύγει από τα ήδη εντοπισμένα τοπικά ακρότατα και να διερευνά περιοχές γειτονικών ακροτάτων, μέσω μιας διαδικασίας αναρρίχησης.

Εφόσον η αναρρίχηση είναι επιτυχής, δηλαδή έχει εντοπιστεί μια λύση καλύτερη από το σημείο ανάκλασης, τότε το τελευταίο αντικαθίσταται στον πληθυσμό και η υπολογιστική διαδικασία μεταβαίνει στο βήμα 9, διαφορετικά μεταβαίνει στο βήμα 8, γεννώντας ένα τυχαίο σημείο μέσω μετάλλαξης.

Βήμα 8: Ο τελεστής μετάλλαξης, ο οποίος ενεργοποιείται όταν με κανέναν από τους προηγούμενους μηχανισμούς δεν έχει καταστεί δυνατός ο εντοπισμός μιας βελτιωμένης λύσης σε σχέση με την w , βασίζεται στη γέννηση ενός τυχαίου σημείου εκτός του εύρους μιας τυπικής απόκλισης γύρω από τη μέση τιμή του τρέχοντος δείγματος, δηλαδή εκτός του διαστήματος $[\mu_x - \sigma_x, \mu_x + \sigma_x]$. Η παραγωγή των συντεταγμένων γίνεται ως εξής:

$$x_i = \mu_i \pm (\sigma_i + u d_i) \quad (10.8)$$

όπου μ_i η μέση τιμή του πληθυσμού για τη συντεταγμένη i , σ_i η αντίστοιχη τυπική απόκλιση, u τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή $[0, 1]$ και d_i η απόσταση που υπολείπεται μέχρι τα όρια του εφικτού χώρου (για $u = 1$, η συντεταγμένη γεννάται ακριβώς πάνω στο όριο). Το πρόσημο $+$ ή $-$ επιλέγεται τυχαία, με ίση πιθανότητα. Αν είναι θετικό, τότε η συντεταγμένη γεννάται από μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[\mu_i + \sigma_i, x_i^{\max}]$, διαφορετικά γεννάται στο διάστημα $[x_i^{\min}, \mu_i - \sigma_i]$. Η μετάλλαξη αποσκοπεί στη γέννηση απομακρυσμένων, σε σχέση με το μέσο όρο του πληθυσμού, σημείων, και συνεπώς εξασφαλίζει μεγαλύτερη διασπορά λύσεων, η οποία είναι επιθυμητή για την αποτελεσματικότερη διερεύνηση του εφικτού χώρου.

Ο απόγονος που παράγεται μέσω μετάλλαξης γίνεται εκ κατασκευής αποδεκτός εφόσον υπερτερεί ως προς το σημείο ανάκλασης r_0 , διαφορετικά γίνεται αποδεκτός με πιθανότητα p_m .

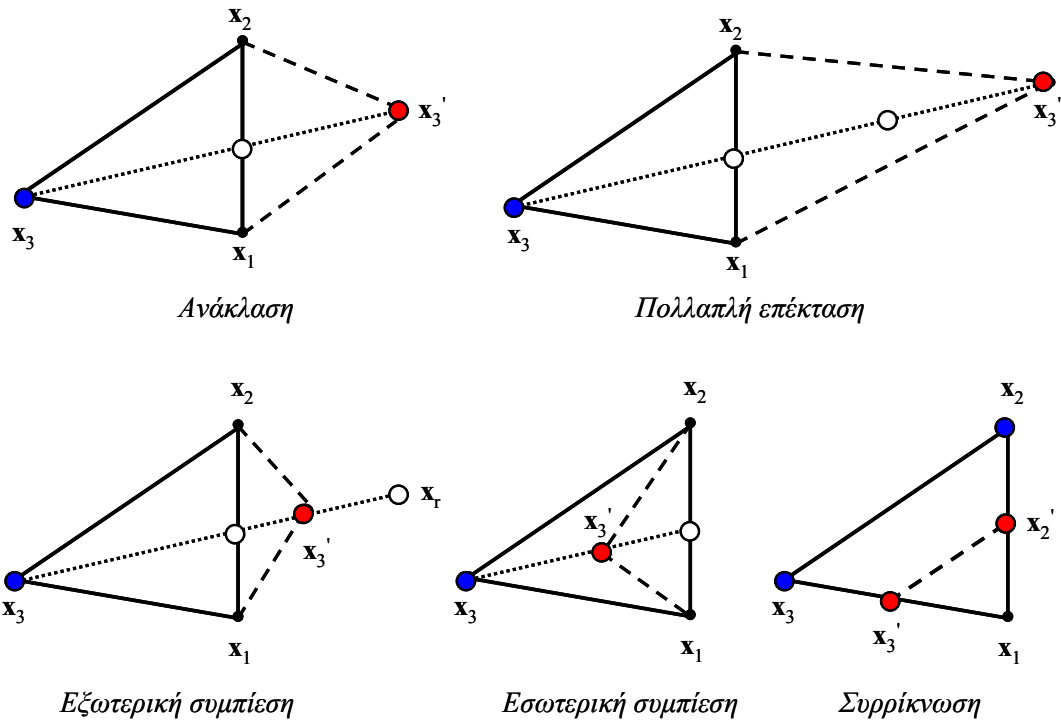
Βήμα 9: Εντοπίζεται η καλύτερη, f_{\min} , και χειρότερη, f_{\max} , τιμή της συνάρτησης στον πληθυσμό, και ελέγχεται αν η τρέχουσα θερμοκρασία ξεπερνά την τιμή $\beta (f_{\max} - f_{\min})$, όπου $\beta \geq 1$ παράμετρος του χρονοδιαγράμματος ανόπτησης. Με τον τρόπο αυτό, η θερμοκρασία εμποδίζεται να λάβει υπερβολικά υψηλές τιμές, κάτι που θα επιβράδυνε σημαντικά τον αλγόριθμο, αφού η διαδικασία αναζήτησης θα γινόταν υπερβολικά τυχαία.

