



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών -
Μηχανικών Γεωπληροφορικής

Τίτλος Διδακτορικής Διατριβής

**ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΤΟΥ ΓΗΙΝΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ**

Ινώ Δ. Παπαγεωργάκη

Αθήνα, 2023



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών -
Μηχανικών Γεωπληροφορικής

Τίτλος Διδακτορικής Διατριβής

**ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΤΟΥ ΓΗΙΝΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ**

Επιβλέπων: Ιωάννης Ναλμπάντης - Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ινώ Δ. Παπαγεωργάκη

Αθήνα, 2023



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών -
Μηχανικών Γεωπληροφορικής

Τίτλος Διδακτορικής Διατριβής

**ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΤΟΥ ΓΗΙΝΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ**

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

- Ι. Ναλμπάντης, Καθηγητής ΕΜΠ,
- Χ. Ιωαννίδης, Καθηγητής ΕΜΠ
- Γ. Τσακίρης, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

- Ιωάννης Ναλμπάντης, Καθηγητής ΣΑΤΜ-ΜΓ ΕΜΠ,
- Χαράλαμπος Ιωαννίδης, Καθηγητής ΣΑΤΜ-ΜΓ ΕΜΠ,
- Γεώργιος Τσακίρης, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ,
- Αθανάσιος Λουκάς, Καθηγητή ΤΑΤΜ ΑΠΘ
- Νικόλαος Μαμάσης, Καθηγητή ΣΠΜ ΕΜΠ
- Ευάγγελος Μπαλτάς, Καθηγητή ΣΠΜ ΕΜΠ
- Βασίλειος Τσιχριντζής, Καθηγητή ΣΑΤΜ-ΜΓ ΕΜΠ

Ινώ Δ. Παπαγεωργάκη

Αθήνα, 2023

Χέρι Βοηθείας

Δώσαμ' ένα χέρι στο χορτάρι –
κι έγινε σιτάρι
Δώσαμ' ένα χέρι στη φωτιά –
κι έγινε ρουκέτα.

Διστακτικά,
προσεκτικά,
δίνουμ' ένα χέρι
στους ανθρώπους,
μερικούς ανθρώπους.

Miroslav Holub

Μετάφραση: Γιώργος Ζ. Χριστοδουλίδης

Πρόλογος

Όλα αυτά τα χρόνια, συνάντησα ανθρώπους, οι οποίοι στάθηκαν και στέκονται στήριγμα. Συνάντησα κι άλλους.

Ορισμένοι μου πρόσφεραν απλόχερα γνώση και βοήθεια, χώρο και χρόνο, ηρεμία, συγκινήσεις και αγάπη. Τους ευχαριστώ θερμά. Δεν θα ξεχάσω τα βλέμματα όλων και την ζεστασιά που βίωσα. Εύχομαι να κατάφερα και να καταφέρνω πάντα να ανταποδίδω το καλό.

Όλα αυτά τα χρόνια, τους ανθρώπους αυτούς τους συνάντησα σε τόπους.

τον Χρήστο στο πατρικό μας σπίτι,
τον Αποστόλη στη Λαμία,
την Juliette στην Antibes,
τους Ολγούλι και Τζιμάρα στο Μεσολόγγι,
την Μάρα στον Κάλαμο,
την Sylviane στο Λαύριο,
τον κ. Γιώργο στα Εξάρχεια,
την μικρή Ελπίδα και τους μικρούς Γιώργο και Γιάννη στις παιδικές χαρές,
τους Αντώνη και Νίκο στην Ιτιά,
τους Γιάννη και Μάκη στις ραχούλες, στις μισγάγγειες και στα νησιά,
τον Βασίλη στο Εργαστήριο,
την Δέσποινα στην Πολιόχνη,
τους Δασκάλους στο Ε.Μ.Π.,
και βέβαια τον επιβλέποντα Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Ι. Ναλμπάντη και τον Κοσμήτορα της ΣΑΤΜ-ΜΓ Καθηγητή ΕΜΠ κ. Χ. Ιωαννίδη.

ινώ,
ένα ανοιξιάτικο δειλινό του 2023
στη Λήμνο.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	v
Περιεχόμενα	1
Περίληψη	6
Extended Abstract	10
1 Εισαγωγή	45
1.1 Το πρόβλημα της έλλειψης μετρήσεων απορροής	45
1.2 Η συμβολή της Διδακτορικής Διατριβής στην επιστήμη της Υδρολογίας	50
1.3 Πρωτότυπα σημεία	51
1.4 Διάρθρωση της Διδακτορικής Διατριβής	57
2 Υδρολογική ομοιότητα και μη μετρούμενες λεκάνες απορροής	65
2.1 Μη μετρούμενες λεκάνες απορροής	65
2.2 Η δεκαετία PUB (Predictions in Ungauged Basins) – Μια διεθνής πρωτοβουλία	68
2.3 Μηχανισμοί γένεσης της επιφανειακής απορροής	70
2.3.1 Γενικά.....	70
2.3.2 Άμεσα κατακρημνίσματα στην επιφάνεια του υδατορεύματος.....	74
2.3.3 Η επίγεια ροή.....	74
2.3.4 Υποδερμική ροή	76
2.3.5 Υπόγεια ροή	77
2.4 Η έννοια της υδρολογικής ομοιότητας.....	77
2.5 Υδρολογικές υπογραφές της λεκάνης απορροής.....	80
2.5.1 Γενικά.....	80
2.5.2 Ο συντελεστής απορροής	83
2.5.3 Η κλίση της καμπύλης διάρκειας παροχής	83
2.5.4 Ο δείκτης βασικής ροής.....	84
2.5.5 Η αναλογία των ημερών χιονιού.....	85
2.6 Μοντέλα βροχόπτωσης - απορροής.....	86
3 Χαρακτηριστικά ομοιότητας με αξιοποίηση πληροφορίας του γήινου αναγλύφου	89
3.1 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά	89
3.1.1 Το μέγεθος της λεκάνης απορροής	93

3.1.2	Το ανάγλυφο της λεκάνης απορροής.....	93
3.1.3	Το σχήμα της λεκάνης απορροής	95
3.1.4	Πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου λεκάνης.....	96
3.1.5	Ο βαθμός τραχύτητας.....	97
3.1.6	Οι λόγοι του Horton του υδρογραφικού δικτύου	97
3.1.7	Άλλα χρήσιμα μεγέθη του υδρογραφικού δικτύου	98
3.2	Χωρικά καταναμημένα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά	100
3.2.1	Η κλίση του εδάφους.....	100
3.2.2	Ο δείκτης σύγκλισης.....	101
3.2.3	Η καμπυλότητα.....	101
3.2.4	Ο προσανατολισμός της επιφάνειας (Aspect).....	102
3.2.5	Ο δείκτης HAND, Height Above the Nearest Drainage	103
3.2.6	Απόσταση από τον εγγύτερο κλάδο του Υδρογραφικού δικτύου (Hydrological Distance)	105
3.2.7	Ο Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας - Topographic Wetness Index	106
3.3	Πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου.....	106
3.4	Η συμβολή της τοπογραφίας και η χρήση γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών.....	108
4	Εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου από Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους - Η Ανάντη Συμβάλλουσα Έκταση	111
4.1	Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους ως αναγκαίο τοπογραφικό υπόβαθρο.....	115
4.2	Κριτήρια για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου	121
4.2.1	Κριτήρια βασισμένα στα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης	124
4.2.2	Κριτήρια βασισμένα στα υδρολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους.....	127
4.2.3	Υβριδική προσέγγιση με συνδυασμό μορφολογικών και υδρολογικών κριτηρίων.....	130
4.2.4	Σύγχρονες διαδικασίες, όπου τα κριτήρια αντιστοιχούν σε υδρολογικές αποφάσεις.....	131
5	Μεθοδολογικό πλαίσιο υδρολογικής προσομοίωσης	133
5.1	Αλγόριθμοι Ταξινόμησης	135
5.1.1	Ασαφής ταξινόμηση - Αλγόριθμος fuzzy c-means (FCM)	136
5.1.2	Επιβλεπόμενη ταξινόμηση – Αλγόριθμος εγγύτερου γείτονα (k-NN)	138
5.1.3	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα	140
5.2	Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis)	143
5.3	Εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου με χρήση της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης.....	146
5.3.1	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	146
5.3.2	Προταθείσα μέθοδος εκτίμησης της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης (Critical Support Area)	147
5.3.3	Εκτίμηση της σχέσης μεταξύ της ΑΣΕ και των μορφομετρικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής - Ανάλυση Παλινδρόμησης.....	150
5.4	Ανάλυση Παλινδρόμησης.....	152
5.4.1	Κλασική Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση.....	154
5.4.2	Βηματική Παλινδρόμηση (Stepwise Regression)	155

5.5	Αδιαμέριστη Ταξινόμηση λεκανών απορροής.....	156
5.5.1	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	156
5.5.2	Η προτεινόμενη μεθοδολογία για αδιαμέριστη ταξινόμηση	158
5.6	Κατανεμημένη ταξινόμηση γήινου αναγλύφου	165
5.6.1	Γενικά.....	165
5.6.2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	168
5.6.3	Η προτεινόμενη μεθοδολογία	169
5.6.4	Μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής FLEX-Topo	173
5.7	Κατάρτιση Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος με βάση ελλιπή δεδομένα	180
5.7.1	Συνθετικά Μοναδιαία Υδρογραφήματα	180
5.7.2	Η Συνάρτηση Πλάτους.....	187
5.7.3	Η κλασική Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους.....	188
5.7.4	Σταθμισμένη μέσω της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους.....	188
5.7.5	Εκτίμηση κινηματικών παραμέτρων μέσω περιοχοποίησης.....	189
5.7.6	Προταθείσα μεθοδολογία	190
5.8	Εκτίμηση της επίδρασης της ακρίβειας των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους στα όρια των κατακλυζόμενων περιοχών λόγω πλημμύρας	191
5.8.1	Γενικά.....	191
5.8.2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	192
5.8.3	Προταθείσα μεθοδολογία	194
5.8.4	Ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας στο Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας.....	195
5.8.5	Ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας στην κατακλυζόμενη ζώνης λόγω πλημμύρας.....	196
6	Αδιαμέριστη ταξινόμηση λεκανών απορροής	199
6.1	Γενικά.....	199
6.2	Ταξινόμηση λεκανών απορροής στον Ελλαδικό χώρο	200
6.3	Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά ως κριτήρια της αδιαμέριστης ταξινόμησης.....	201
6.4	Περιοχή μελέτης.....	203
6.5	Δεδομένα	207
6.5.1	Γενικά.....	207
6.5.2	Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους ASTER	207
6.5.3	Υδρομετεωρολογικά δεδομένα.....	208
6.6	Αποτελέσματα	209
6.7	Σύνοψη	217
7	Εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου – Ανάντη Συμβάλλουσα Έκταση	220
7.1	Γενικά.....	220
7.2	Εκτίμηση της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης	220
7.3	Περιοχή Μελέτης.....	222
7.4	Δεδομένα	225

7.4.1	Χάρτες κλίμακας 1:50000	226
7.4.2	Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους SRTM	226
7.5	Σύνοψη μεθοδολογικού πλαισίου	228
7.6	Αποτελέσματα	229
7.7	Σύνοψη	238
8	Κατάρτιση Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος με βάση πληροφορία από Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους	240
8.1	Αδιαμέτρηστη προσομοίωση διεργασιών μεταφοράς σε λεκάνες απορροής, με βάση το Γεωμορφολογικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα.....	240
8.2	Περιοχή μελέτης.....	243
8.3	Αποτελέσματα	245
8.4	Σύνοψη	255
9	Ημικατανεμημένη ταξινόμηση γήινου αναγλύφου	257
9.1	Γενικά.....	257
9.2	Υδρολογική ταξινόμηση τοπίου με βάση Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους και Ορθοεικόνες	258
9.3	Συμβολή κατηγοριών τοπίου στο μοντέλο FLEX-Topo	261
9.4	Περιοχή Μελέτης.....	261
9.5	Δεδομένα	264
9.6	Αποτελέσματα	265
9.6.1	Κλάσεις	267
9.6.2	Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο.....	270
9.6.3	Πρόβλεψη της απορροής μέσω του μοντέλου βροχόπτωσης - απορροής.....	272
9.7	Σύνοψη	279
10	Εκτίμηση της επίδρασης της ακρίβειας των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους στα όρια των κατακλυζόμενων περιοχών λόγω πλημμύρας	282
10.1	Γενικά.....	282
10.2	Χαρτογράφηση των κατακλυζόμενων εκτάσεων	282
10.3	Εκτίμηση της επίδρασης της ακρίβειας των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους στις κατακλυζόμενες περιοχές	284
10.4	Περιοχή μελέτης.....	284
10.5	Δεδομένα	288
10.5.1	Η λεκάνη του ρέματος Καλυβίων.....	289
10.5.2	Λεκάνη απορροής ποταμού Κερυνίτη	291
10.6	Αποτελέσματα	292
10.6.1	Γενικά.....	292

10.6.2	Αποτελέσματα για τη λεκάνη του Νοτιοδυτικού ρέματος Καλυβίων	293
10.6.3	Αποτελέσματα για τη λεκάνη του π. Κερυνιτή	300
10.7	Σύνοψη	306
11	Συμπεράσματα	309
11.1	Σύνοψη – Συμπεράσματα	309
11.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	317
	Αναφορές	320
	Ελληνικές.....	320
	Ξενόγλωσσες	320

Περίληψη

Αφορμή για την έναρξη της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτέλεσε το πρόβλημα της έλλειψης των μετρήσεων απορροής σε λεκάνες απορροής και η Πρωτοβουλία PUB (Predictions in Ungauged Basins) της Διεθνούς Ένωσης των Υδρολογικών Επιστημών (International Association of Hydrological Sciences - IAHS) το 2003, η οποία είχε στόχο την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας στις προβλέψεις της υδρολογικής συμπεριφοράς αυτών των λεκανών απορροής.

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε και προτείνεται μεθοδολογικό πλαίσιο για την αντιμετώπιση του προβλήματος, της έλλειψης μετρήσεων υδρολογικού ενδιαφέροντος. Για τους υδρολόγους η έλλειψη μετρήσεων συνίσταται στο γεγονός ότι για τις λεκάνες απορροής δεν υπάρχουν διαθέσιμα συνεχή δεδομένα μετρήσεων πεδίου, τα οποία να επιτρέπουν την εκτίμηση του μεγέθους της απορροής, γεγονός που καθιστά δυσχερή τη βέλτιστη διαχείριση των υδατικών πόρων σε αυτές τις λεκάνες ή την διαχείριση κινδύνων που αφορούν το νερό. Οι λεκάνες απορροής με το παραπάνω χαρακτηριστικό είναι γνωστές ως *μη μετρούμενες λεκάνες απορροής*.

Η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη της υδρολογικής συμπεριφοράς των μη μετρούμενων λεκανών αυτών οδήγησε σε προσπάθεια των υδρολόγων να υποκαταστήσουν τις μετρήσεις απορροής. Οι εμπειρικές σχέσεις οι οποίες εφαρμόζονταν και εφαρμόζονται ευρύτατα, χρησιμοποιούνται για να καλύψουν το κενό των δεδομένων, παρά το γεγονός ότι υπόκεινται σε εγγενείς περιορισμούς οι οποίοι αφορούν τις τοπικές κλιματικές και τις γεωμορφολογικές συνθήκες με αποτέλεσμα η χρήση τους πιθανόν να οδηγεί σε ελλιπή ή ανακριβή συμπεράσματα. Στο πλαίσιο της ίδιας προσπάθειας, έμφαση, επίσης, δόθηκε στην ανάπτυξη υδρολογικών μοντέλων ποικίλης πολυπλοκότητας και μεθοδολογικής φιλοσοφίας. Ορισμένα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν πολύ περισσότερο από άλλα, για διάφορους λόγους, όπως η απλότητά τους, οι απαιτήσεις σε δεδομένα, η διαθεσιμότητα κώδικα, το επίπεδο τεκμηρίωσής τους και η διάδοσή τους. Σε άλλες περιπτώσεις η έλλειψη προσεγγίζεται μέσω της χρήσης μετρημένων δεδομένων απορροής μιας εκ των γειτονικών λεκανών απορροής (λεκάνη δότρια δεδομένων), με την παραδοχή ότι η συμπεριφορά αυτής είναι παρόμοια με τη συμπεριφορά της εξεταζόμενης μη μετρούμενης λεκάνης (λεκάνη υποδοχής δεδομένων) σε παρόμοια γεγονότα βροχόπτωσης. Εναλλακτικά, εφαρμόζονται απλοποιημένες παραδοχές (π.χ., τεχνικές περιοχοποίησης).