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 μεταβλητές εισόδου του αλγορίθμου. Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, το δεύτερο κριτήριο είναι αυτό που οδηγεί στον τερματισμό της διαδικασίας, καθώς η πολυπλοκότητα του προβλήματος και ο μεγάλος αριθμός των παραμέτρων δεν επιτρέπουν την επίτευξη σύγκλισης, παρά μόνο μετά από εξαιρετικά μεγάλο αριθμό δοκιμών.

Οι μετασχηματισμοί του απλόκου, που περιγράφηκαν προηγουμένως, απεικονίζονται στο γραφικό παράδειγμα του Σχήματος 10.2.



Σχήμα 10.2: 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.

10.3.3 Ο πολυκριτηριακός εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου

Η θεμελιώδης έννοια της κυριαρχίας στα προβλήματα βελτιστοποίησης διανυσματικών στοχικών συναρτήσεων διαφοροποιεί σε σημαντικό βαθμό τη γενική στρατηγική των εξελικτικών αλγορίθμων, σε σχέση με τις μεθόδους αναζήτησης του ολικού ακροτάτου βαθμωτών συναρτήσεων. Πράγματι, αντί να επιδιώκεται 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.

Ο πολυκριτηριακός εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου (Efstratiadis and Koutsoyiannis 2008· Ευστρατιάδης, 2008) 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 χρήσης 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 κατανεμημένες λύσεις του προβλήματος, που είναι ταυτόχρονα Pareto βέλτιστες και αποδεκτές, από την πλευρά του χρήστη.

11 Κατευθυντήριες αρχές εφαρμογής του μοντέλου

Παρουσιάζεται ένα πλαίσιο γενικών αρχών, που βοηθούν τον χρήστη στη σχηματοποίηση και παραμετροποίηση των διεργασιών, τον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών και, στη συνέχεια, τη βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ. Το πλαίσιο αυτό εγγυάται την διατήρηση του επιθυμητού επιπέδου χωρικής λεπτομέρειας, που ταυτόχρονα εξασφαλίζει ικανοποιητική προγνωστική ικανότητα του μοντέλου ως προς πολλαπλά κριτήρια προσαρμογής, καθώς και συνέπεια όσον αφορά στη φυσική ερμηνεία των παραμέτρων και την αναπαράσταση των διεργασιών που δεν ελέγχονται από μετρήσεις. Επιπλέον, εξηγείται η χρήση των εργαλείων πολυκριτηριακής ανάλυσης για την εμβάθυνση σε ειδικές πτυχές του μοντέλου και την ανίχνευση αβεβαιοτήτων και σφαλμάτων.

11.1 Σχηματοποίηση και παραμετροποίηση επιφανειακού συστήματος

Στο υδρολογικό μοντέλο γίνεται σαφής διαχωρισμός μεταξύ των επιπέδων σχηματοποίησης και παραμετροποίησης, καθώς η πρώτη αναφέρεται στη διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου και των υπολεκανών, ενώ η δεύτερη στη διαμόρφωση των μονάδων υδρολογικής απόκρισης.

Η σχηματοποίηση καθορίζεται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- τη χωρική ετερογένεια των βροχοπτώσεων και, δευτερευόντως, της εξατμοδιαπνοής·
- τις πρακτικές ανάγκες της μελέτης (σε ποιες, δηλαδή, θέσεις επιδιώκεται η αναπαράσταση των διεργασιών και σε ποιες θέσεις υπάρχουν μετρήσεις, για τη βαθμονόμηση 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 δίαυτα 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 πολλαπλές 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 10.2, 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, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 2.4.

Στη βάση των παραπάνω, η 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 στείρευσης 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 που παρέχεται 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.

11.2 Χάραξη κυττάρων υδροφορέα και ομαδοποίηση παραμέτρων

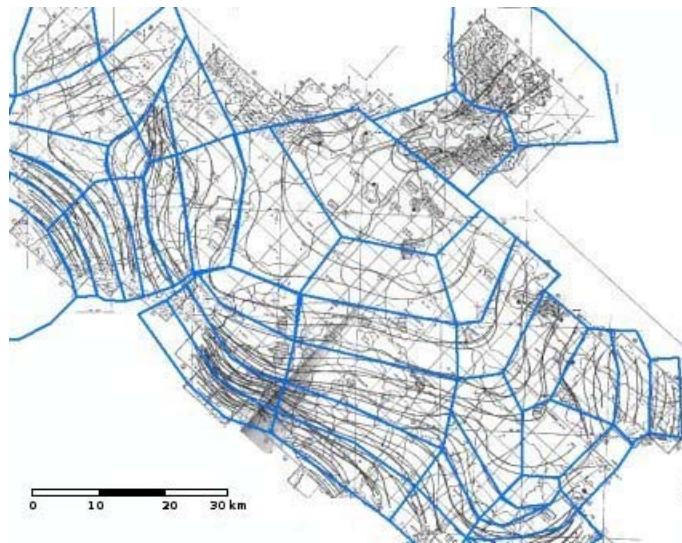
Ανάλογα με τη διακριτοποίηση που επιλέγεται, το μοντέλο υπόγειας υδρολογίας χαρακτηρίζεται είτε ως εννοιολογικό είτε ως φυσικής βάσης. Γενικά, σε υδροφορείς υψηλής αβεβαιότητας στο μοντέλο υιοθετείται μια εννοιολογική προσέγγιση, ενώ σε εφαρμογές με επάρκεια υδρογεωλογικών δεδομένων το μοντέλο μπορεί να έχει πληρέστερο φυσικό υπόβαθρο.

Γενικά, η χάραξη των κυττάρων και η ομαδοποίηση των παραμέτρων τους (υδραυλική αγωγιμότητα, πορώδες) μπορεί να γίνει λαμβάνοντας υπόψη τα ακόλουθα κριτήρια (βλ. και Κοψιάτση, 2009):

- *Γεωμετρία υδροφορέα*: Μια πολύ αδρομερής διακριτοποίηση μπορεί να βασιστεί σε στοιχειώδεις γνώσεις των συνόρων του υδροφορέα. Σε αυτή την περίπτωση προκύπτει ένα εννοιολογικό μοντέλο με πολύ μικρό αριθμό κυττάρων, το οποίο ωστόσο λαμβάνει υπόψη του τη διαθέσιμη πληροφορία για τη γεωμετρία του υδροφορέα.
- *Ιδιότητες υδροφορέα*: Με αυτή τη διακριτοποίηση προκύπτει ένα εννοιολογικό μοντέλο, στο οποίο ο αριθμός των κυττάρων ισούται με τον αριθμό των ομογενών (ή των κατά προσέγγιση ομογενών)

περιοχών του υδροφορέα. Οι ιδιότητες αυτές μπορεί να είναι υδραυλικές (π.χ. υδραυλική αγωγιμότητα, όπως στο Σχήμα 4.3) ή/και γεωγραφικές (π.χ. υψόμετρο βάσης υδροφορέα).

- *Υδραυλικές συνθήκες υδροφορέα:* Εφόσον υπάρχει επαρκής πληροφορία για τις συνθήκες ροής στον υδροφορέα, η διακριτοποίηση μπορεί να γίνει βάσει των γραμμών ροής, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του Σχήματος 11.1. Στην περίπτωση αυτή, το μοντέλο που προκύπτει είναι φυσικής βάσης και οι παράμετροί του μπορούν να βαθμονομηθούν ως προς δείγματα πιεζομετρικών παρατηρήσεων (χρονοσειρές στάθμης), εφόσον αυτές κρίνονται αντιπροσωπευτικές της μέσης κατάστασης του τμήματος του υδροφορέα που αναπαριστά το εκάστοτε κύτταρο.



Σχήμα 11.1: Διακριτοποίηση υδροφορέα Δυτικής Θεσσαλίας. Διακρίνονται οι ισοδυναμικές γραμμές και η χάραξη των κυττάρων σύμφωνα με αυτές (Τέγος, 2005).

11.3 Αρχικές συνθήκες

Οι αρχικές συνθήκες του μοντέλου αφορούν στις στάθμες των δεξαμενών εδαφικής υγρασίας και τις στάθμες των δεξαμενών υπόγειου νερού στην αρχή της προσομοίωσης.

Στις τυπικές ελληνικές (γενικά Μεσογειακές) συνθήκες, εφόσον η προσομοίωση ξεκινά στην αρχή του υδρολογικού έτους, η εδαφική υγρασία που έχει παραμείνει στο έδαφος είναι πρακτικά μηδενική, καθώς έχει στο σύνολό της καταναλωθεί για εξατμοδιαπνοή στη διάρκεια του καλοκαιριού (εκτός και αν έχουν μεσολαβήσει έντονες βροχοπτώσεις τις προηγούμενες ημέρες). Συνεπώς, για όλες τις δεξαμενές που αναπαριστούν την αναρρύθμιση της εδαφικής υγρασίας, ήτοι για κάθε συνδυασμό υπολεκάνης-ΜΥΑ, το αρχικό ύψος νερού μπορεί να υποτεθεί μηδενικό. Αν η προσομοίωση ξεκινά σε ενδιάμεση εποχή του υδρολογικού έτους, τότε προτείνεται στο χρήστη να εκτελέσει την προσομοίωση με μηδενικές τιμές, και να λάβει ως εκτίμηση της αρχικής υγρασίας του μέσο ύψος νερού της εν λόγω περιόδου (στο οποίο δεν θα λάβει υπόψη το πρώτο υδρολογικό έτος). Σε κάθε περίπτωση, η αρχική

αυτή συνθήκη έχει ελάσσονα σημασία, εκτός και αν έχει παρατηρηθεί ένα έντονο φαινόμενο στα πρώτα βήματα της προσομοίωσης, το οποίο πρέπει να αναπαραχθεί από το μοντέλο.

Αντίθετα, ο καθορισμός της στάθμης εκκίνησης των υπόγειων δεξαμενών είναι κομβικής σημασίας, καθώς προϋποθέτει αρκετή εμπειρία και τη διεξαγωγή αρκετών δοκιμών. Εφόσον η διακριτοποίηση του μοντέλου υπόγειας υδρολογίας του προσδίδει εννοιολογικό χαρακτήρα, τότε οι αρχικές συνθήκες πρέπει να είναι συμβατές με τη σύλληψη του μοντέλου, δηλαδή να αποδίδουν σωστά την κατεύθυνση κίνησης του νερού, την εκφόρτιση στις πηγές (η στάθμη των οποίων θεωρείται ότι ταυτίζεται με το μέσο υψόμετρο ανάπτυξής τους) και τις τυχόν διαφυγές. Αν η διακριτοποίηση προσδίδει χαρακτήρα φυσικής βάσης, τότε οι αρχικές συνθήκες πρέπει να αποδίδουν τις μέσες υδρογεωλογικές συνθήκες του υδροφορέα, όπως αυτές αποτυπώνονται στη διαθέσιμη πιεζομετρική πληροφορία.

11.4 Καθορισμός ορίων παραμέτρων

Η αναζήτηση ακροτάτων σε μη γραμμικούς χώρους γίνεται σημαντικά πιο δυσχερής όσο αυξάνει η διάσταση του προβλήματος, δηλαδή το πλήθος των μεταβλητών ελέγχου. Για τον λόγο αυτό, στις δύο εξελικτικές τεχνικές βελτιστοποίησης τίθενται όρια αναζήτησης των μεταβλητών, που εκφράζουν μια *εκ των προτέρων* γνώση (ή, πιο ρεαλιστικά, υποψία) σχετικά με την περιοχή στην οποία κείται η μεμονωμένη ολικά βέλτιστη λύση ή το σύνολο των Pareto βέλτιστων λύσεων, εφόσον αναφερόμαστε σε πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Μέσα στα όρια αυτά γίνεται τόσο η γέννηση του αρχικού πληθυσμού, όσο και η παραγωγή των απογόνων. Αν από την εφαρμογή κάποιου γενετικού τελεστή προκύψει ένα σημείο εκτός του εφικτού χώρου, τότε το σημείο αυτό είτε δεν γίνεται αποδεκτό είτε μετατοπίζεται, αναγκαστικά, στο εν λόγω όριο.