Ως στόχος της διδακτορικής διατριβής τίθεται η αναζήτηση μεθόδων υποκατάστασης των μετρήσεων απορροής με αποκλειστική χρήση μορφομετρικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής. Αυτή η προσέγγιση εντάσσεται, εξ άλλου, στο πλαίσιο της σύγχρονης τάσης για αποδέσμευση από συστηματικές μετρήσεις υδρολογικών μεγεθών. Η τάση αυτή θέτει στο επίκεντρο του ερευνητικού ενδιαφέροντος τις γνώσεις για τις φυσικές υδρολογικές διεργασίες και την κατανόηση αυτών σε ένα εύρος χωροχρονικών κλιμάκων. Έτσι, το υδρολογικό πρόβλημα των μη μετρούμενων λεκανών απορροής δημιούργησε την ανάγκη για αναζήτηση σχέσεων και συσχετίσεων της απορροής με άλλα μεγέθη, τοπογραφικά, κλιματολογικά, γεωλογικά, εδαφολογικά κ.ά. Στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής διερευνάται η αποκλειστική χρήση πληροφορίας σχετικής με το γήινο ανάγλυφο μέσω της χρήσης Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (ΨΜΕ), για την αντιμετώπιση της έλλειψης υδρολογικής πληροφορίας.

Συγκεκριμένα, εξετάζονται τα παρακάτω:

- η χρήση μορφομετρικών χαρακτηριστικών για την αδιαμέριστη ταξινόμηση των λεκανών απορροής και η ανάπτυξη κατάλληλου μεθοδολογικού πλαισίου.

Η ταξινόμηση βασίζεται στην πληροφορία από κλιματικές μεταβλητές (υδρολογικές υπογραφές της λεκάνης απορροής) και σε πληροφορία η οποία εξάγεται από το ανάγλυφο του εδάφους. Σε επόμενο στάδιο, τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τη βροχόπτωση, ως κριτήρια πρόβλεψης της κλάσης της εξεταζόμενης μη μετρούμενης λεκάνης, καθόσον τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά και η βροχόπτωση μετρώνται στις περισσότερες λεκάνες απορροής παγκοσμίως.

- η δυνατότητα μεταφοράς υδρολογικής πληροφορίας μεταξύ όμοιων υδρολογικά λεκανών απορροής, οι οποίες ανήκουν σε ίδιες κλάσεις υδρολογικής συμπεριφοράς σε αδρή χρονική κλίμακα (π.χ. ημερήσια) και με αδιαμέριστη προσέγγιση των υδρολογικών διεργασιών.

Για τη μεταφορά της υδρολογικής πληροφορίας χρησιμοποιείται μια τροποποιημένη εκδοχή του μοντέλου FLEX-Topo του Savenije (2010) και ο έλεγχος γίνεται σε λεκάνες απορροής οι οποίες ανήκουν στην ίδια κλάση, όπως αυτή ορίστηκε στη διαδικασία της αδιαμέριστης ταξινόμησης.

- η χωροχρονική διακύμανση της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης (ΑΣΕ) για τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου.

Για τον υπολογισμό των τιμών της ΑΣΕ χρησιμοποιείται πληροφορία για τις κεφαλές των εφήμερων και των μόνιμων κλάδων του υδρογραφικού δικτύου για δύο εποχές του υδρολογικού έτους, την υγρή και την ξηρή περίοδο, αντίστοιχα. Έτσι, εξάγεται το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής, με χρήση αντικειμενικής πληροφορίας.

- η ανάπτυξη μεθοδολογικού πλαισίου για την κατάρτιση Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος με βάση πληροφορία από ΨΜΕ σε μη μετρούμενη λεκάνη απορροής με χρήση της μεθόδου της σταθμισμένης μέσω της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους (drainage density based Rescaled Width Function, ddRWF).
- η προσέγγιση ημικατανεμημένης μοντελοποίησης της σχέσης βροχόπτωσης – απορροής μιας λεκάνης απορροής, μέσω της ταξινόμησης χωρικών ενοτήτων αυτής (ημικατανεμημένη ταξινόμηση γήινου αναγλύφου) γνωστής ως ταξινόμησης τοπίου (landscape classification).

Υιοθετείται η ταξινόμηση τοπίου σε υδρολογικές κατηγορίες τοπίου, μέσω της οποίας εντοπίζονται υδρολογικά ομογενείς χωρικά ενότητες, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στην ημικατανεμημένη υδρολογική μοντελοποίηση. Η προσομοίωση μέσω της ταξινόμησης τοπίου επιτρέπει την πρόβλεψη της απορροής σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής.

- η αξιοποίηση της ταξινόμησης τοπίου για τη μεταφορά των παραμέτρων του επιλεγμένου μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής σε μη μετρούμενη λεκάνη.

Η υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης για κάθε κατηγορία τοπίου είναι σε αντιστοιχία με τους επικρατούντες μηχανισμούς γένεσης της απορροής. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ημικατανεμημένη υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής με χρήση του τροποποιημένου υδρολογικού μοντέλου βροχόπτωσης απορροής FLEX-Topo (Savenije, 2010) και λαμβάνεται η εκτίμηση της παροχής της λεκάνης απορροής. Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο καλύπτει το σύνολο των διαδικασιών της ταξινόμησης τοπίου και της

μεταφοράς υδρολογικής πληροφορίας μεταξύ των κατηγοριών τοπίου από μια μετρούμενη σε μία μη μετρούμενη λεκάνη απορροής.

- η εκτίμηση της επίδρασης της ακρίβειας των ΨΜΕ στα όρια των κατακλυζόμενων περιοχών λόγω πλημμύρας.

Για την αναπαράσταση της γήινης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν ΨΜΕ και τοπογραφική πληροφορία από φωτογραμμετρικά δεδομένα και τοπογραφικά διαγράμματα. Η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας στο ΨΜΕ πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Monte Carlo. Η χάραξη των ορίων των κατακλυζόμενων περιοχών έγινε στο κατάντη τμήμα δύο λεκανών απορροής της ελληνικής επικράτειας και ορίστηκαν νέες, πρωτότυπες παράμετροι, ή κριτήρια χαρακτηρισμού των κατακλυζόμενων περιοχών οι οποίες οδηγούν σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της αβεβαιότητας στο ΨΜΕ.

Η διατριβή έχει στόχο να συμβάλει στην κατάταξη των μη μετρούμενων λεκανών από την άποψη των επικρατούντων μηχανισμών γένεσης της απορροής, και στη βελτίωση των μοντέλων προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών σε λεκάνες απορροής με φτωχή υδρολογική πληροφορία ή παντελή έλλειψη αυτής. Η χρήση τοπογραφικής πληροφορίας είναι πρωτότυπη και πολλά υποσχόμενη προσέγγιση, για την αντιμετώπιση της έλλειψης υδρολογικής πληροφορίας και την ταξινόμηση, ει δυνατόν, των λεκανών απορροής, σε κατηγορίες με παρόμοια υδρολογική συμπεριφορά.

Το θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε αφορά γνωστές μεθόδους και σύμφωνα με το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο, ο συνδυασμός αυτών επιτρέπει την ανάπτυξη ενός πρωτότυπου τρόπου για την αντιμετώπιση του επιστημονικού κενού. Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο στηρίζεται στην αξιοποίηση της ευρέως διαθέσιμης τοπογραφικής πληροφορίας μέσω των ΨΜΕ.

Επιγραμματικά, τα κύρια πρωτότυπα σημεία της διατριβής συνοψίζονται στα εξής:

1. Ανάπτυξη μεθοδολογικού πλαισίου ταξινόμησης, σε κλάσεις υδρολογικής συμπεριφοράς σε αδρή χρονική κλίμακα (ημερήσια), μη μετρούμενων λεκανών απορροής με: (α) πρωτότυπη συνδυασμένη χρήση υδρολογικών υπογραφών και μορφομετρικών χαρακτηριστικών, (β) πρωτότυπη συνδυασμένη χρήση εργαλείων μη επιβλεπόμενης και επιβλεπόμενης ταξινόμησης, καθώς και εργαλείων συμπύκνωσης της χρησιμοποιούμενης πληροφορίας, και (γ) έλεγχο της πρακτικής χρησιμότητας του προτεινόμενου πλαισίου με μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας από μετρούμενες σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής, προφανώς ανήκουσες στην ίδια κλάση υδρολογικής συμπεριφοράς. Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο ονομάστηκε αδιαμέριστη ταξινόμηση.
2. Βελτίωση υφιστάμενου μεθοδολογικού πλαισίου ταξινόμησης υποπεριοχών εντός μιας λεκάνης απορροής σε υδρολογικές κατηγορίες τοπίου, με προσθήκη στα χρησιμοποιούμενα μορφομετρικά στοιχεία, της πληροφορίας «κατηγορία βλάστησης» και, στη συνέχεια, έλεγχος της χρησιμότητας του προτεινόμενου πλαισίου με μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας σε αδρή χρονική κλίμακα (ημερήσια) από μετρούμενες σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής, προφανώς από την κάθε υδρολογική κατηγορία τοπίου της εξεταζόμενης μετρούμενης λεκάνης, στην αντίστοιχη ίδια κατηγορία της εξεταζόμενης μη μετρούμενης λεκάνης. Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο ορίστηκε ως ημικαταναεμημένη ταξινόμηση.
3. Ορισμός της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης (ΑΣΕ) για τη δημιουργία υδρογραφικού δικτύου, με (α) πρωτότυπη χρήση ευρέως διαθέσιμης χαρτογραφικής πληροφορίας σχετικά με τα εφήμερα ρέματα και τα ρέματα μόνιμης ροής, (β) θεώρηση της χωροχρονικής μεταβολής του υδρογραφικού δικτύου, και πρόταση εκδοχών αυτού λόγω εποχικής διακύμανσης.

4. Ανάπτυξη μεθοδολογικού πλαισίου για την κατάρτιση συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος σε μη μετρούμενη λεκάνη απορροής με χρήση της γνωστής μεθόδου της σταθμισμένης μέσω της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους (drainage density based Rescaled Width Function, ddRWF). Η πρωτοτυπία του προτεινόμενου πλαισίου έγκειται στη μέθοδο εκτίμησης των κινηματικών παραμέτρων της μεθόδου ddRWF (ταχύτητες ροής του νερού επί πλαγιάς και εντός υδατορεύματος).
5. Πραγματοποίηση υπολογιστικού πειράματος, μέσω της μεθόδου Monte Carlo, για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης, επί των ορίων της κατακλυζόμενης περιοχής λόγω πλημμύρας, των σφαλμάτων της υψομετρικής πληροφορίας από ΨΜΕ παραχθέντα με διάφορες μεθόδους, στη συνέχεια, παραγωγή πρωτότυπων κριτηρίων προσδιορισμού της αβεβαιότητας των ορίων της κατακλυζόμενης περιοχής από πλημμύρες σχεδιασμού διαφόρων περιόδων επαναφοράς, σε δύο διαφορετικούς τύπους γήινου αναγλύφου (πεδινό, λοφώδες) και, τέλος, συσχέτιση των παραπάνω κριτηρίων με την περίοδο επαναφοράς και τον τύπο αναγλύφου.

Η διδακτορική διατριβή αποτελείται από δύο διακριτά Μέρη:

- το *Μέρος I* στο οποίο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο, η υπάρχουσα γνώση και το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διατριβής και
- το *Μέρος II* στο οποίο αναπτύσσονται και εφαρμόζονται οι προτεινόμενες μεθοδολογίες σε λεκάνες απορροής ποταμών της ελληνικής επικράτειας και παρουσιάζονται τα ερευνητικά αποτελέσματα. Η διδακτορική διατριβή ολοκληρώνεται με τη συγκέντρωση των συμπερασμάτων και την παράθεση ορισμένων ιδεών για περαιτέρω έρευνα.

Extended Abstract

E1. Introduction

E1.1 General

Floods are among the most catastrophic natural hazards, creating significant human deaths and economic and environmental losses at the global scale. To cope with this the scientific community has invested a lot in developing appropriate tools. Hydrologists are using data and models to predict flood events in an uncertain environment with the purpose to design flood protection structures and water conservation works. At the catchment scale, environmental data, such as precipitation, elevation data (i.e., Digital Elevation Models or DEMs), and discharge timeseries are important as initial information for hydrological analyses. The generation of surface runoff is directly influenced by geomorphological characteristics of the studied catchment and requires the study of runoff generation mechanisms in a basin, and also the search for relationships connecting runoff and geomorphological characteristics. Obviously, this relationship is not linear due to the different time scales involved in hydrological processes, among others.

On the other end of the spectrum, water is a valuable resource for human societies and ecosystems. It is therefore vital to predict water resources in view of the design of hydraulic works for the exploitation of such resources. As a result, the necessity of the accurate prediction of river runoff emerges again as in the above-mentioned case emphasizing floods.

Despite the fact that our era is characterized by the development and application of remote and on-site sensing methods for measuring and collecting hydrological data (e.g., ground telemetry systems, radar, meteorological satellites), in terms of measuring the discharge in river cross sections, the problem remains. Most part of the drainage catchments worldwide remain ungauged. The Prediction in Ungauged Basins (PUB) initiative of the International Association of Hydrological Sciences (IAHS), launched in 2003 and concluded by the PUB Symposium 2012 held in Delft, aimed at improving scientific understanding of hydrological processes, as well as the associated uncertainties and the development of models with high predictive power. Furthermore, there is a need for better comprehension of the hydrological behavior of a catchment. In the presence of hydrological data scarcity worldwide, it would be useful to link catchment's behavior with its physical properties, such as climate, topography, geology, soil type and land use, to address the challenge of ungauged basins (Wagner et al., 2007; Gupta et al., 2008). In addition to that, the changing environment (land-use changes, effects of a changing climate) plays a critical role in hydrological modeling. There was no clear understanding of the spatial and temporal scales at which these effects would emerge (Blöschl et al., 2007). On top of that, insufficient process understanding and the lack of concurrent data at multiple space–time scales enhance predictive uncertainty. Everyday engineering practices still follow simplistic approaches that are easy to implement in ungauged basins (Efstratiadis et al., 2014).

In the last 20 years, there was a significant interest in basin classification (McDonnell and Woods, 2004; Wagner et al., 2007; Sawicz et al., 2011). The criteria for this classification consist mainly of physical catchment characteristics and geomorphological characteristic (Winter, 2001; Wolock, 2004; Gharari et al., 2011; Cheng, 2012; Sawicz et al., 2013; Papageorgaki and Nalbantis, 2016), and on streamflow characteristics (Olden et al., 2011; Ley

et al., 2011; Corduas, 2011). Classification of drainage basins into groups with similar response to meteorological forcing can be very helpful in cases of transfer of hydrological information in space such as in streamflow prediction in ungauged basins (Papageorgaki and Nalbantis, 2022). One of the focuses, in the present thesis, is testing the ability to classify drainage basins using climate-based variables and geomorphometric characteristics as predictors. In such an effort, the stream network plays an important role, as it affects the accurate estimation of stream head positions and, hence, water transfer processes which are important for an accurate runoff prediction. The spatial distribution of geomorphological characteristics used for basin classification is also affected by the stream network, i.e., the drainage density, or the Height Above the Nearest Drain (HAND). HAND and ground slope, which can be easily obtained from a DEM, appear to be the dominant topographical controls for hydrological classification (Gharari et al., 2011; Papageorgaki and Nalbantis, 2016).

The extraction of hydrographic networks and catchment delineation based on a DEM are performed in an automatic way in a Geographic Information System (GIS). The geomorphic and hydrologic importance of the extraction of hydrographic network is depicted in literature (Montgomery and Dietrich, 1989; Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993). Various methods have been proposed for automatically extracting channel networks from DEMs (O'callaghan and Mark, 1984; Tarboton et al., 1991; Band and Moore, 1995), the most common one being the adoption of a value of the minimum drainage area required for a channel to initiate (Band, 1986; Morris and Heerdegen, 1988; Tarboton et al., 1988). Tucker et al. (2001) proposed a combination of two criteria, i.e., a threshold upstream contributing area and a slope threshold. The upslope contributing area threshold, herein referred to as the Critical Support Area (CSA), is the critical quantity that allows for the extraction, from DEMs, of useful hydrological information. CSA is commonly selected as a constant quantity without consideration of its variation in time and space. In this thesis, an objective way for channel initiation is investigated, taking into consideration topographic information from classical maps at the scale 1:50000. So, these maps are used to identify stream heads and the corresponding values of CSA for two seasons of the hydrological year: the wet and dry season. For the extraction the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) DEM is used, while GIS and MatLab are employed for data processing.

Landscape classification is considered as a promising tool for constructing rainfall runoff models that enable runoff predictions in ungauged basins (Papageorgaki and Nalbantis, 2022). Topography can be regarded as an integrated indicator to distinguish between landscape elements with different hydrological functions (Gao et al., 2014). More specifically, HAND calculates the elevation of each point in the catchment above the nearest stream it drains to, following the flow direction. HAND increases the hydrologic information content of elevation data (Nobre et al., 2011).

Runoff prediction in ungauged basins requires the transfer of hydrological information in space, which is greatly facilitated by using physically observable quantities, such as geomorphological characteristics. These allow the landscape classification or, else, the identification of areas that are distinct with respect to the predominant runoff generating mechanisms. For example, Winter (2001) proposed a classification of the catchment inner space into hydrological landscape units (upland, valley slopes and lowland) through exploiting the combination of topographic, geological and climatic conditions. Topography has also a considerable influence on the dominant hydrological processes in different parts of a catchment, which could be used to define hydrologically different response units (Savenije, 2010). Topography is also linked to geology, soil characteristics, land cover and climate through co-evolution (Sivapalan, 2009; Savenije, 2010).

Although topographic data of the ground surface are globally available, in hydrological models topography is sometimes explicitly used, whereas in other cases, this is used implicitly or even ignored. For example, the lumped topography-driven model known as TOP-MODEL (Beven and Kirkby, 1979) uses the topographic wetness index (TWI) (Beven and Kirkby, 1979), which is a proxy for the probability of saturation of each point in a catchment, which is directly linked to the occurrence of Saturated Overland Flow (SOF). The topography-driven conceptual modelling approach known as FLEX-Topo (Savenije, 2010) attempts to exploit topographic signatures in order to design conceptual model structures that represent the complexity and heterogeneity of hydrological processes. This model follows a middle way between parsimonious lumped and complex distributed models. It exploits topographic information as the main indicator of landscape classes and dominant hydrological processes. In this thesis, the FLEX-Topo model is adapted to the test basins used.

The well-known procedure for the estimation of parameters of conceptual models relies on the availability of streamflow data for model calibration, which, however, are frequently unavailable. Alternative techniques, such as regionalization have been developed to bypass model calibration (Yadav et al., 2007; Zhang et al., 2008; Kling and Gupta, 2009; Samaniego et al., 2010; Kumar et al., 2010; Wagener and Montanari, 2011; Kapangaziwiri et al., 2012; Viglione et al., 2013). So, the identification of the relation between catchment characteristics and model parameters (Merz and Blöschl, 2004; Kling and Gupta, 2009; Nalbantis, 1995; Nalbantis et al., 2011; Nalbantis et al., 2002) has been and still is a challenging research topic.

However, the lack of representation of processes heterogeneity in conceptual models limits the realism of these models. To handle this issue the concept of Hydrological Response Units (HRUs) was proposed. Landscape classification using topographical indices, from DEMs becomes a promising tool (McGlynn and McDonnell, 2003; Hrachowitz et al., 2009; Gourgoulis and Nalbantis, 2017). Consequently, within a flexible modelling framework (Fenicia et al., 2008; Fenicia et al., 2011), different model structures have been developed to represent the different dominant hydrological processes in different landscape classes. FLEX-Topo is a modelling framework that makes exhaustive use of topographic information in hydrological models and it can be applied to any type of conceptual model.

The design of a variety of hydraulic works is based either on design hydrographs, which are constructed through hydrological analysis of historical data, or through the use of geomorphological characteristics of the study basin. For ungauged basins, the use of a Synthetic Unit Hydrograph (SUH) seems the only way to handle the lack of data. Within the SUH (Singh et al., 2014) approach two forms of the Instantaneous Unit Hydrograph, or, else, the response hydrograph to an instantaneous pulse of rainfall excess, have been proposed:

- the Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph (Rodriguez-Iturbe and Valdez 1979; Rinaldo and Rodriguez-Iturbe 1996), and
- the Width Function based Instantaneous Unit Hydrograph (WFIUH) or, else, the Rescaled Width Function (RWF) (Rinaldo et al. 1995) based on the idea of Width Function (Gupta et al. 1986) which reflects the probability density function of flow path length from each point within the studied basin to the basin outlet. The RWF method takes into consideration the heterogeneity of the ground relief. This has been further developed by Di Lazzaro et al. (2014) to make use of the drainage density and the resulting method is denoted as the drainage density weighted Rescaled Width Function, or ddRWF.

Drainage density can be easily derived from a DEM, after the extraction of stream network. The ddRWF method is modified to make use of findings on the CSA (Papageorgaki and Nalbantis, 2018) for extracting the hydrographic network. The hydrographic network is

important for the computation of drainage density, so that an objective method for its extraction is preferable to others. The CSA value is selected on the basis of heads of perennial and ephemeral streams shown on maps at the scale 1:50000. The extracted hydrographic network based on CSA is later compared with the one proposed by Tucker et al. (2001). As already said, Tucker et al. (2001) proposed a combination of two criteria, i.e., a threshold upstream contributing area and a slope threshold. The latter method has also been applied by Di Lazzaro et al. (2015) within the WFIUH framework. Both analytical forms of WFIUH include kinematic parameters which are effective flow velocities for hillslopes and channels. According to the proposed methodological framework, the estimation of kinematic parameters of WFIUH for ungauged basins is performed following a relationship described by Di Lazzaro (2009) after his regional analysis of 12 gauged basins in Central Italy. So, the channel flow velocity has been calculated using the average based on ground elevations flow path slope using ground elevations from a DEM. The latter framework is used to estimate the kinematic parameters of the WFIUH in a framework with lack of the necessary runoff and rainfall data.

All flood simulations are known to suffer from significant uncertainties, since those are based on hydrological and hydraulic models that make use of land information. The impact of uncertainty in ground elevation on the extent of areas that are inundated due to flooding is critical. General guidelines on using Digital Surface Models (DSMs) in flood hazard assessments are lacking due to the difficulty in processing DSM-based topographical information within many existing models, and due to the lack of knowledge on the required DSM accuracy (or uncertainty).

The typical procedure for flood hazard mapping includes the construction of design hyetographs; the transformation of these into graphs of river discharge, water velocity, and water depth; the calculation of the peak (i.e., maximum) water elevations; and the construction of maps with the maximum inundated area. The latter is known to contain uncertainty, which was studied only in the last decade (e.g., Merwade et al., 2008). This is mainly caused by uncertainty that is inherent in hydrological processes (Carpenter and Georgakakos, 2004; Chaubey et al., 2005; Crosetto et al., 2000; Huang and Liang, 2005; Wilby, 2005; Anderson et al., 2009). Also, DSMs contain uncertainty whose effect has been investigated only in the last 15 years by focusing either on peak discharge (Brasington and Richards, 1998; Chaubey et al., 2005; Hancock, 2005; Valeo and Moin, 2000), or on water depth and inundation extent (Bales and Wagner, 2009; Bates et al., 2003; Colby et al., 2000; Marks and Bates, 2000; Omer et al., 2003; Tate et al., 2002; Vazquez et al., 2002; Wang and Zheng, 2005; Werner, 2001; Werner, 2004). The effect of DSM uncertainty on the extent of inundated areas is investigated using the Monte Carlo method to quantify the uncertainty. A typical photogrammetric procedure and conventional maps are used to obtain a reference DSM, later altered to provide DSMs of lower accuracy. Also, data from the Shuttle Radar Topography Mission are used. It is worth noting that, in the past, the effect of DSM uncertainty was studied within the frame of international research initiatives such as the Flood Risk Management Research Consortium Initiative (Pappenberger et al., 2005) and the Prediction in Ungauged Basins Initiative (Hrachowitz et al., 2013; Sivapalan et al., 2003). To characterize the inundated area, the 90% quantile of the inundation extent and inundation topwidth for peak water level at specific river cross sections are employed. For topwidths, apart from point estimates, also interval estimates are acquired.

E1.2 The aim

The aim of the doctoral thesis is to contribute to the classification of ungauged basins in terms of the mechanisms of runoff generation and the improvement of hydrological models in cases of catchments with poor or complete lack of hydrological information.

Specifically, the thesis is aimed at contributing to responding to the following questions:

Question 1: How is it possible to transfer hydrological information from a gauged basin to an ungauged one, when the approach is lumped in space and the time scale is coarse (e.g., daily, monthly)?

Separate questions are rising, concerning:

- Is it possible to recognize the hydrological class of an ungauged basin, for which only information that is readily available, can be used?
- Is it possible to identify geomorphological features of a basin, that can be used as criteria to allow the recognition of the hydrological class of an ungauged basin among classes obtained via hydrological signatures, and, also, allow the transfer of hydrological information in space?
- Is it possible to set an appropriate methodological framework for the classification of ungauged basin?
- Is it possible to determine an objective way of assessing the geomorphological characteristics to be used as classification criteria?

Question 2: How is it possible to extract the hydrographic network of a drainage basin based on objective information derived from a DEM, and, moreover, what is its spatiotemporal variation?

Separate questions are rising, concerning:

- Which is the suitable value of Critical Support Area (CSA) for the extraction of hydrographic networks from a DEM?
- Is the dynamics of the hydrographic network depicted in the value of CSA, as the latter is known to be related to the size and scale of a stream network and the related basin area?
- In which way the variation in time and space of CSA can be investigated and modeled?

Question 3: How is it possible to transfer hydrological information from a gauged basin to an ungauged one, when the approach is lumped in space and the time scale is fine (e.g., hourly)?

Separate questions are rising, concerning:

- How does the drainage density weighted Rescaled Width Function can be used for the derivation of the Synthetic Unit Hydrograph of an ungauged drainage basin?
- How to estimate the kinematic parameters of the Width Function based Instantaneous Unit Hydrograph (WFIUH) in a framework with lack of the necessary runoff and rainfall data?
- How does the uncertainty in DSM affect the inundation extent of rainfall-induced floods?

Question 4: How is it possible to transfer hydrological information from a gauged basin to an ungauged one, when the approach is semi-distributed in space and the time scale is coarse?

A separate question is rising, concerning:

- It is possible to accurately predict the runoff of an ungauged basin, adopting the approach of semi-distributed rainfall-runoff modelling using landscape classification into hydrological landscape classes, and, also allow the transfer of hydrological information in space?

E1.3 Thesis structure

Chapter One is the Introduction that covers all topics of the thesis. In this chapter the employed concepts and ideas on hydrological similarity, geomorphological characteristics, basin classification, landscape-based modelling, width function and the effect of DSM uncertainty on flood extent are briefly introduced, before presenting the outline of the thesis.

In Chapter Two the concept of hydrological similarity is presented by discussing the notions of catchment classification, landscape classification and transfer of hydrological information from gauged to ungauged basins. Since the vast majority of drainage basins worldwide are ungauged, planning and design of water resources systems is very often based on streamflow estimates that employ information on streamflow from other basins that are gauged. In such cases, it is desirable that the ungauged basin be hydrologically similar to other basins that are gauged.

Chapter Three focuses on characteristics of hydrological similarity that can easily be obtained from information related to the earth surface. Since, streamflow data are considered unavailable, the interest is focused in constructing a system of basin classification based on readily available information. Basin geomorphometric characteristics can be used as criteria to basin classification, as they are derived from a Digital Elevation Model (DEM). These characteristics include two categories of quantities: indices that take a unique value for each basin, and statistics of quantities that vary in space and time.

Chapter Four deals with the extraction of hydrographic network of a basin. Due to the wide availability of DEMs the extraction of hydrographic networks is typically performed in an automatic way. The extent of channel network directly affects the simulated hydrologic response of a catchment. As a result, the accurate estimation of stream heads is important for the accurate prediction of runoff. Although, a threshold is the only quantity that one has to decide for the extraction of stream network, commonly, an arbitrary value for the upslope contributing area is selected which is constant in both time and space. In this chapter, all known quantities that can be used as thresholds are presented.

In Chapter Five the methodological framework proposed in this doctoral thesis is presented. Five different scientific topics are covered, which are: (1) the classification of an ungauged basin according to the proposed basin classification system, (2) the definition of Critical Support Area for the extraction of hydrographic network, (3) the derivation of the Synthetic Unit Hydrograph of an ungauged drainage basin by using the approach of Rescaled Width Function (RWF) in the form of a modified version by Di Lazzaro et al (2015) known as drainage-density weighted RWF (ddRWF), which considers the density of the drainage network, (4) the concept of landscape classification into hydrological landscape classes within the landscape-based hydrological model FLEX-Topo, which later allows semi-distributed rainfall-runoff modelling, and (5) the assessment of the effect of uncertainty in Digital Surface Models (DSMs) on the extent of inundated areas.

In Chapter Six the application of the proposed lumped basin classification framework is performed and results are presented. Twenty-four gauged basins in mainland Greece are used, which are classified into four classes. The employed methodology for the classification involves two steps. In the first step, unsupervised classification is performed using the fuzzy c-means method to identify basin classes that serve as the reference classes in the second step of analysis. A set of hydrological signatures is used in the first step, which includes the runoff ratio, the baseflow index, the slope of flow duration curve, and the snow day ratio. In step two, supervised classification through using the k-Nearest Neighbour method is performed which maps predictors to basin classes.

The chance to transfer hydrological information through basins that belong to the same class is tested. Two gauged basins of Class 3 are selected for the test. Agraphiotis basin is selected as

the “donor” basin, from which the hydrological model parameters are transferred to Krikalopotamos basin which is considered as ungauged. The comparison between discharge hydrographs simulated using basin’s parameters (i.e., by considering the basin as gauged), and using the donor basin’s parameters (i.e., by hypothesizing that the basin is ungauged) showed promising results.

Chapter Seven focuses on testing the proposed methodology for the extraction of stream network based on CSA. The stream network from conventional maps is exploited in combination with the stream network derived from a DEM with a spatial resolution of 30 m, obtained from the Global Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). The map-derived stream network includes both perennial and ephemeral or intermittent streams. CSA values are estimated for heads of both perennial and intermittent streams. The spatial variation of CSA is investigated by examining relationships between CSA and geomorphometric characteristics. The proposed methodology is tested in three drainage basins which have been classified as hydrologically similar in a previous study (Papageorgaki and Nalbantis, 2016).

Chapter Eight focuses on constructing the Synthetic Unit Hydrograph by adopting the Width Function approach in the form of the drainage-density weighted Rescaled Width Function (ddRWF), which takes into consideration the heterogeneity of the earth’s relief and the drainage density. The method is modified to make use of our findings on CSA for extracting the hydrographic network. The methodology is applied to six drainage basins in Greece, in one of which a Unit Hydrograph derived from rainfall and runoff data is available. Last, results are compared to those obtained using a typical SUH from literature.

Chapter Nine focuses on testing the realism of the landscape-based hydrological model (FLEX-Topo) in Greek basins, located in the western part of continental Greece. The influence of topography and natural vegetation cover on hydrological processes are examined, in order to understand catchments’ behaviour. The outcomes of landscape classification are imported to the semi-distributed rainfall-runoff modelling procedure to predict the runoff of an ungauged basin. So, the concept of landscape classification into hydrological landscape classes is used to transfer hydrological information from a gauged basin to an ungauged one.

Chapter Ten focuses on the impact of uncertainty in ground elevation on the extent of areas that are inundated due to flooding. Land surface is represented through a Digital Surface Model (DSM), so as to assess the effect of DSM uncertainty on the estimates of flood extent. Two drainage basins are selected for tests of the proposed framework; those are the basin of the Southeast Kalyvia Torrent, which is located in Eastern Attica, and the basin of the Kerynitis River in Peloponnese. A typical photogrammetric procedure and conventional maps are used to obtain a reference DSM, later altered to provide DSMs of lower accuracy. Also, data from the Shuttle Radar Topography Mission are used. To characterize the inundated area, we employ the 90% quantile of the inundation extent and inundation topwidth for peak water level at specific river cross sections. Useful numerical criteria are devised to describe the findings.