Η διαδικασία αυτή εισάγει μια επιπλέον δυσκολία στη βελτιστοποίηση, αφού απαγορεύει την κίνηση προς υποσχόμενες περιοχές του \mathcal{R}^n , οι οποίες βρίσκονται εκτός των ορίων που έχει θέσει αυθαίρετα ο χρήστης. Πράγματι, ενώ ο χρήστης μπορεί να θέσει εύλογα όρια για κάθε μεμονωμένη μεταβλητή, είναι εξαιρετικά δύσκολο να υποψιαστεί ένα εύλογο εύρος ορίων όταν οι μεταβλητές αλληλεπιδρούν. Σε μια τέτοια περίπτωση, λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας της επιφάνειας απόκρισης, ενδέχεται να προκύψουν περιοχές έλξης ακροτάτων εκτός των εν λόγω ορίων. Από την άλλη πλευρά, η θέσπιση εξαιρετικά χαλαρών ορίων, δηλαδή ενός πολύ μεγάλου εύρους αναζήτησης, έχει ως συνέπεια τη σημαντική επιβράδυνση της διαδικασίας σύγκλισης, αφού ο χώρος που πρέπει να διερευνηθεί είναι πολύ μεγαλύτερος. Με βάση το σκεπτικό αυτό, προκύπτουν δύο αντικρουόμενες απαιτήσεις, αφού για λόγους «ασφαλείας» είναι επιθυμητή η θέσπιση ενός μεγάλου πεδίου ορισμού των τιμών των μεταβλητών, ενώ για λόγους ταχύτητας είναι επιθυμητό το ακριβώς αντίθετο.

Τα δύο αυτά αντίρροπα κριτήρια επιχειρεί να συμβιβάσει το σχήμα αναζήτησης που υλοποιούν οι δύο αλγόριθμοι (με κοινή εφαρμογή για μονοκριτηριακά και πολυκριτηριακά προβλήματα), εισάγοντας την έννοια του «διπλού» πεδίου ορισμού, με εσωτερικά και εξωτερικά όρια. Τα εσωτερικά όρια

εκφράζουν την εκ των προτέρων προσέγγιση σχετικά με την υποσχόμενη περιοχή του \mathcal{R}^n , όπου είναι πιο πιθανός ο εντοπισμός της πλέον πρόσφορης λύσης (ή συνόλου λύσεων), ενώ τα εξωτερικά όρια εκφράζουν μια πιο χαλαρή-συντηρητική εκτίμηση. Μάλιστα, σε πραγματικά προβλήματα, στα οποία οι μεταβλητές ελέγχου εκφράζουν φυσικά μεγέθη με γνωστά ανώτατα ή κατώτατα όρια, το εξωτερικό πεδίο μπορεί να θεωρηθεί ότι ταυτίζεται με τα εν λόγω φυσικά όρια των μεταβλητών. Συνεπώς, ενώ ο αρχικός πληθυσμός (αλλά και κάθε σημείο που παράγεται μέσω της πλήρως τυχαίας μετάλλαξης) γεννιάται εντός του εσωτερικού πεδίου, όπου και επικεντρώνεται το ενδιαφέρον της αναζήτησης, δεν αποκλείεται η «διεύρυνση» του χώρου-στόχου της εξελικτικής διαδικασίας πέρα από τα όρια του εσωτερικού πεδίου, εφόσον εντοπιστεί μια πορεία βελτίωσης της επίδοσης του πληθυσμού.

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 στείρευσης) 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 στείρευσης της κατείδυσης (π.χ. της τάξης του 40-60%) σε σχέση με μια μονάδα που αναπτύσσεται πάνω από αδιαπερατούς 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.

11.5 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 εξελιγμένα εργαλεία βελτιστοποίησης, δεν είναι λογικό να αναμένει κανείς ότι αρκεί μία μεμονωμένη αναζήτηση, έστω και με την εκτέλεση 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 πιο 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 απορροής (εκροές 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 οι τιμές των παραμέτρων 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.

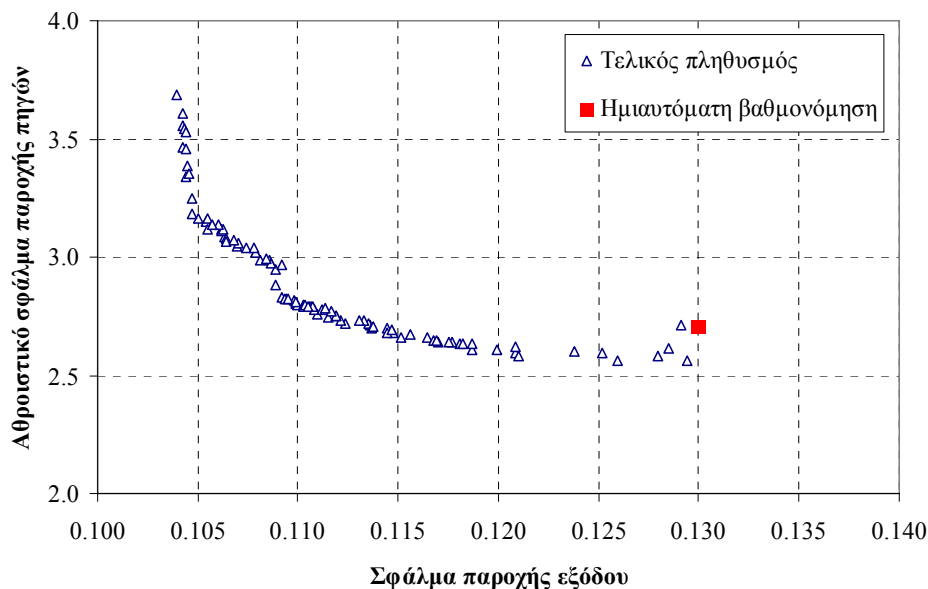
Αναμφίβολα, η παραπάνω στρατηγική απαιτεί σημαντικό φόρτο εργασίας και προϋποθέτει την πολύπλευρη αξιοποίηση της κρίσης και εμπειρίας του μηχανικού.