In Chapter Eleven the main conclusions are summarized and some perspectives for further research are provided.

E2. Lumped Basin Classification

The methodological framework that is set up for basin classification addresses two main problems. The first problem relates to classifying gauged basins in order to define hydrological classes of hydrologically similar basins. For this, most of the signatures used by Sawicz et al. (2011) are selected to be used as features for the basins to be classified. The selected

hydrological signatures are Runoff ratio, Slope of flow duration curve, Baseflow index and Snow day ratio. For their estimation, streamflow measurements are necessary.

The second problem is the recognition of the hydrological class of an ungauged basin in which case it becomes necessary to resort to information that is readily available for such a basin, e.g., geomorphological characteristics.

The proposed methodological framework is formulated so as to allow for inferring hydrological similarity of an ungauged basin, herein simply denoted as the “ungauged basin”, with respect to a specific class of previously classified gauged basins, herein termed as the “gauged basins”. The tested basin is supposed to be ungauged in the sense that no runoff records are available for it. Such records for the “ungauged basin” are used only for validation purposes. Data of other hydrological variables are however available in it, e.g., precipitation. Also, information on basin hypsometry allows for the estimation of geomorphometric characteristics of all basins. The proposed framework is comprised of two steps. In Step 1 gauged basins, in the broader area of the ungauged basin, are classified using the hydrological signatures mentioned above. The basin classification is carried out using hydrological signatures as measures of hydrological similarity. Since, in this classification, classes are not known beforehand, an unsupervised classification is selected, which enables the grouping of gauged basins into groups with specific patterns of hydrological signatures. The well-known fuzzy c-means method, or FCM (Dunn, 1974; Bezdek et al., 1984) is applied and four basin classes are estimated. The flowchart of Figure E.1 summarises the calculation steps related to Step 1 (left part) and Step 2 (right part). Step 2 involves establishing a relationship between features of gauged basins (i.e., climate-based variables and geomorphometric characteristics) as predictors and basin classes already identified in Step 1 as predictands. Precipitation is selected as the climate-based variable, because this is commonly measured in the majority of basins.

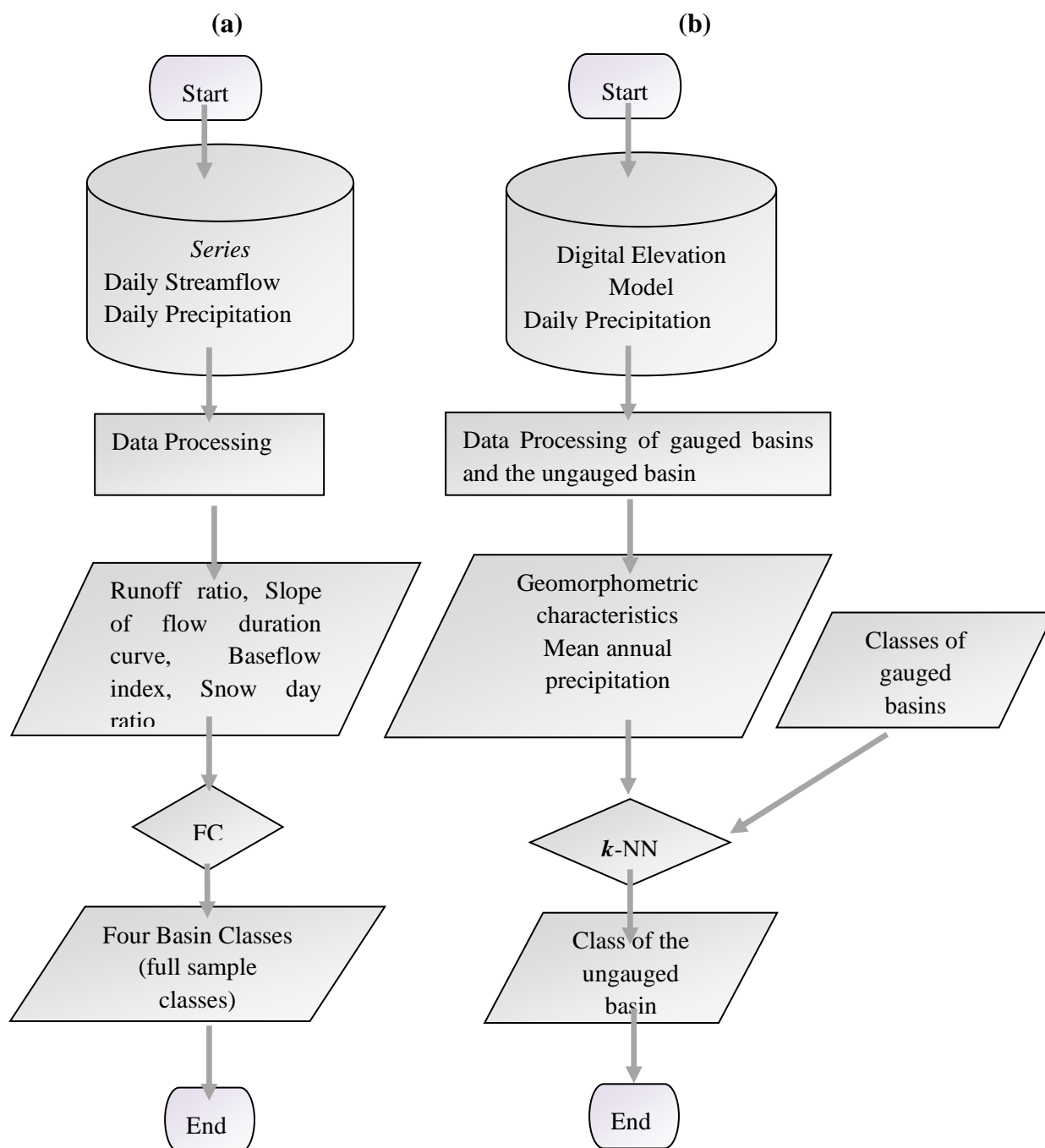


Figure. E.1: Flowchart of steps of the proposed methodology: (a) Step 1; (b) Step 2.

Twelve geomorphometric characteristics are taken into account, which are circularity ratio, drainage density, ruggedness number, average basin slope, basin slope interquartile range as the difference between the 75 % and the 25 % quantiles for ground slope, average aspect, average plan curvature, average topographic wetness index, interquartile range of topographic wetness index, average of local height above nearest drain (HAND), Interquartile range of HAND, and main channel slope. Local topographic wetness index (TWI) is given as $\ln(a/\tan b)$, where a is the specific catchment area (the cumulative upslope area divided by the contour width) and b is local slope (Beven and Kirkby 1979). Also, HAND is calculated for each DEM cell, as mentioned in Introduction. Evidently, HAND is directly affected by errors in the

definition of the stream network (Gharari et al. 2011; Nobre et al. 2011; Papageorgaki and Nalbantis 2013; Rahmati et al. 2018). All those characteristics have been calculated based on information of surface elevations that is readily available in a DEM.

For the recognition of the hydrological class of an ungauged basin the well-known k-Nearest Neighbour (k-NN) algorithm is employed (Freidman et al. 1977) as a simple method for supervised classification.

It is also necessary to note that the features are pre-processed before being presented to the classification method. The pre-processing is performed using the well-known method of Principal Component Analysis (PCA) (Hald, 1998; Farebrother, 2022).

The unclassified basin is presented to the algorithm and k basins that are the nearest neighbours of the test basin in the feature space are used so as to assign the most frequent class of them to the ungauged basin.

Last, the framework is validated as a whole, i.e., with both Step 1 and Step 2, by assessing its generalisation capacity using the well-known jack-knife method (Efron, 1982) which has been applied in other research works in hydrology (Castiglioni et al., 2009; Tsakiris et al., 2011). Overall, the method is implemented in the following way: (1) Step 1 is applied to the whole set of gauged basins, which allows to define basin classes and assign each basin to a specific class, which is stored as the “full sample” basin class; (2) one basin is considered ungauged and is taken out of the full basin sample which is again presented to the classification method (Step 1) to determine new classes, herein defined as the “reduced sample” basin classes; (3) Step 2 of the proposed methodology is then applied using the “reduced sample” classes, which allows the assignment of the tested ungauged basin to one of the reduced sample classes, herein called the “predicted” class; (4) the process is repeated by sequentially assigning the role of the ungauged basin to all basins of the full sample, which allows to obtain the “predicted” class for each “ungauged” basin; this, in turn, allows the computation of the success rate, SR, defined as follows (Eq. E.1)

$$SR = 100 \times \frac{n_s}{n} \quad (\text{E.1})$$

where n_s is the number of cases that a “predicted” class is identical to the respective “full sample” class and n is the total number of cases tested, i.e., the number of times that the methodology is applied. Criterion SR ultimately expresses the success of the proposed methodology as a whole. The flowchart of Figure E.2 gives an outline of the computations involved in the above validation process.

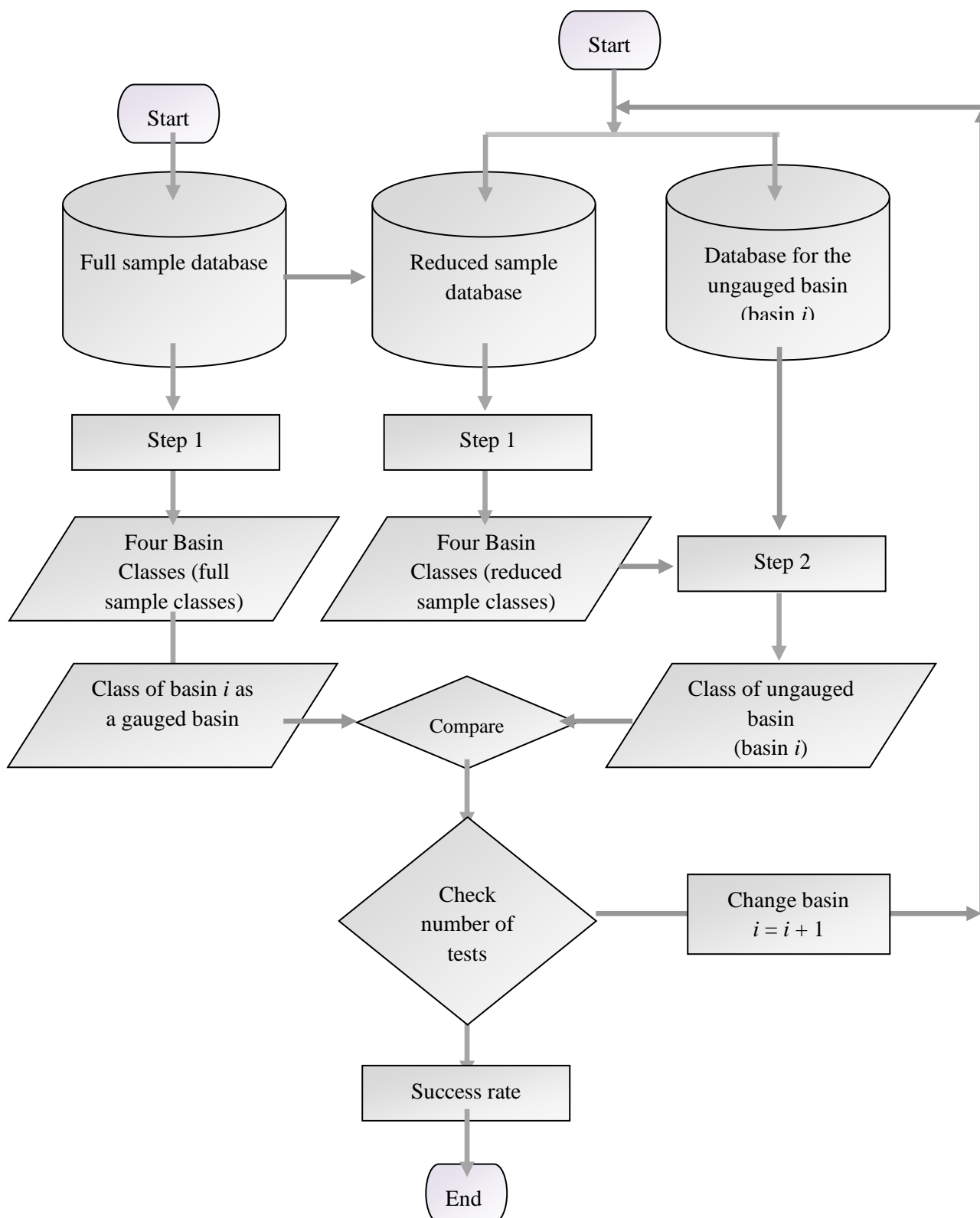


Figure. E.2: Flowchart of the validation process of the proposed methodology.

E3. Extraction of drainage network

For the extraction of the hydrographic network based on a DEM, a parameter's threshold is needed. The upslope contributing area threshold, herein referred to as the Critical Support Area (CSA), is the critical quantity that allows for the extraction, from a DEM, of useful hydrological information. The goal of the proposed methodological framework is to describe the necessary steps for the objective extraction of a drainage network. The spatial variation of CSA is investigated by examining relationships between CSA and geomorphometric characteristics, to better define CSA in practical applications.

A mapped stream network from conventional maps is exploited in combination with the stream network derived from a DEM with a spatial resolution of 30 m, obtained from the Global SRTM DEM. The map-derived stream network includes both perennial and ephemeral or intermittent streams. CSA values are estimated for heads of both perennial and intermittent streams. The spatial variation of CSA is investigated by examining relationships between CSA and selected geomorphometric characteristics. Hence, studying both the temporal and spatial variation of CSA becomes mandatory. The relationship between CSA and geomorphometric variables is explored using regression analysis.

CSA for each stream head identified on a DEM is measured as the total number of cells discharging into the head with a contribution of one unit of water quantity. The CSA value is attributed to the studied stream head along with the above-mentioned geomorphometric characteristics calculated for the same upslope area. To check for redundancy in the geomorphometric characteristics, their cross-correlation coefficients are computed. Then, regression analysis is performed by implementing functions in the MATLAB computing environment. Only linear relations are examined. The goal of regression analysis is to explore the relationship between geomorphometric characteristics and CSA by creating a model that summarizes our understanding about this relationship. Apart from using the complete samples for stream heads in regression analysis, detection and removal of outliers are also carried out in the hope to enhance the quality of the explored relationship.

The methodological framework includes five steps which are described next.

Step 1 involves the digitization of heads of perennial and intermittent streams from projected conventional maps. Heads of perennial and intermittent streams represent two conditions of stream network related to the dry and wet season, respectively.

In Step 2, information on the location of stream heads is transferred from the used map to the DEM-based hydrographic network using a snapping procedure. This procedure ensures the selection of cells with high accumulated flow as the representations of channel heads. This step is applied twice (for the dry and wet season) using a vector-to-raster conversion. For all cells selected as stream heads, the upslope contributing area is defined and the corresponding values of CSA are computed.

In Step 3, geomorphometric characteristics are assessed, which serve as the explanatory variables in a regression analysis for each season separately. The examined geomorphometric characteristics include:

- the average ground slope;
- the standard deviation of ground slope;
- the average of the square root of ground slope;
- the standard deviation of the square root of ground slope;
- the mean value of Height Above the Nearest Drain (HAND);
- the standard deviation of HAND.

All the above quantities refer to the upslope contributing area.

Step 4 is devoted to regression analysis with the upslope contributing area being the dependent variable and the geomorphometric characteristics of Step 3 as the independent variables. Only linear relationships are considered. Their statistical significance is checked using the well-known F-test. The procedure of Step 4 is applied to data from three basins. Also, the median of CSAs is used as the simplest modelling option for predicting CSA as proposed in our previous study (Papageorgaki and Nalbantis, 2017).

In Step 5 the final values for CSA for each basin are selected.

Note that all previous steps, except Step 1, are executed twice, i.e., separately for each season. It is reminded that each stream head is necessary to be connected to the basin outlet through a continuous series of river segments.

E4. Width Function Unit Hydrographs

For the extraction of the hydrographic network of a basin, Papageorgaki and Nalbantis (2018) investigated the possibility of simultaneously exploiting available topographic information from classical maps and information derived from a DEM. The critical quantity that is proposed and can be used as a threshold is the Critical Support Area (CSA). Papageorgaki and Nalbantis (2018) proposed the use of different CSAs for each season, i.e., one for the wet season of the year, which includes both ephemeral and perennial streams, the CSA for the dry season in which only perennial streams are considered as channels; and the average of the above two CSAs, which may be considered as representative of the intermediate seasons (autumn, spring), the season definition depending on flow regime.

Also, an alternative method for the extraction is used for comparison purposes. This is the one proposed by Tucker (2001), in which a combination of slope-area and support area is selected as threshold. That method is based on the assumption that the critical shear stress is proportional to $\sqrt{A_i} S_i$, where A_i is the upstream contributing area (m^2) for cell i , and S_i is the local ground slope (m/m). In practice, a threshold is imposed to $A_i S_i^2$ which, in this work, was set at $4000 m^2$ as suggested by Di Lazzaro (2009). Both methods for the extraction of hydrographic network are employed within the concept of Width Function, which is used to achieve the goal of this part of research, i.e., the construction of the Synthetic Unit Hydrograph of an ungauged basin. Width Function is defined as the probability density function of total path length from point i of the basin to the basin outlet, L_i . The flow path length related to hillslopes is termed as “hillslope length”, and is denoted as $L_{h,i}$, while the path length related to channel flow is named “channel length” and is symbolized as $L_{c,i}$. The total path length from point i of the basin to the basin outlet, L_i , is

$$L_i = L_{h,i} + L_{c,i} \quad (E.2)$$

By assuming that the above length is a continuous random variable L , the Width Function of the studied drainage basin, $WF(L)$, is approximated as

$$WF(L) = \frac{\sum_{i \in \gamma(L)} \Delta A}{\sum_{i \in [1, N]} \Delta A} \quad (E.3)$$

where $\gamma(L)$ is the index set of pixels found at distance L from the basin outlet (Gupta et al., 1986) and ΔA is pixel area.

The classical Rescaled Width Function (Rinaldo et al., 1995), herein denoted as cRWF, is expressed through a relationship that is analogous to Eq. E.3, but considers the travel time T as the continuous variable of interest, i.e.

$$\text{cRWF}(T) = \frac{\sum_{i \in \gamma'(T)} \Delta A}{\sum_{i \in [1, N]} \Delta A} \quad (\text{E.4})$$

where $\gamma'(T)$ is the index set with travel time T up to the basin outlet.

The approach of Rescaled Width Function, or RWF, is adopted in the form of two versions: (i) the above-mentioned classical RWF (cRWF), and (ii) a modified version by Di Lazzaro et al. (2015) termed ddRWF), which considers the drainage density of the stream network.

All pixels are categorized in pixels that represent channels and pixels that are characterized as hillslopes. Consequently, water transfer processes are categorized into those related to water movement on hillslopes, and flow within the various channels of the hydrographic network.

Note that the flow velocity is u_h for hillslopes and u_c for channels. So, the travel time from point i to the basin outlet is calculated as

$$T_i = \frac{L_{h,i}}{u_h} + \frac{L_{c,i}}{u_c} \quad (\text{E.5})$$

Also, the assumption by Di Lazzaro et al. (2015) that the runoff production at point i is an increasing function of drainage density of the power type is tested. Drainage density was taken as the of the double distance to the nearest stream (Horton, 1945). This distance was defined as the hillslope flow path length $L_{h,i}$ for every point i of the basin. The drainage density at point i is defined as

$$\text{dd}_i = \frac{1}{2L_{h,i}} \quad (\text{E.6})$$

Di Lazzaro et al. (2015) adopted the assumption that the runoff production at point i is an increasing function of drainage density of the power type. To implement this, they included a weighting factor in Eq. E.4 and, specifically, the factor

$$\phi_i = (\text{dd}_i)^\beta \propto (L_{h,i})^{-\beta} \quad (\text{E.7})$$

Thus, the drainage-density weighted Rescaled Width Function, or ddRWF is obtained as

$$\text{ddRWF}(T) = \frac{\sum_{i \in \gamma''(T)} \Delta A (L_{h,i})^{-\beta}}{\sum_{i \in [1, N]} \Delta A (L_{h,i})^{-\beta}} \quad (\text{E.8})$$

where $\gamma''(T)$ is an index set absolutely analogous to $\gamma'(T)$ of Eq. E.4.

The results of Rescaled Width Function in both forms are compared with the results of triangular Synthetic Unit Hydrograph (SUH) (Chow et al., 1988).

Both analytical forms of WFIUH include kinematic parameters which are representative or effective flow velocities for hillslopes (u_h) and channels (u_c). For the cRWF Di Lazzaro (2009) used rainfall and runoff data from 12 gauged basins in Central Italy to estimate kinematic parameters. He, also, performed a regional analysis of used parameters to relate them to morphometric and geologic characteristics. For channel flow velocity (u_c) the following relationship was found

$$u_c = aS^m \quad (\text{E.9})$$

where S is the average slope of flow paths, while a and m are constant parameters whose values were found to be 5.83 m/s and 0.275, respectively (Di Lazzaro et al., 2015).

The hillslope flow velocity (u_h) was found to be uncorrelated to the average basin slope. The hillslope flow velocity was found to getting smaller as the carbonaceous formations increase in basins. For this kinematic parameter the following expression was found

$$u_h = -0.0227C + 0.03 \quad (\text{E.10})$$

where C is the fraction of total basin area covered by carbonaceous formations.

As average channel flow velocity is the most significant parameter of the ddRWF, in this thesis a methodological framework to estimate this parameter for ungauged basins is examined. The base channel flow velocity $u_{c,b}$ is estimated using the hourly Unit Hydrograph from a gauged basin. Then, the channel flow velocity $u_{c,i}$ for any ungauged basin i in the study region is given by the following equation:

$$u_{c,i} = u_{c,b} \left(\frac{S_{c,i}}{S_{c,b}} \right)^m \quad (\text{E.11})$$

where $S_{c,b}$ and $S_{c,i}$ are the average basin slopes for the base and the studied basin respectively. Furthermore, for ddRWF the value of m is selected as it is found by Di Lazzaro (2009) for cRWF. Finally, the values of variables ‘hillslope length’ and ‘channel length’ are used to calculate the ddRWF, which is used to construct the Synthetic Unit Hydrograph of the study basin.

E5. Effect of DSM uncertainty on the extent of inundated area

The common procedure for flood mapping consists of a few calculation steps that require the use of spatial information which can be easily obtained from a Digital Surface Model (DSM). Those steps include the construction of direct runoff hydrographs, flood routing and the mapping of temporally maximum inundated area. The land surface of the drainage basin is represented through a DSM, and the impact of uncertainty in ground elevation on the extent of inundated areas due to flooding is investigated. Monte Carlo simulation is employed through introducing errors in elevation with a standard deviation equal to σ . To characterize the inundated area, the 90% quantile of the inundation extent and inundation topwidth for peak water level at specific river cross sections are employed. For topwidths, apart from point estimates, also interval estimates are acquired using the bootstrap method.

A DSM of high accuracy is acquired, which serves as the basis for computations and is herein called the “reference” DSM. The methodology for testing the effect of DSM uncertainty consists of the following:

- production or selection of the reference DSM,
- production of erroneous DSMs,
- application of hydrological and hydraulic models and calculation of flow characteristics (discharge, water depth, and water velocity),
- delineation of the maximum inundated area, and
- calculation of numerical criteria that characterize the inundated area.

It is also noted that the investigation of the uncertainty of the DSM on the inundated area extent was part of the project entitled “Effect of uncertainty of Digital Surface Models on the uncertainty of inundated areas due to flooding”, which was in part financed by the Program for Reinforcement of Basic Research of the National Technical University of Athens.

The two test basins selected are ungauged, which precluded the use of observed discharges and model calibration. The quantification of uncertainty in DSM included the following stages: (i) a highly accurate DSM is considered as the reference DSM having absolute errors of known

standard deviation, σ_r ; (ii) multiple erroneous DSMs are constructed that are of known standard deviation of the absolute errors, σ_e ; the additional errors, that is, the differences between the absolute errors of the reference DSM and the errors in each one of the erroneous DSMs are assumed to be normally distributed with zero mean, standard deviation σ , and zero cross-correlation. From the above assumptions, it follows that

$$\sigma = \sqrt{\sigma_e^2 - \sigma_r^2} \quad (\text{E.12})$$

Additional errors are generated using Monte Carlo simulation and are added to the elevations of the reference DSM. Their standard deviation is obtained through Eq. E.12 with known σ_r and assumed σ_e . The latter is chosen to represent deteriorated information from real-world cases. A set of 500 DSMs is generated.

SRTM data are also used so as to account for real sources of uncertainty. SRTM DEM has been made available at the resolution of 1 arc second for global coverage (~ 30 m) and has been used for modelling of river flows in large and data sparse or ungauged fluvial systems (Neal et al., 2012; Andreadis et al., 2013; Schumann et al., 2010). It is however known to suffer from errors that are more pronounced in areas with rugged topography and dense vegetation. Assessments of the magnitude of these errors, at the global and regional level, are abundant (Berry et al., 2007). As for the two test basins, the statistics of errors are estimated, such as the elevation bias and the standard deviation.

The indices that can characterize an inundated area are the temporal maximum inundation extent, A , and the temporal maxima of three quantities that vary with cross-section i : water depth at the flow axis, d_i , section-averaged water velocity, V_i , and inundation topwidth, W_i . Quantities d_i and V_i are obtained from model output, whereas W_i is calculated based on d_i and cross-section geometry. The topwidths combined with cross-section distances allow to obtain A . Using only widths implies ignoring the exact position of the inundated area boundary in the transverse direction with respect to the flow axis.

In cases with the reference DSM and deterministic rainfall, all the above quantities take unique values. In cases with erroneous DSMs or rainfall, the use of quantiles with 90% probability of non-exceedance is required, that is, the 90% quantile of A , d_i , V_i , and W_i , respectively denoted as A_{90} , d_{90i} , V_{90i} , and W_{90i} for each cross-section i . The selection of probability is dictated by two conflicting requirements (Candela et al., 2005; Nalbantis and Lymperopoulos, 2012): the desire for a high degree of safety and an acceptable accuracy that is achievable using reasonable sample sizes in Monte Carlo simulations.

Graphs of W_{90i} versus distance along the flow axis allow perceiving the variation of the local inundation width. Similar graphs for other variables provide further information on the inundated area.

To characterize a flood as a whole, apart from A , the use of the following metrics is proposed: the spatial median, $W_{90\text{med}}$, of W_{90i} , representing the spatially averaged width of the inundated area, and the maximum value of W_{90i} , $W_{90\text{max}}$, which indicates the largest width of that area. The quantities A_{90} , $W_{90\text{med}}$, and $W_{90\text{max}}$ refer to hydrologic extremes, and as such, they are expected to vary linearly with the logarithm of the return period, T . This led us to adopt the linear relationship

$$y = c_2 + c_1 \log_{10} T \quad (\text{E.13})$$

where y is the analysed quantity, $\log_{10}(T)$ is the base-10 logarithm of return period, and c_1 and c_2 are parameters; the quality of the relationship is given by the determination coefficient, R^2 . Because, in this work, the values of T are multiples of 10, parameter c_1 of Eq. E.13 is the average (over all return periods) increase of y for a 10-fold increase of T .

All quantities discussed up to now refer to “point” estimates of the inundation extent, whereas information on the uncertainty of these estimates is also necessary. The analysis was restricted on the uncertainty of W_{90i} for each cross-section i . The well-known Bootstrap method is employed (Efron, 1979a; 1979b). The length of the 95% confidence interval of each W_{90i} is obtained and, then this is divided by the corresponding “point” estimate to provide the relative range of W_{90i} , denoted as RR_{90i} which expresses the relative uncertainty of the “point” estimate of W_{90i} .

E6. Semi-distributed Rainfall-runoff modelling using landscape classification

Runoff prediction in ungauged basins requires the transfer of hydrological information in space, which is greatly facilitated by using physically observable quantities, such as geomorphological characteristics. These allow the landscape classification for the identification of areas that are distinct with respect to the predominant runoff generating mechanisms. Landscape classification is performed using orthophotos and a neural network as the classifier. The output landscape classes are used as the initial spatial units in a semi-distributed rainfall-runoff model. The proposed methodological framework is applied to three Greek basins with encouraging results.

The principles of the methodology described by Gharari et al. (2011) are adopted. The HAND-based hydrologic landscape classification distinguishes between three hydrologically, ecologically and morphologically different landscape units, which, are referred to as wetland, hillslope and plateau (Renno et al., 2008; Nobre et al., 2011).

According to the proposed framework, the surface of the studied drainage basin is classified using five criteria: the Height Above the Nearest Drainage (Saleska, 2011), ground slope, aspect, and the distance from the nearest drain or branch of the hydrographic network, considered along the flow direction path. For the computation of HAND and distance the hydrographic network of the basin is constructed following the methodology proposed by Papageorgaki and Nalbantis (2018). For this, the CSA for stream initiation is extracted from maps for three periods for wetness conditions: wet, dry and intermediate. Orthophotos are used to visually classify selected points or benchmarks within the basin in four classes. These points are later introduced as the training dataset into an Artificial Neural Network (ANN) with one hidden layer to classify all cells of the test basin (Ehsani, 2007). The ANN is trained using 70% of benchmarks, while the remaining 30% is devoted to testing and validation.

Four landscape classes are extracted, which are: bare soil areas (class 1), forested hillslopes (class 2), cultivated hillslopes (class 3) and riparian areas (class 4). These classes are related to the classification by Winter (2001) and Scherrer and Naef (2003), who also linked them to four dominant runoff mechanisms (Freer et al. 2002). The question whether the hydrological landscape systems function in parallel or in series is an important issue. So, whether there is significant connectivity or not depends on local conditions, for which different conceptual model structures need to be tested. In this thesis, the concept of landscape classification into hydrological landscape classes is used for the estimation of runoff, through an adapted version of FLEX–Topo semi-distributed rainfall-runoff model by Savenije (2010).

Through the FLEX–Topo model and for each landscape class, parameters of a lumped model are calculated. By using the concept of hydrological similarity, the transfer of those parameters to the same landscape class of an ungauged basin allows the prediction of the hydrological behavior of this ungauged basin. The only requirement for the transfer is the classification of

the basin into landscape classes using geomorphological features, which are easily extracted from data from the widely available DEM.

According to the proposed methodological framework for hydrological classification, it is possible to transfer hydrological information between identical landscape classes of other basins. This is investigated using the Nash-Sutcliffe Efficiency criterion of model performance.

E7. Materials: Study areas and data

E7.1 Basin classification

The study basins selected for investigation are shown in Table E.1, and on the map of Figure E.3. These are 24 in number and cover a part of mainland Greece with basin areas that range from about 50 km² to about 5000 km². Their outlets coincide with hydrometric stations labeled through the identification number (ID) of the Hydroscope Database maintained by the Ministry of the Environment and Energy, Greece.

Table E.1: The study basins for basin classification

No	Hydroscope ID of hydrometric station	Basin area (km ²)	No	Hydroscope ID of hydrometric station	Basin area (km ²)
1	30055	920.7	13	30379	80.4
2	30091	202.3	14	30391	1541.6
3	30102	358.6	15	30399	362.5
4	30169	88.8	16	30403	1889.4
5	30312	538.0	17	30406	957.1
6	30315	217.9	18	30407	202.1
7	30317	1384.9	19	30408	636.4
8	30326	782.4	20	30435	66.8
9	30353	835.1	21	30549	5007.1
10	30366	245.5	22	30551	829.7
11	30372	299.2	23	30564	399.9
12	30378	170.0	24	30650	49.7

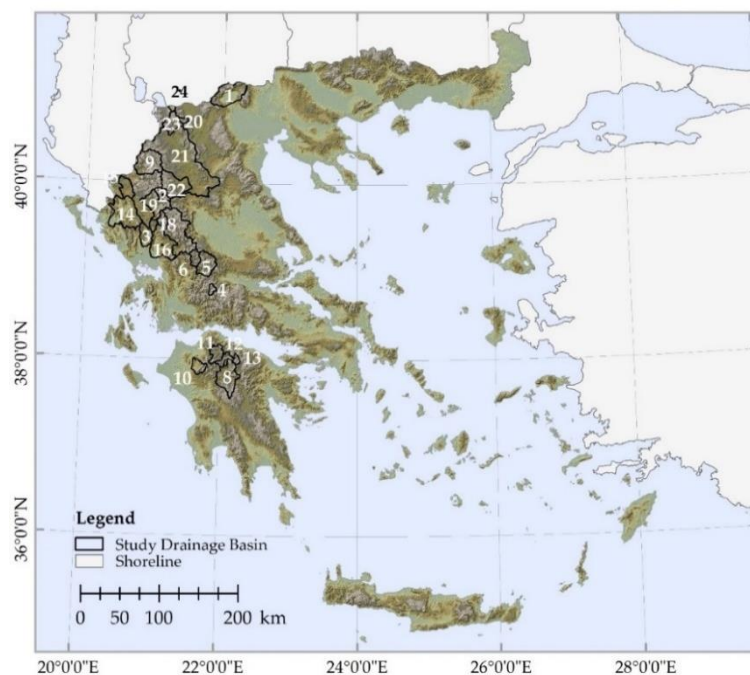


Figure E.3: The locations of the study basins and the Digital Elevation Model.