11.6 Πολυκριτηριακή ανάλυση

Η πολυκριτηριακή ανάλυση σε προβλήματα εκτίμησης των παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων έχει βρει πρόσφορο έδαφος τα τελευταία χρόνια, χωρίς ωστόσο να έχει αποσαφηνιστεί η πρακτική της χρησιμότητα (Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2009, 2010). Γενικά, η θεώρηση πολλαπλών κριτηρίων κατά τη βαθμονόμηση είναι αναγκαία ώστε να «εξηγήσει» τον μεγάλο αριθμό παραμέτρων που αναγκαστικά χρησιμοποιούνται για την περιγραφή πολύπλοκων συστημάτων με έντονη ετερογένεια, και επιπλέον εξασφαλίζει καλύτερη εποπτεία του προβλήματος, καθώς επιτρέπει τον ταυτόχρονο έλεγχο διαφορετικών αποκρίσεων ενός μοντέλου ή και διαφορετικών πτυχών κάθε απόκρισης. Η εν λόγω στρατηγική προσομοιάζει στην παραδοσιακή χειροκίνητη βαθμονόμηση, στα πλαίσια της οποίας ένας έμπειρος υδρολόγος εξετάζει όλο το φάσμα των αποτελεσμάτων του μοντέλου (μεταβλητές εξόδου, μεταβλητές κατάστασης, υδατικά ισοζύγια), σε συνδυασμό με τη φυσική ερμηνεία των παραμέτρων, προκειμένου να αξιολογήσει την καταλληλότητα μιας λύσης.

Η χρήση του πολυκριτηριακού εξελικτικού αλγορίθμου για την παραγωγή πολλαπλών μη κατωτέρων λύσεων παρέχει περαιτέρω προοπτικές, καθώς συμβάλλουν στην αποσαφήνιση ειδικών πτυχών του προβλήματος. Για παράδειγμα, με την κατασκευή των μετώπων Pareto οπτικοποιείται η σχέση ανταγωνιστικότητας μεταξύ των κριτηρίων και μπορούν να ανιχνευτούν τυχόν σφάλματα, που οφείλονται είτε σε δομική ακαταλληλότητα του μοντέλου (ανεπαρκής ή λανθασμένη περιγραφή των διεργασιών) είτε σε εγγενή σφάλματα δεδομένων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν μέτωπα με γεωμετρικές ιδιαιτερότητες, όπως τύπου «ορθής γωνίας» ή «μπαστουνιού». Το πρώτο υποδηλώνει κριτήρια με πολύ έντονη ανταγωνιστικότητα, ενώ το δεύτερο υποδηλώνει μεγάλη διαφορά στο εύρος διακύμανσης των τιμών των κριτηρίων, όπως στο παράδειγμα του Σχήματος 11.2, όπου η διασπορά του σφάλματος αναπαραγωγής της παροχής των πηγών είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της διασποράς του σφάλματος που αφορά στην απορροή της λεκάνης. Επιπλέον, με την εισαγωγή περιορισμών εφικτότητας των κριτηρίων, η αναζήτηση μπορεί να εστιαστεί στις πλέον πρόσφορες περιοχές του μετώπου Pareto, διευκολύνοντας τον εντοπισμό καλά συμβιβαστικών λύσεων. Η τελική επιλογή μεταξύ των μαθηματικά ισοδύναμων λύσεων Pareto μπορεί να γίνει ελέγχοντας την προγνωστική τους ικανότητα κατά την περίοδο επαλήθευσης. Έχει διαπιστωθεί εμπειρικά ότι από την πληθώρα των εν λόγω λύσεων, πολύ μικρό δείγμα αναμένεται να παρουσιάζει ικανοποιητική επίδοση σε ανεξάρτητες χρονικές περιόδους (Ευστρατιάδης 2008· Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2009).

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που μπορεί να διερευνηθεί μέσω των πολυκριτηριακών προσεγγίσεων είναι η αβεβαιότητα τόσο των παραμέτρων όσο και των κριτηρίων. Πράγματι, για κάθε παράμετρο ή κριτήριο εντοπίζεται ένα δείγμα βέλτιστων Pareto τιμών, από τη στατιστική ανάλυση του οποίου προκύπτουν σημαντικές πληροφορίες. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να αξιοποιηθούν προκειμένου να εντοπιστούν τα κατάλληλα όρια διακύμανσης των παραμέτρων, διευκολύνοντας έτσι δραστικά τη διαδικασία αναζήτησης της συμβιβαστικής λύσης. Ειδικότερα, με τη θέσπιση ορίων εφικτότητας των κριτηρίων, είναι δυνατό να εντοπιστούν οι πλέον υποσχόμενες περιοχές, που εξασφαλίζουν αποδεκτή επίδοση για το σύνολο των κριτηρίων. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η παγίδευση της βέλτιστης λύσης με εξαιρετικά μικρό, σε σχέση με μια τυπική διαδικασία ολικής βελτιστοποίησης, υπολογιστικό φόρτο. Ωστόσο, αυτό πρέπει να γίνεται με προσοχή, δεδομένου ότι ακόμα και οι πλέον εξελιγμένοι πολυκριτηριακοί αλγόριθμοι δεν εγγυώνται τον εντοπισμό ενός πλήρους αντιπροσωπευτικού δείγματος βέλτιστων Pareto λύσεων. Επιπλέον, σε προβλήματα με σχετικά μεγάλο αριθμό κριτηρίων, η έννοια της κυριαρχίας οδηγεί στην αποδοχή εξαιρετικά μεγάλου ποσοστού λύσεων ως βέλτιστων Pareto, παρέχοντας έτσι ιδιαίτερα επισφαλή συμπεράσματα. Για το λόγο αυτό, κατά την εκτίμηση των παραμέτρων, ο πολυκριτηριακός αλγόριθμος θα πρέπει να χρησιμοποιείται κυρίως επικουρικά (σε συνδυασμό με την υβριδική στρατηγική που εξηγείται στο υποκεφάλαιο 11.5) και όχι αποκλειστικά.



Σχήμα 11.2: Απεικόνιση του πεδίου τιμών των κριτηρίων (μέτωπο Pareto) στο πρόβλημα βελτιστοποίησης του τυπικού σφάλματος αναπαραγωγής της μέσης μηνιαίας παροχής στην έξοδο της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού και του συνολικού σφάλματος αναπαραγωγής των παροχών των έξι κύριων καρστικών πηγών της. Στο διάγραμμα φαίνεται και η θέση της ολικά βέλτιστης λύσης που έχει εντοπιστεί με τη θεώρηση σταθμισμένων κριτηρίων (Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2009).

Αναφορές

- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Γ. Καραβοκυρός, Ν. Μαμάσης, και Μ. Σαλαχώρης, Ανάλυση απαιτήσεων εφαρμογών, *Ανάπτυξη νέας βάσης δεδομένων για τη διαχείριση και λειτουργία της Εθνικής Τράπεζας Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας (ΕΤΥΜΠ) – Γ' Φάση σε περιβάλλον ΣΓΠ (GIS) και δημοσιοποίηση του έργου της ΕΤΥΜΠ*, Τεύχος 6, Κ/Ξ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΣΚΟΠΙΟΥ, Ιούλιος 2009.
- Ευστρατιάδης, Α., Σ. Μπακή, Ε. Ρόζος, Α. Κουκουβίνος, Αναλυτική περιγραφή μοντέλων, *Ανάπτυξη νέας βάσης δεδομένων για τη διαχείριση και λειτουργία της Εθνικής Τράπεζας Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας (ΕΤΥΜΠ) – Γ' Φάση σε περιβάλλον ΣΓΠ (GIS) και δημοσιοποίηση του έργου της ΕΤΥΜΠ*, Τεύχος 13, Κ/Ξ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΣΚΟΠΙΟΥ, Νοέμβριος 2009.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Ε. Ρόζος, Α. Τέγος, και Ι. Ναλμπάντης, Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης υδρολογικών-υδρογεωλογικών διεργασιών λεκάνης απορροής «Υδρόγειος», *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: NAMA Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε., Τεύχος 4α, 103 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2006.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Τέγος, Γ. Καραβοκυρός, Ι. Κυριαζοπούλου, και Ι. Βαζίμας, Σχέδιο διαχείρισης των υδατικών πόρων περιοχής Καρδίτσας, *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: NAMA Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε., Τεύχος 16, 132 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2006.
- Ευστρατιάδης, Α., Γ. Καραβοκυρός, και Δ. Κουτσογιάννης, Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδατικών συστημάτων «ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ», *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: NAMA Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε., Τεύχος 9, 91 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2007.
- 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., *Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων*, Διδακτορική διατριβή, 391 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Φεβρουάριος 2008.
- Καραβοκυρός, Γ., Α. Ευστρατιάδης, και Δ. Κουτσογιάννης, Υδρονομείας (έκδοση 3.2) - Σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 24, 142 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2004.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Κουτσογιάννης, Δ., Ν. Μαμάσης, Α. Κουκουβίνος, και Α. Ευστρατιάδης, Τελική έκθεση, *Διερεύνηση σεναρίων διαχείρισης του ταμιευτήρα Σμοκόβου*, Ανάδοχος: Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τεύχος 4, 66 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2008.
- Κουτσογιάννης, Δ., *Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης*, Έκδοση 3.1, 202 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Κοψιάτη, Μ., *Διερεύνηση στρατηγικών παραμετροποίησης υδρογεωλογικού υπομοντέλου του λογισμικού Υδρόγειος - Εφαρμογή στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού*, Μεταπτυχιακή εργασία, 133 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2009.
- Μαμάσης, Ν., Α. Κουκουβίνος, και Α. Ευστρατιάδης, Υδρολογική μελέτη, *Μελέτες Διερεύνησης Προβλημάτων Άρδευσης και Δυνατότητας Κατασκευής Ταμιευτήρων Νομού Βοιωτίας*, Εργοδότης: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Ανάδοχος: Γραφείο Μελετών ΕΤΜΕ - Αντωνίου - Πέππας και Συνεργάτες, Αθήνα, 2006.
- 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.
- Ναλμπάντης, Ι., και Ε. Ρόζος, Σύστημα προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Β. Κηφισού, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 10, 72 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2000.
- Ρόζος, Ε., *Μοντέλα προσομοίωσης υδροφορέων υψηλής αβεβαιότητας*, Διδακτορική διατριβή, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009 (υποβληθείσα για τελική κρίση).
- 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.
- Alley, W. M., On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting and aquifer recharge in monthly water balance models, *Water Resources Research*, 20, 1137-1149, 1984.
- Andréassian, V., C. Perrin, L. Berthet, N. Le Moine, J. Lerat, C. Loumagne, L. Oudin, T. Mathevet, M.-H. Ramos, and A. Valéry, HESS Opinions “Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models”, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6(3), 3669-3685, 2009.
- Bear, J., *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, New York, 1979.
- Bergstrom, S., Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian countries, *SMHI Rep. No. 7*, Norrköping, Sweden, 1976.

- Bergstrom, S., The HBV model—its structure and applications, SMHI Rep. RH, No. 4, Norrkoping, Sweden, 1992.
- Bergstrom, S., The HBV model, *Computer Models of Watershed Hydrology*, V. P. Singh (editor), Chapter 13, Water Resources Publications, Littleton, Colo., 1995.
- Beven, K. J., and A. M. Binley, The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, *Hydrological Processes*, 6, 279-298, 1992.
- Beven, K. J., and J. Freer, Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology, *Journal of Hydrology*, 249, 11-29, 2001.
- Beven, K. J., and M. J. Kirby, Toward a simple physically-based variable contributing area of catchment hydrology, *Working Paper No. 154*, School of Geography, Univ. Leeds, U.K., 1976.
- Beven, K. J., and M. J. Kirby, A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Science Bulletin*, 24(1), 43-69, 1979.
- Beven, K. J., Changing ideas in hydrology – The case of physically-based models, *Journal of Hydrology*, 105, 157-172, 1989.
- Beven, K. J., *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*, Wiley, 2001.
- Beven, K. J., TOPMODEL, *Computer Models of Watershed Hydrology*, V. P. Singh (editor), Chapter 18, Water Resources Publications, Littleton, Colo., 1995.
- Boughton, W. C., and D. G. Carroll, A simple combined water balance/flood hydrograph model, *Proceedings of the 1993 Hydrology Water Resources Symposium*, 93/14 Institution of Engineers, Australia, National Conference Publication, 299-304, 1993.
- Boughton, W. C., A simple model for estimating the water yield of ungauged catchments, *Civil Eng. Trans.*, I. E. Aust. CE26, 2, 83-88, 1984.
- Boyle, D. P., 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.
- Boyle, D. P., H. V. Gupta, S. Sorooshian, V. Koren, Z. Zhang, and M. Smith, Toward improved streamflow forecasts: Value of semidistributed modeling, *Water Resources Research*, 37(11), 2749–2760, 2001.
- Brath, A., A. Montanari, and E. Toth, Neural networks and non-parametric methods for improving real-time flood forecasting through conceptual hydrological models, *Hydrology and Earth System Sciences*, 6, 627-639, 2002.