The hydrological data used in this study included the following: (a) Time series of daily average rates of streamflow; (b) time series of daily rainfall depths for 47 rain gauge stations; (c) time series of daily snowfall depths for the stations used for rainfall. In most, cases, the total duration of time series was ten hydrological years.

The DEM for the study area was obtained from the second version of the global DEM (GDEM) known as ASTER from the name of the sensor used for its derivation (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). The second version of the product (ASTER GDEM2) is used, which has been released by NASA in 2011. The accuracy of this DEM for the Greek territory has been known to us through the work of Ioannidis et al. (2014).

E7.2 Extraction of drainage network

Three river basins were selected for tests, which are presented in Figure E.4. All river basins are located in western mainland Greece. The first study basin (Figure E.4, a) is the Agraphiotis River Basin having an area of 217.9 km². It is characterized by a mountainous topography, with a mean ground elevation of 1180 m and an average ground slope of 29.8 degrees. The Tavropos River basin (Figure E.4, b) has an area of 538 km², a mean ground elevation of 1055 m and an average ground slope of 24 degrees. The third basin is related to a tributary of the Acheloos River known as Krikeliotis River, and has an area of 88.8 km². It is characterized by a mountainous topography too, with a mean ground elevation of 1296 m and an average ground slope of 20.2 degrees. As shown in Figure E.4, the number of stream heads for perennial and intermittent streams differs significantly from one basin to another.

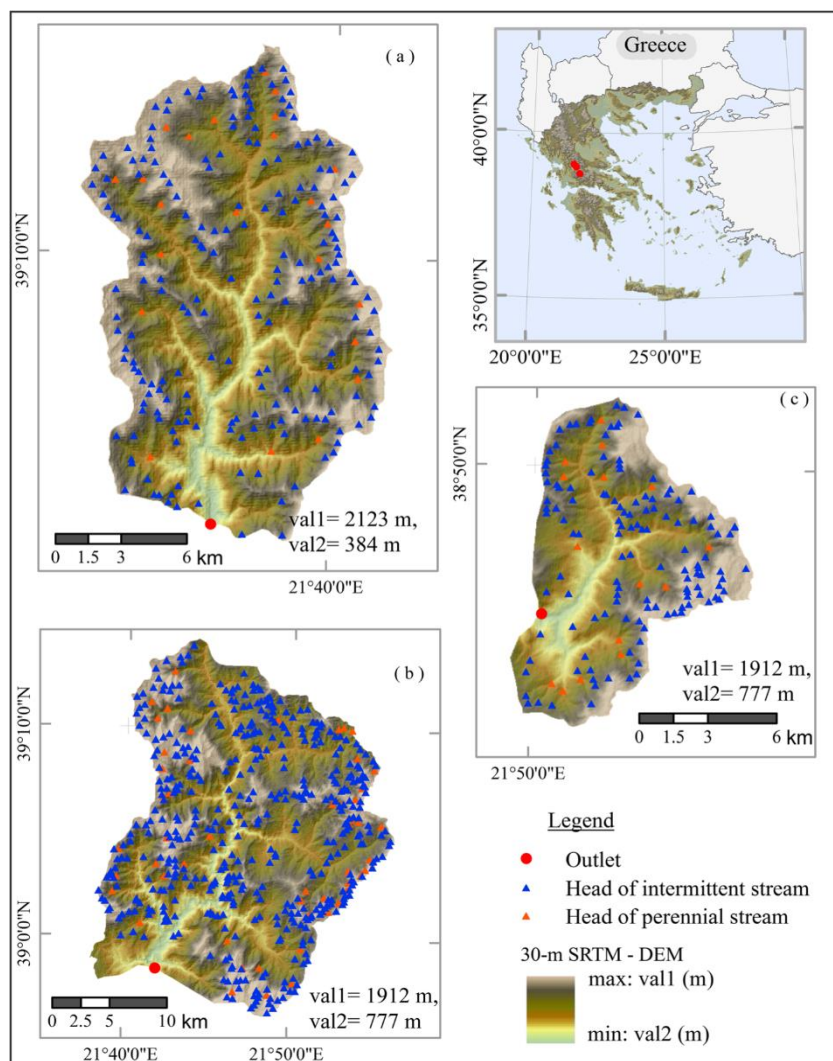


Figure E.4: The study basins: (a) Agraphiotis River basin, (b) Tavropos River basin, (c) Krikeliotis River basin.

Two kinds of spatial information are used for the definition of the Critical Support Area and therefore for the extraction of river network of each basin. These include the following: (i) conventional maps at the scale 1:50000 covering the study area; and (ii) an 1-arc-second Global coverage SRTM DEM. The 1-arc-second Global SRTM product offers worldwide coverage of void filled data at the resolution of 30 m. It was tested in previous studies with regard to its accuracy and reliability (Nalbantis et al., 2017).

E7.3 Width Function Unit Hydrographs

The RWF method is applied to six drainage basins in Greece, in one of which the 1-h Unit Hydrograph derived from rainfall and runoff data is available. The selected river basins are b01: Evinos river basin (883 km²), b02: Peneios river basin, at Sarakina Bridge (1056 km²), b03: Geropotamos river basin (28 km²), b04: Evrotas river basin at Selasia (1672 km²), b05: Louros river basin at the homonymous dam (346 km²), and b06: Sarantapotamos river basin (244 km²). The basins are depicted in the figure below (Figure E.5).

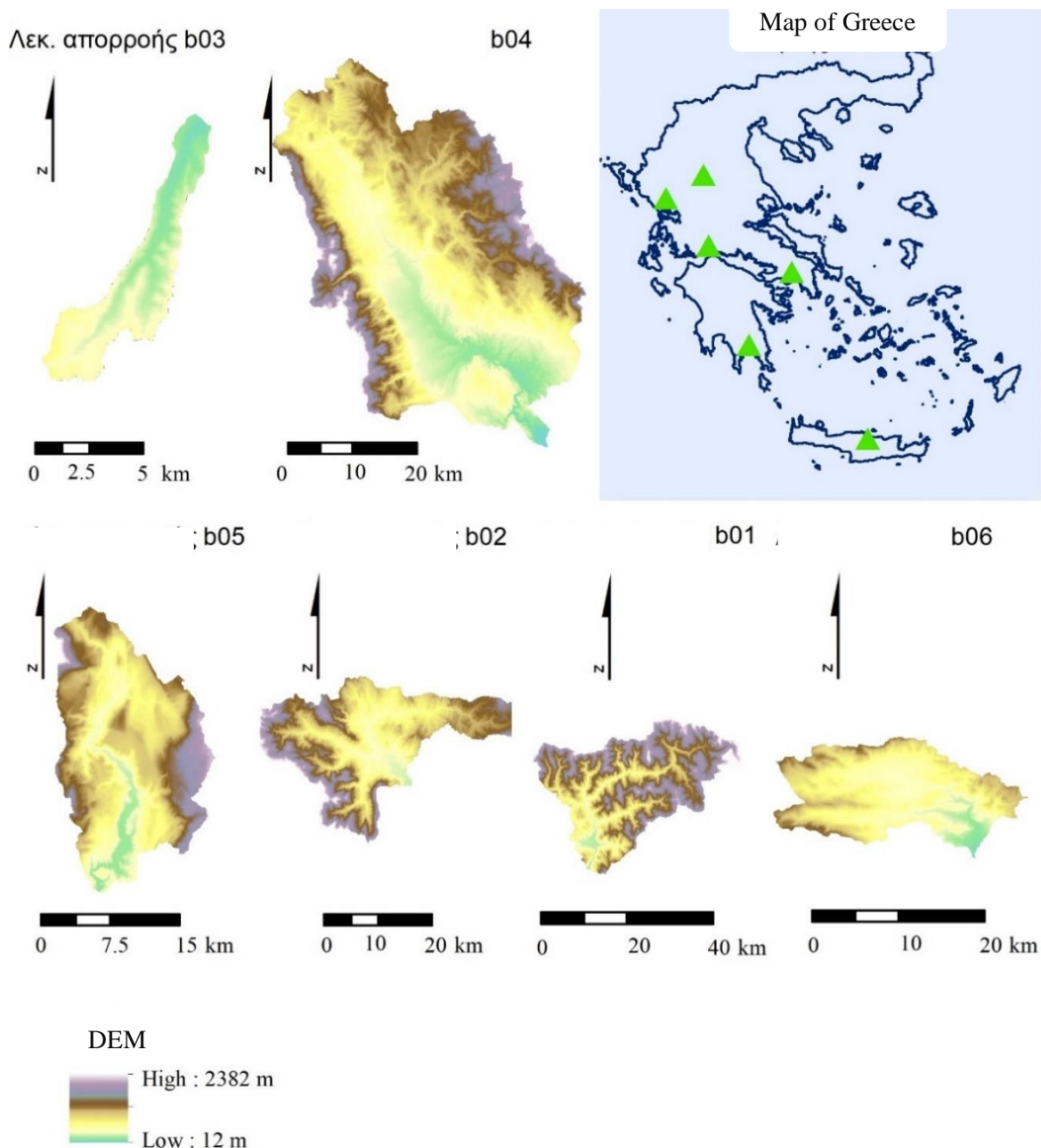


Figure E.5: The selected river basins.

The above-mentioned river basins, except Evinos river basin, were used in a previous study of Nalbantis and Papageoraki (2015). The DSM of the study was the SRTM DEM, but all calculations are performed from the beginning using the EU-DEM (Fahrland, 2020), for all six basins. In Figure E.5, the spatial distribution of the ground elevation is presented according to the Copernicus EU-DEM.

E7.4 Effect of DEM uncertainty on inundated area extent

Two drainage basins were selected for tests of the proposed methodological framework, these are the basin of the Southeast Kalyvia Torrent (Figure E.6, left), which is located in Eastern Attica, and the basin of the Kerynitis River in Peloponnese (Figure E.6, right).

The basin of the Southeast Kalyvia Torrent is a small basin with an area of 21.7 km². It is semi mountainous with a mean ground elevation of 213.4 m in its upper subbasin (7.4 km²) and 115.6

m in the lower subbasin (14.3 km²). The respective average ground slopes are 19.3% and 17.6%. The lower sub-basin does not include the delta of the broader basin.

The second basin is that of the Kerynitis River. This includes a mountainous upper subbasin with an area of 79.6 km², mean ground elevation 886.9 m, and average ground slope 41.8%. The lower subbasin is 10.2 km² in size with a mean ground elevation equal to 135.3 m and an average ground slope of 22.7%. The basin is located in Northern Peloponnese to the east of the city of Patras and discharges its waters to the Corinthian Gulf that separates Peloponnese from mainland Greece.

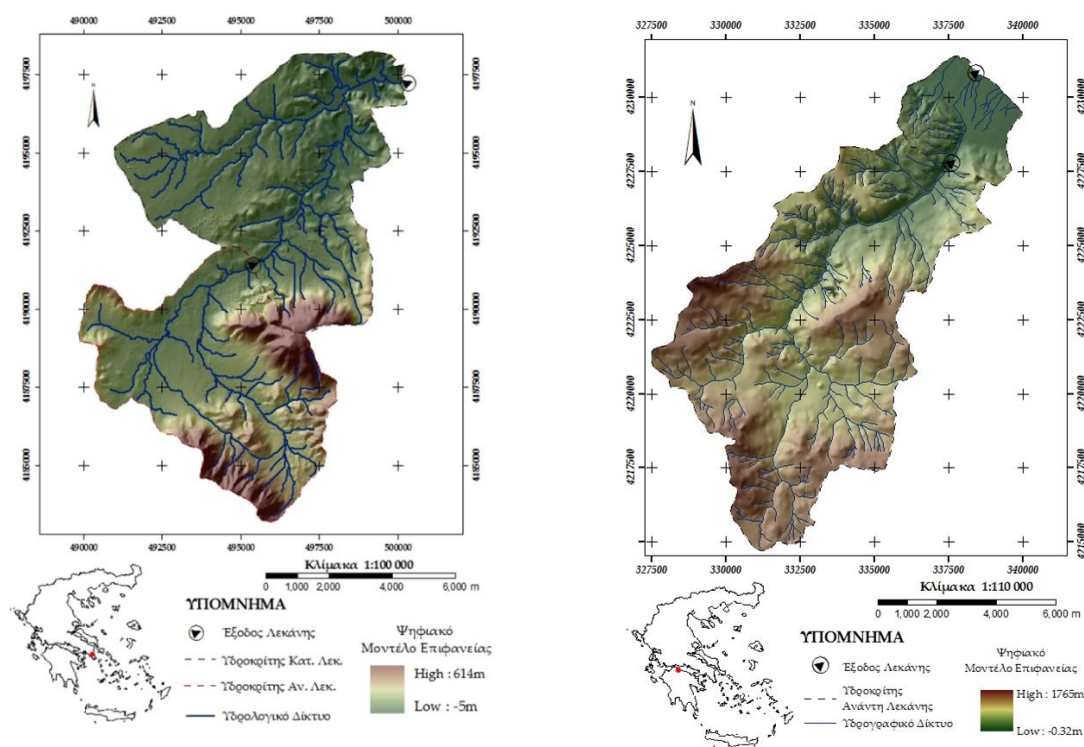


Figure E.6: The study basin of of the Southeast Kalyvia Torrent (left) and of the Kerynitis River (right).

Two kinds of raw information were used for the production of the Southeast Kalyvia Torrent's basin DSM. First, a DSM was provided by the Laboratory of Photogrammetry of the National Technical University of Athens, which covered the lower subbasin and only a small part of the upper subbasin. In addition to the above, conventional maps at the scale of 1:5,000 for the upper subbasin were used. The above-mentioned kinds of data are merged to form a single DSM through correcting elevations in overlapping areas and applying also corrections for continuity of the hydrographical network.

The effect of errors in DSM is investigated on the part of DSM regarding the lower subbasin (herein, denoted as the reference DSM). For this, the standard deviation of absolute errors in elevation is estimated at 0.75 m. For erroneous DSMs, two values of the standard deviation of absolute errors in elevation are considered: (a) 0.98 m, which corresponds to the requirements of the Greek Land Register SA (2005); and (b) 2.0 m, which is a lower bound in the accuracy of conventional maps at the scale of 1:5,000. The standard deviation of additional errors, σ , is 0.63 m and 1.85 m, respectively for the two cases.

Apart from the reference DSM, the SRTM DEM is also used at the 1 arc-second scale. Elevation error statistics for SRTM DEM data showed that this data tend to overestimate elevation by 2.78 m on average; as for the standard deviation of errors, this was 6.24 m, or about ten times greater than that of the low uncertainty synthetic DSMs and three times greater than that of the high uncertainty synthetic DSMs.

For the basin of Kerynitis River, the DSM was produced on the basis of two kinds of raw information: (a) conventional maps at the scale of 1:5,000 covering the lower subbasin; and (b) conventional maps at the scale of 1:50,000 for the upper subbasin. For the production of the DSM, a typical procedure was followed which is similar to that for the first basin. The DSM was produced as a 5×5 m grid.

For the second case we adopted half the value of σ used for the first case, that is 0.66 m. In the case with $\sigma = 1.32$ m, the DSMs showed a very erratic character of the ground surface, whereas the starting information corresponds to a relatively mildly sloping terrain; unrealistic fluctuations in river section elevations led us keep only the case with $\sigma = 0.66$ m.