- Brutsaert, W., *Evaporation into the Atmosphere*, Reidel, Dordrecht, 1982.
- Brutsaert, W., *Hydrology: An Introduction*, 605 pages, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2005.
- 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.
- Cheng, C.-T., C. P. Ou, and K. W. Chau, Combining a fuzzy optimal model with a genetic algorithm to solve multi-objective rainfall-runoff model calibration, *Journal of Hydrology*, 268, 72-86, 2002.
- Cheng, C.-T., X. Y. Wu, and K. W. Chau, Multiple criteria rainfall-runoff model calibration using a parallel genetic algorithm in a cluster of computers, *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), 1069-1087, 2005.
- Chvátal, V., *Linear Programming*, W. H. Freeman and Company, 1983.
- Crawford, N. H., and R. K. Linsley, The synthesis of continuous streamflow hydrographs on a digital computer, *Technical Report No. 12*, Dept. of Civil Engineering, Stanford Univ., Palo Alto, Calif., 1962.
- Crawford, N. H., and R. K. Linsley, Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV, *Technical Report No. 39*, Stanford Univ., Palo Alto, Calif., 1966.
- Cunge, J. A., On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method), *Journal of Hydraulic Research*, 7(2), 205-230, 1969.
- Deo, N., *Graph Theory with Applications to Engineering and Computer Science*, Prentice-Hall, 1974.
- Dingman, S. L., *Physical Hydrology*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.
- Diskin, M. H., and E. Simon, A procedure for selection of objective functions for hydrologic simulation models, *Journal of Hydrology*, 34(1/2), 129-149, 1977.
- Efstratiadis, A., A. Mazi, A. D. Koussis, and D. Koutsoyiannis, Flood modelling in complex hydrologic systems with sparsely resolved data, *European Geosciences Union General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11, Vienna, 4157, European Geosciences Union, 2009.
- 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, Fitting hydrological models on multiple responses using the multiobjective evolutionary annealing simplex approach, *Practical hydroinformatics:*

- Computational intelligence and technological developments in water applications*, edited by R.J. Abrahart, L. M. See, and D. P. Solomatine, 259–273, Springer, 2008.
- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, One decade of multiobjective calibration approaches in hydrological modelling: a review, *Hydrological Sciences Journal*, 2010 (in press).
- 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, *European Geosciences Union General Assembly 2005, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, Vienna, 03560, European Geosciences Union, 2005.
- Efstratiadis, A., I. Nalbantis, A. Koukouvinos, E. Rozos, and D. Koutsoyiannis, HYDROGEIOS: A semi-distributed GIS-based hydrological model for modified river basins, *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 989-1006, 2008.
- Engeland, K., C.-Y. Xu, and L. Gottschalk, Assessing uncertainties in a conceptual water balance model using Bayesian methodology, *Hydrological Sciences Journal*, 50(1), 45-63, 2005.
- Feyen, L., M. Kalas, and J. A. Vrugt, Semi-distributed parameter optimization and uncertainty assessment for large-scale streamflow simulation using global optimization, *Hydrological Sciences Journal*, 53(2), 293-308, 2008.
- 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.
- Freer, J., K. J. Beven, and B. Ambrose, Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: an application of the GLUE approach, *Water Resources Research*, 32(7), 2161-2173, 1996.
- Giustolisi, O., and D. Laucelli, Improving generalization of artificial neural networks in rainfall-runoff modelling, *Hydrological Sciences Journal*, 50(3), 439-457, 2005.
- Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- 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.
- Hjelmfelt Jr., A. T., Negative outflows from Muskingum flood routing, *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(6), 1010–1014, 1985.

- Hydrologic Engineering Center (HEC), *HEC-1 flood hydrograph package user's manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, Calif., 1968.
- Hydrologic Engineering Center (HEC), *HEC-1 flood hydrograph package user's manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, Calif., 1981.
- Hydrologic Engineering Center (HEC), *Hydrologic modelling system HEC-HMS user's manual version 2*, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, Calif., 2000.
- Jain, M. K., U. C. Kothyari, 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.
- Knisel, W. G., R. A. Leonard, F. M. Davis, and A. D. Nicks, GLEAMS version 2.10, Part III, user's manual, *Conservation Research Report*, USDA, Washington, D.C., 1993.
- Kolditz, O., Modelling flow and heat transfer in fractured rocks: Conceptual model of a 3-D deterministic fracture network, *Geothermics*, 24(3), 451-470, 1995.
- Koussis, A. D., Assessment and review of the hydraulics of storage flood routing 70 years after the presentation of the Muskingum method, *Hydrological Sciences Journal*, 54(1), 43-61, 2009.
- Kuczera, G., and M. Mroczkowski, Assessment of hydrologic parameter uncertainty and the worth of multiresponse data, *Water Resources Research*, 34(6), 1481-1489, 1998.
- Kunstmann, H., J. Krause, and S. Mayr, Inverse distributed hydrological modelling of Alpine catchments, *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, 395-412, 2006.
- Liong, S.-Y., T. R. Gautam, S.-T Khu, V. Babovic, M. Keijzer, and N. Muttil, Genetic programming: a new paradigm in rainfall runoff modeling, *Journal of the American Water Resources Association*, 38(2), 705-718, 2002.
- 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.
- Makhlouf, Z., and C. Michel, A two-parameter monthly water balance model for French watersheds, *Journal of Hydrology*, 162, 299-318, 1994.
- Martin R. K., *Large scale linear and integer optimization: a unified approach*, Volume 57, Kluwer Academic Publishers, p. 446, 2004.