The SRTM DEM is also used, for the lower part of the basin. This was found to overestimate elevations by 1.45 m on average; whereas its standard deviation of errors was 13.49 m, which is about 20 times greater than that of synthetic DSMs. The horizontal spatial step in cross sections was 20 m for all kinds of DSM and all basins, which is four times the grid size for the reference and synthetic DSMs and less than the grid size of SRTM DEM.

E7.5 Semi-distributed rainfall-runoff modelling using Landscape classification

The proposed methodology for the landscape classification is applied to three river basins in the western part of continental Greece. The Evinos river basin has with an upstream basin area of 883 km², mean elevation of 979 m above the mean sea level, and steep slopes (Figure E.7, left). Its average annual streamflow is 694 hm³ (Mamassis and Nalbantis, 1995). Data cover the period from 1977–78 to 1985–86. Six precipitation gauging stations are used while air temperature measurements from two meteorological stations are obtained. For landscape characteristics, the European Digital Elevation Model (Copernicus, EU-DEM version 1.1) with spatial resolution of 25 m is used. For landscape characteristics, the European Digital Elevation Model (Copernicus, EU-DEM version 1.1) with spatial resolution of 25 m is used.

Agraphiotis river basin has an upstream basin area of 218.2 km², mean elevation of 1189.9 m above the mean sea level, and the mean ground slope is 28.49 ° (Figure E.7, center).

Krikeliotis river basin (Figure E.7, right) has an upstream basin area of 88.6 km², mean elevation of 1297.5 m above the mean sea level, and steep slopes. The minimum elevation at the outlet of the basin is 798.4 m above mean sea level. The mean ground slope is 18.66 °. All river basins are considered gauged.

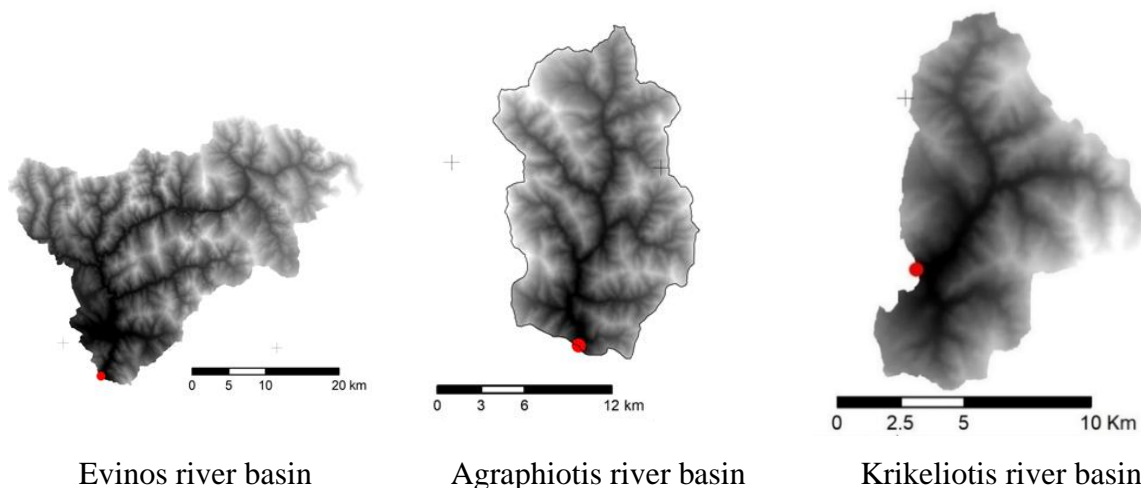


Figure E.7: Spatial distribution of elevations of tested river basins, in western continental Greece: Evinos (left), Agraphiotis (center) and Krikeliotis river basin (right). The outlet of the basin is presented with a red circle.

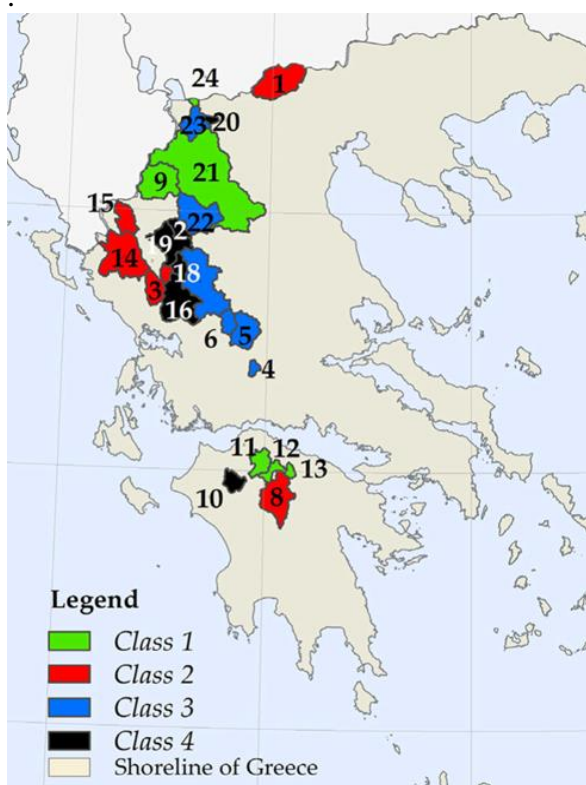
E8. Results and discussion

E8.1 Basin classification

Four basin classes are emerged from the classification of basins selected for tests All 24 basins were classified against hydrological signatures. The basins that belong to these classes are the following: class 1: basins with numbers 9, 11, 12, 13, 21, and 24; Class 2: 1, 3, 8, 14, 15, and 17; Class 3: 4, 5, 6, 7, 22, and 23; Class 4: 2, 10, 16, 18, 19, and 20. These basin classes are shown on the map of Figure E.8.

The connection between the dominant hydrological processes and basin classes is also examined through using the box-plot. The qualitative examination of these box-plots allows us to observe the following: (1) Basins of Class 1 show low Runoff Ratio, moderate Slope of FDC, moderate Baseflow Index, and rather low SDR; (2) Class 2 refers to basins with moderately high Runoff Ratio, low Slope of FDC, high Baseflow Index, and low SDR; (3) Class 3 assembles basins with moderately high Runoff Ratios, high slopes of FDC, moderate values of the Baseflow Index, and high values of SDR; (4) in Class 4 basins appear to show high Runoff Ratio, moderate Slope of FDC, low Baseflow Index, and low SDR; (5) in many cases the form of box-plots is not typical, which is due to the small sample size.

It was found that the selected hydrological signatures can provide sufficient information for distinguishing between runoff regimes stemming from different mixtures of hydrological processes. Also, the use of precipitation combined with the selected geomorphometric characteristics allowed for a highly successful recognition of the class of a basin in case the latter is considered as an ungauged basin.



- Class 1 (green) refers to basins with low runoff productivity, moderate runoff variability in time and moderate contributions of both baseflow and snowfall;
- Class 2 (red) refers to basins with moderate runoff productivity and low runoff variability due to the dominance of baseflow;
- Class 3 (blue) assembles basins with moderate runoff productivity, highly variable streamflows due to snowfall and moderate contribution of baseflow;
- Class 4 (black) includes basins which are highly productive, with their runoff appearing mainly as direct runoff with moderate variability in time and low contributions of baseflow and snowmelt.

Figure E.8: The representation of study basins in the space of hydrological signatures.

The success rate in recognising ungauged basins is over 95 %, for the testing methodology. In Figure E.9, the distribution of basins in hydrological signatures space is presented. Each basin is represented with one point in the 2D space of hydrological signatures. For the sake of understanding, in each sub-plot two signatures are used, one at each axis.

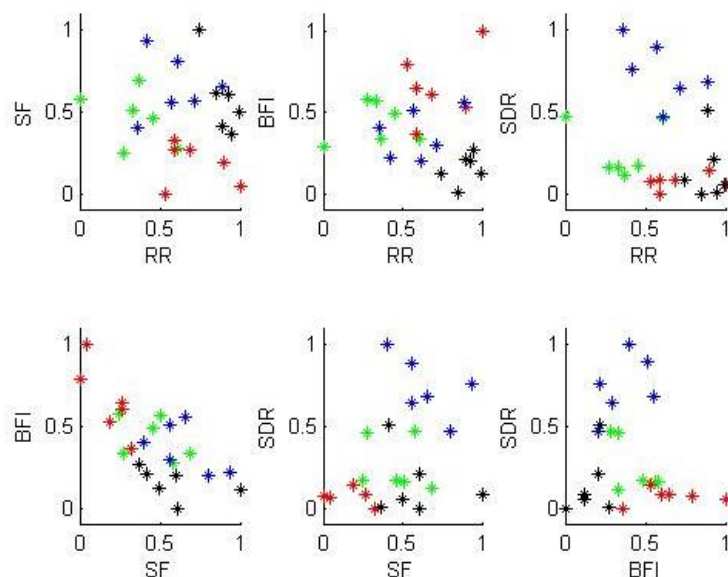


Figure E.9: The 2D representation of classified drainage basins in hydrological signatures space (with green, red, blue and black for class 1, class 2, class 3, and class 4 respectively).

After the basin classification, the rainfall-runoff modeling of two selected basins, basins numbered 6 and 4, which belong to Class 3 (Figure E.9), are used as a pair of similar basins. Basin with number 6 is the river basin of Agraphiotis River, which is used in the rainfall – runoff model as the ‘donor’ basin. The model parameters of Agraphiotis basin are transferred to the ungauged basin numbered 4.

In the above tested framework, for the basin of Agraphiotis River (the ‘donor’ basin) the lumped rainfall-runoff model parameters are calibrated and transferred due to the hydrological similarity between those two basins.

Hydrological similarity consists in the fact that both basins belong to the same class. In this framework, the basin of Krikeliotis River plays the role of the ungauged basin, that receives the model parameters from the ‘donor’ basin, while the ‘donor’ basin is considered gauged, i.e., with available observed time series of daily runoff at its outlet.

In Table E.2, the Nash Sutcliffe (NSE) index is calculated for the measured (historical) values of runoff at the basin’s outlet and the corresponding daily modeled ones, for daily, 3-day moving average and 7-day moving average window, and the basin of Agraphiotis River.

Table E.2: NSE Index for the Agraphiotis river basin.

	NSE Index for the moving window in days (d)		
	1	3	7
Calibration 1979-80 to 1982-83	0.282	0.339	0.425
Validation 1982-83 to 1985-86	0.409	0.498	0.619

In Figure E.10 the measured and the modeled daily discharges are presented for the calibration (upper graphs) and the validation (lower graphs) period; from left to right the time scale is one day, three and seven days.

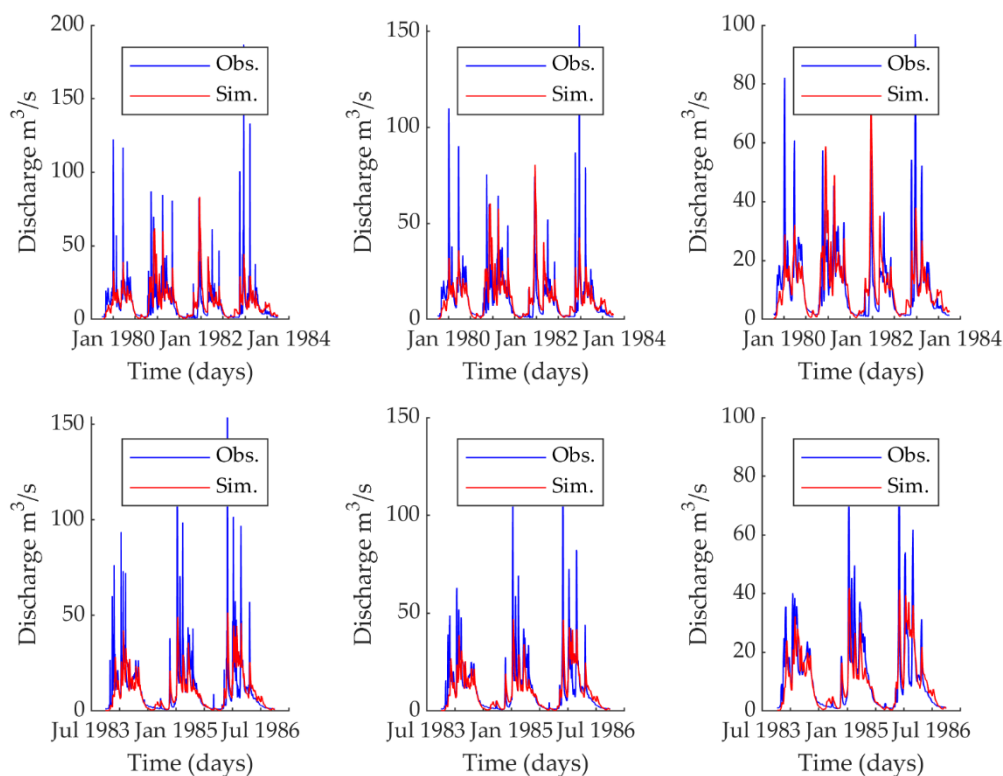


Figure E.10: Measured (blue) and modeled (red) hydrographs for the river basin of Agraphiotis River, for the calibration period (1979-80 to 1982-83) and validation period (1982-83 to 1985-86); from left to right graphs correspond to the time scale of 1, 3 and 7 days.

For Krikeliotis River basin the modelled hydrographs were obtained with two sets of model parameters: those of the basin itself by considering it as gauged; and those of the donor basin. The two hydrographs are compared to each other, which revealed that NSE values are shown small differences. This confirmed that it is possible to transfer hydrological parameters between basins that are classified in the same class.

E8.2 Extraction of drainage network

The variation in both space and time of the upslope contributing area threshold for channel initiation, denoted as the CSA, was investigated with the purpose to assist the procedure for its selection. Conventional maps at coarse spatial scales can be useful in deriving information about stream heads, and consequently about CSA, if these maps contain information on both perennial and ephemeral streams.

Relationships were sought between the map-derived CSA and typical geomorphometric characteristics such as the statistics of ground slope and the square root of ground slope using regression models. All relationships were found to be inaccurate.

It is proposed to select the simplest predictor for CSA which is the median of map-derived CSA values for each stream head by also considering two distinct seasons (wet and dry), thus ignoring the spatial variation of CSA within the study basin.

It should be stressed that, as far as the temporal variation of CSA is concerned, it was demonstrated that it is important to distinguish between wet and dry season of the hydrological year when selecting the CSA.

E8.3 Width Function Unit Hydrographs

The methodological framework of Rescaled Width Function which was described previously (section E4) is applied to 6 basins. The one-hour Unit Hydrograph is constructed for those basins.

As the Evinos river basin is a gauged basin whose one-hour Unit Hydrograph is used for the calculation of kinematic parameters, u_c and u_h for other basins. The flow velocity u_c is equal to 1.8 m/s, while this parameter is transferred to other basins through the use of the ratio of average flow path slopes. The proposed framework by Di Lazzaro (2009) for the kinematic parameter u_h is employed, which employs a regional relationship between data-based parameter values and morphometric and geologic characteristics.

In Table E.3 and Table E.4, the time-to-peak and peak discharge of one-hour Unit Hydrograph are presented respectively. These are obtained using the ddRWF method, the British Institute of Hydrology (IH) formula, and historical data-based (Hist.) one-hour Unit Hydrograph. In Figure E.11, the one-hour Unit Hydrograph based on the ddRWF method for all basins is presented.

Table E.3: Time-to-peak of one-hour Unit Hydrograph based on the ddRWF method, the British Institute of Hydrology (IH) formula, and historical data (Hist.)

ID	Basin	Time-to-peak (h)		
		ddRWF	IH	Hist.
b01	Evinos	7	5	6
b02	Peneios	8	6	
b03	Geropotamos	3	4	
b04	Evrotas	12	8	
b05	Louros	8	5	
b06	Sarantapotamos	5	4	

Table E.4: Peak discharge of one-hour Unit Hydrograph based on the ddRWF method, the British Institute of Hydrology (IH) formula, and historical data (Hist.)