- Mazi, A., A. D. Koussis, P. J. Restrepo, and D. Koutsoyiannis, A groundwater-based, objective-heuristic parameter optimisation method for a precipitation-runoff model and its application to a semi-arid basin, *Journal of Hydrology*, 290, 243-258, 2004.
- McCarthy, G.-T., *The Unit Hydrograph and Flood Routing*, Conference North Atlantic Division, US Army Corporation of Engineers, 1938.
- McCuen, R. H., Z. Knight, and A. G. Cutter, Evaluation of the Nash-Sutcliffe efficiency index, *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 11(6), 597-602, 2006.
- McDonald, M. G., and A. W. Harbaugh, *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference GroundWater Flow Model*, Washington, 1988.
- Meixner, T., L. A. Bastidas, H. V. Gupta, and R. C. Bales, Multicriteria parameter estimation for models of stream chemical composition, *Water Resources Research*, 38(3), 1027, doi:10.1029/2000WR000112, 2002.
- Michalewicz, Z., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, New York, 1996.
- Moussa, R., and N. Chahinian, Comparison of different multi-objective calibration criteria using a conceptual rainfall-runoff model of flood events, *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 519-535, 2009.
- Mroczkowski, M., G. P. Raper, and G. Kuczera, The quest for more powerful validation of conceptual catchment models, *Water Resources Research*, 33(10), 2325-2335, 1997.
- Muleta, M. K., and J. W. Nicklow, Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model, *Journal of Hydrology*, 306, 127-145, 2005.
- Nalbantis, I., A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis, On the use and misuse of semi-distributed rainfall-runoff models, *XXIV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Perugia*, International Union of Geodesy and Geophysics, International Association of Hydrological Sciences, 2007.
- 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"*, 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.

- Pan, L., and L. Wu, A hybrid global optimization method for inverse estimation of hydraulic parameters: annealing-simplex method, *Water Resources Research*, 34(9), 2261-2269, 1998.
- 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.
- Parajka, J., R. Merz, and G. Blöschl, Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modelling: case study in 320 Austrian catchments, *Hydrological Processes*, 21(4), 435-446, 2007.
- Refsgaard, J. C., and J. Knudsen, Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models, *Water Resources Research*, 32, 2189-2202, 1996.
- 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.
- Schoups, G., C. Lee Addams, and S. M. Gorelick, Multi-objective calibration of a surface water-groundwater flow model in an irrigated agricultural region: Yaqui Valley, Sonora, Mexico, *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 9, 549-568, 2005.
- 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*, ASCE, 7(4), 270-292, 2002.
- Singh, V., and S. M. Bhallamudi, Conjunctive surface-sub-surface modeling of overland flow, *Advances in Water Resources*, 21, 567-579, 1998.
- Sivapalan, M., K. Takeuchi, S. W. Franks, V. K. Gupta, H. Karambiri, V. Lakshmi, X. Liang, J. J. McDonnell, E. M. Mendiondo, P. E. O'Connell, T. Oki, J. W. Pomeroy, D. Schertzer, S. Uhlenbrook, and E. Zehe, IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences, *Hydrological Sciences Journal*, 48(6), 857-880, 2003.
- Smith, D. K., *Network Optimization Practice: A Computational Guide*, John Wiley and Sons, 1982.

- Sorooshian, S., V. K. Gupta, and J. L. Fulton, Evaluation of maximum likelihood parameter estimation techniques for conceptual rainfall-runoff models: Influence of calibration data variability and length on model credibility, *Water Resources Research*, 19(1), 251-259, 1983.
- Srinivasan, R., R. S. Muttiah, P. T. Dyke, C. Walker, and J. Arnold, *Hydrologic unit model for the United States (HUMUS)*, Texas Agricultural Experiment Station, Blackland Research Center, Temple, TX, 2000.
- Tang, Y., P. Reed, P. and J. Kollat, Parallelization strategies for rapid and robust evolutionary multiobjective optimization in water resources applications, *Advances in Water Resources*, 30(3), 335-353, 2007.
- 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, *Geographical Reviews*, 38(1), 55-94, 1948.
- Thornthwaite, C. W., and J. R. Mather, The water balance, *Publications in Climatology*, 8(8), 1-104, Laboratory of Climatology, Climatologic Dresel Institute of Technology, 1955.
- Todini, E., Rainfall runoff modelling: Past, present and future, *Journal of Hydrology*, 100, 341-352, 1988.
- Todini, E., The ARNO rainfall-runoff model, *Journal of Hydrology*, 175, 339-382, 1996.
- USDA, CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems, W. G. Knisel (editor), *Conservation Research Report No. 26*, Washington, D.C., 1980.
- Vrugt, J. A., C. G. H. Diks, H. V. Gupta, W. Bouten, and J. M. Verstraten, Improved treatment of uncertainty in hydrologic modeling: combining the strengths of global optimization and data assimilation, *Water Resources Research*, 41, W01017, 2005.
- Williams, J. R., A. D. Nicks, and J. G. Arnold, Simulator for water resources in rural basins, *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(6), 970-986, 1985.
- 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.
- Yapo, P. O., H. V. Gupta, and S. Sorooshian, Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data, *Journal of Hydrology*, 181, 23-48, 1996.

- Yapo, P. O., H. V. Gupta, and S. Sorooshian, Multi-objective global optimization for hydrologic models, *Journal of Hydrology*, 204, 83–97, 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.
- Zhao, R. J., and X. R. Liu, The Xinanjiang model, *Computer Models of Watershed Hydrology*, V. P. Singh (editor), Chapter 7, Water Resources Publications, Littleton, Colo., 1995.
- Zhao, R. J., Y.-L. Zhuang, L. R. Fang, X. R. Liu, and Q. S. Zhang, The Xinanjiang model, *Proceedings of Oxford Symposium on Hydrological Forecasting*, IAHS Publication No. 129, International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, U.K., 351–356, 1980.
- Zealand, C. M., D. H. Burn, and S. P. Simonovic, Short term streamflow forecasting using artificial neural networks, *Journal of Hydrology*, 214, 32-48, 1999.