ID	Basin	Peak discharge (h)		
		ddRWF	IH	$I\sigma\tau$
b01	Evinos	269	410	260
b02	Peneios	447	431	
b03	Geropotamos	24	15	
b04	Evrotas	311	461	
b05	Louros	131	147	
b06	Sarantapotamos	110	136	

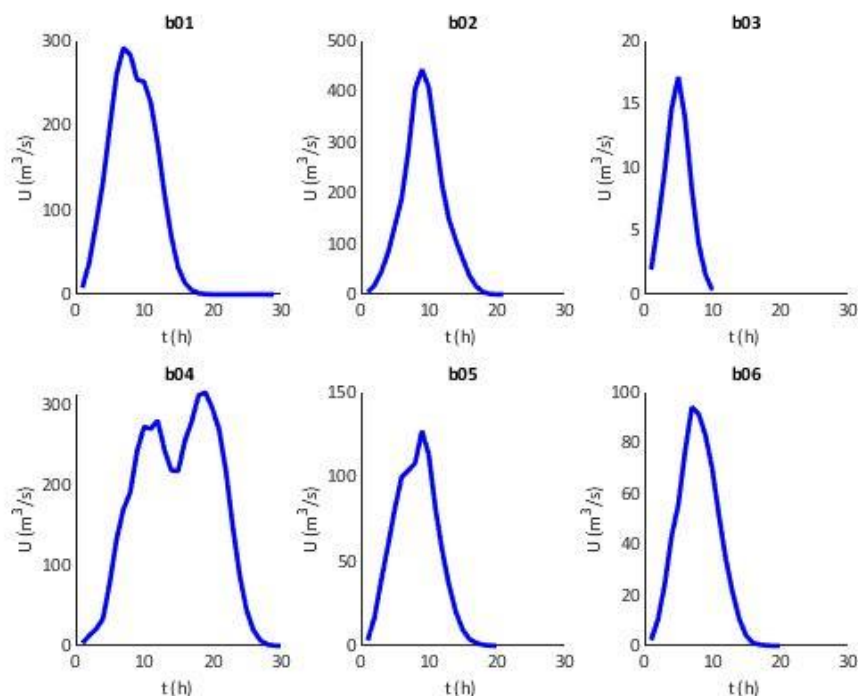


Figure E.11: The one-hour Unit Hydrograph based on the ddRWF method, for all test basins.

Table E.5 and Table E.6 give the peak discharge and time-to-peak of the one-hour Unit Hydrograph based on the modified Reduced Width Function method (ddRWF), for the two hydrographic network extraction methods i.e., the proposed one (M1) and the Tucker method (M2), the method of the British Institute of Hydrology (IH) and the value estimated from historical data (Hist.).

Table E.5: Peak discharge of one-hour Unit Hydrograph based on the ddRWF for the proposed method of CSA for the extraction of hydrographic network: (M1) and the method by Tucker et al. (2001) (M2), the British Institute of Hydrology (IH) formula, and historical data (Hist.)

ID	Basin	peak discharge (m ³ /s)			
		ddRWF (M1)	ddRWF (M2)	IH	Hist.
b01	Evinos	269	211	410	260
b02	Peneios	447	272	431	
b03	Geropotamos	24	19	15	
b04	Evrotas	311	316	461	
b05	Louros	131	117	147	
b06	Sarantapotamos	110	110	136	

Table E.6: Time-to-peak (h) of one-hour Unit Hydrograph based on the ddRWF for the proposed method of CSA for the extraction of hydrographic network: (M1) and the method by Tucker et al. (2001) (M2), the British Institute of Hydrology (IH) formula, and historical data (Hist.)

ID	Basin	Time-to-peak (h)			
		ddRWF (M1)	ddRWF (M2)	IH	Hist.
b01	Evinos	7	5	5	6
b02	Peneios	8	8	6	
b03	Geropotamos	3	3	4	
b04	Evrotas	12	9	8	
b05	Louros	8	8	5	
b06	Sarantapotamos	5	5	4	

E8.4 Semi-distributed rainfall-runoff modelling

The landscape classification of Figure E.12 was retained as its percentage of successful classification in validation confusion matrix is greater than 84%. The percentage of Evinos's basin area was 19.5%, 61.6% 10.6% and 8.3% for class 1, class 2, class 3 and class 4, respectively. The percentage of Agraphiotis's basin area was 9.73%, 66.38%, 14.11% and 9.78% for class 1, class 2, class 3 and class 4, respectively. The percentage of Krikeliotis's basin area was 0.72%, 18.97% 67.27% and 13.04% for class 1, class 2, class 3 and class 4, respectively. The spatial distribution of four landscape classes in the three test basins is shown in Figure E.12.

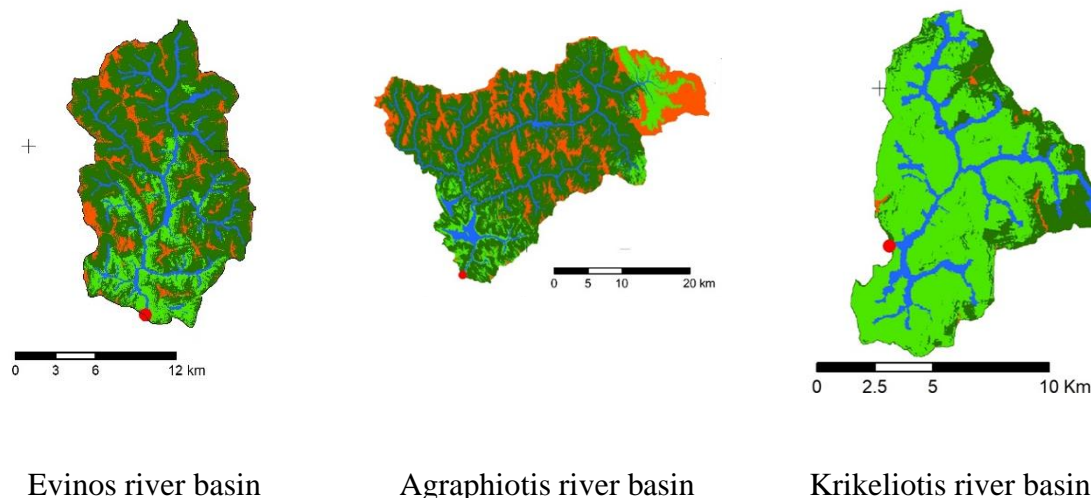


Figure E.12: Spatial distribution of four landscape classes in Evinos (left), Agraphiotis (center) and Krikeliotis (right) river basin, in western continental Greece.

Landscape classification is known to be a promising tool for constructing rainfall runoff models that enable runoff predictions in ungauged basins. Tests with three and four classes and various combinations of morphometric characteristics confirmed this; specifically, it was revealed that additional information regarding vegetation was necessary for achieving a successful classification in the validation stage.

After landscape classification, for each landscape class the parameters of each of the individual lumped models are estimated. The total number of parameters was 21. Of these, six parameters

are common to all classes, while in landscape class 1, 2, 3, and 4, the respective common parameters are 4, 3, 3, and 5 in number.

For Evinos river basin, the Nash Sutcliffe Efficiency (NSE) performance index is presented in Table E.7. Model calibration for the five-year period 1977-78 to 1981-82 gave a value equal to 0.68, while in validation on the remaining four-year period NSE was found at 0.63.

Table E.7: The values of NSE index for Evinos river basin.

	NSE index for daily, 3-days and 7-days moving average of discharge (d)		
	1	3	7
Calibration 1977-78 to 1981-82	0.682	0.804	0.855
Validation 1982-83 to 1985-86	0.631	0.759	0.815

For Agraphiotis river basin, the NSE index is presented in Table E.8.

Table E.8: The values of NSE index for Agraphiotis river basin.

	NSE index for daily, 3-days and 7-days moving average of discharge (d)		
	1	3	7
Calibration 1979-80 to 1982-83	0.396	0.480	0.543
Validation 1982-83 to 1985-86	0.451	0.590	0.691
Simulation with its own parameters 1979-80 to 1985-86	0.420	0.529	0.610
Simulation with Evinos' parameters 1979-80 to 1985-86	0.260	0.464	0.580

For Krikeliotis river basin, the NSE index is presented in Table E.9.

Table E.9: The values of NSE index for Krikeliotis river basin.

	NSE index for daily, 3-days and 7-days moving average of discharge (d)		
	1	3	7
Calibration 1977-78 to 1979-80	0.402	0.504	0.561
Validation 1982-83 to 1985-86	0.312	0.396	0.463
Simulation with Agraphiotis' parameters 1977-78 to 1979-80	0.312	0.393	0.438
Simulation with Agraphiotis' parameters 1982-83 to 1985-86	0.363	0.434	0.495

The FLEX-Topo model was chosen due to its relatively simple and flexible structure and is topography driven.

E8.5 Effect of DEM uncertainty on inundated area extent

Results with regard to the South-East Kalyvia Torrent are discussed first. As shown in Table E.10, for the reference DSM, A_{90} increases from 58 ha for $T = 10$ a, to 109 ha for $T = 10000$ a. The same percentage of increase of A_{90} is found for erroneous DSMs with both $\sigma = 0.63$ m and $\sigma = 1.85$ m. For a fixed return period, T , A_{90} increases when passing from the reference DSM to erroneous DSMs with $\sigma = 0.63$ m, the increase depending on T : It is about 10 ha for $T = 10$ a, and progressively grows to about 20 ha for $T = 10000$ a. For highly erroneous DSMs with $\sigma = 1.85$ m, the trend is reversed and A_{90} roughly returns (for each T) to its value obtained with the reference DSM. Results from SRTM-based data are very close to those for highly erroneous DSMs.

Table E.10: The 90% quantile of inundation extent in the basin of the South-East Kalyvia Torrent for various return periods

Test case	90% quantile of inundation extent (ha) for T (a) =			
	10	100	1000	10000
Reference DSM	57.6	79	94.7	109.3
DSM, $\sigma = 0.63$ m	67.7	93.2	111.5	129.7
DSM, $\sigma = 1.85$ m	53.9	77.8	98.1	114.1
SRTM-based data	53.9	79.7	95.9	109.3

The variation of $W_{90\text{med}}$ with both the return period and the magnitude of error in DSM is in agreement with the variation of A_{90} (Table E.11). One exception concerns erroneous DSMs with $\sigma = 1.85$ m: as in the case with A_{90} , the trend is reversed, but topwidth values still remain above those of the case with the reference DSM. A complete return to values obtained with the reference DSM is observed only with the SRTM-based data.

Table E.11: Spatial median of 90% quantiles of inundation topwidths in the basin of the South-East Kalyvia Torrent for various return periods

Test case	Median 90% quantile of topwidths (m) for T (a) =			
	10	100	1000	10000
Reference DSM	78.2	105.8	126.8	154.5
DSM, $\sigma = 0.63$ m	104.2	141.8	158.5	191.0
DSM, $\sigma = 1.85$ m	92.4	127.6	159.6	183.1
SRTM-based data	66.3	98.1	137.6	166.6
Rainfall	88.1	116.8	137.8	154.4

For fixed magnitude of error in DSM, the variation of $W_{90\max}$ with the return period is qualitatively similar to that of $W_{90\text{med}}$ and A_{90} (Table E.12). The effect of the magnitude of error in DSM is, however different: no significant changes are found when using DSMs with $\sigma = 0.63$ m instead of the reference DSM. The same holds also for SRTM-based data. For DSMs with $\sigma = 1.85$ m, decreased values of $W_{90\max}$ are found for all T 's. The percentage of decrease tends to become lower as T grows: it is 35% for $T = 10$ a, and becomes 15% for $T = 10000$ a.

Table E.12: Spatial maximum of 90% quantiles of inundation topwidths in the basin of the South-East Kalyvia Torrent for various return periods

Test case	Maximum 90% quantile of topwidths (m) for T (a) =			
	10	100	1000	10000
Reference DSM	205.3	281.0	340.4	360.3
DSM, $\sigma = 0.63$ m	204.9	285.3	348.2	414.5
DSM, $\sigma = 1.85$ m	129.8	197.2	263.1	304.6
SRTM-based data	218.2	299.4	360.3	433.1
Rainfall	232.4	310.7	367.5	416.1

Results regarding the Kerynitis River basin are examined next. For the reference DSM, the A_{90} is increased by about 200% its initial value when T passes from 10 to 10000 a (Table E.13) for both the reference and erroneous DSMs. When, however, we use SRTM-based data results are unrealistically low and for $T = 100$ a, and 10000 a, these are omitted from Table 8. The same holds also for $W_{90\text{med}}$ and $W_{90\max}$. For a fixed return period, A_{90} increases when passing from the reference DSM to erroneous DSMs, the increase depending on T : It is about 5 ha for $T = 10$ a, and progressively reaches about 90 ha for $T = 10000$ a.

Table E.13: The 90% quantile of inundation extent in the basin of Kerynitis River for various return periods

Test case	90% quantile of inundation extent (ha) for T (a) =			
	10	100	1000	10000
Reference DSM	46.1	61.9	75.4	171
DSM, $\sigma = 0.66$ m	50.6	70.4	107.1	257.5
SRTM-based data	26.5	32.8	-	-
Rainfall	48.8	63.5	75.4	143.9

$W_{90\text{med}}$ varies with both the return period and the magnitude of error in DSM in a very similar way as A_{90} (Table E.14). The use of SRTM-based data again leads to unrealistically low values.

Table E.14: Spatial median of 90% quantiles of inundation topwidths in the basin of Kerynitis River for various return periods

Test case	Median 90% quantile of topwidths (m) for T (a) =			
	10	100	1000	10000
Reference DSM	110.1	148.9	246.4	306.1
DSM, $\sigma = 0.66$ m	126.2	195.2	267.4	320.4
SRTM-based data	102.9	126.4		-
Rainfall	112.4	160.4	246.0	304.2

$W_{90\max}$ starts from about 400 m for $T = 10$ a, and reaches 2500 m for $T = 10000$ a in the case with the reference DSM, while it varies from about 450 to 3500 m for erroneous DSMs (Table E.15). Using SRTM-based data again produces unrealistically low values.

Table E.15: Spatial maximum of 90% quantiles of inundation topwidths in the basin of Kerynitis River for various return periods

Test case	Maximum 90% quantile of topwidths (m) for T (a) =			
	10	100	1000	10000
Reference DSM	407.4	556.6	653.2	2576.5
DSM, $\sigma = 0.66$ m	451.6	697.4	1665.3	3677.0
SRTM-based data	162.4	183.3		-
Rainfall	439.3	565.8	653.2	1901.3

E9. Concluding remarks

Despite the great scientific and technological advances in hydrology, the lack of information in ungauged basins affects the uncertainty, the quality and reliability of hydrologic predictions, and, consequently, the safety and cost of flood protection works and water cobervation projects. In an effort towards improving hydrologic predictions, research work of this thesis allows the following conclusions:

Since the stream network plays an important role in rainfall-runoff modelling, the extend of it is examined. It is proposed to select the simplest predictor for Critical Support Area (CSA) which is the median of map-derived values by considering two seasons (wet and dry) and ignoring the spatial variation of CSA within the study basin. This is an objective method which yields reproducible results. It is noted that stream network definition affects many geomorphological characteristics used in other parts of the thesis and, for the proposed approach is employed in research on other issues.

Classification of drainage basins into groups with similar response to meteorological forcing can be very helpful in the transfer of hydrological information in space, as required in streamflow prediction in ungauged basins. One of the focuses in the present thesis is testing the ability to classify drainage basins using climate-based variables and geomorphometric characteristics as predictors. It is concluded that the selected hydrological signatures can provide sufficient information for distinguishing between runoff regimes and, then, combined with the selected geomorphometric characteristics allow for a highly successful recognition of the class of an ungauged basin.

Based on the results of basin classification, it is shown that it is possible to transfer and use the parameters of a lumped rainfall-runoff model from the donor basin (gauged basin) to an ungauged basin. The only restriction is that the ungauged basin has to be classified in the same class as the donor. The transfer of hydrological information in space within the context of

hydrological similarity leads to model performance deterioration which is characterized as very small and does not substantially alter the quality of hydrological modeling of the tested basin which receives the information. The Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) is employed to indicate the rainfall-runoff model quality.

Geomorphological characteristics of the surface of the catchment can also be used in landscape classification, which is considered as a promising tool for constructing rainfall runoff models that enable runoff predictions in ungauged basins. Attempts of such classification using various combinations of geomorphometric characteristics revealed that additional information regarding vegetation is necessary for achieving a successful classification in validation stage. It is demonstrated that topography can be used as an integrated indicator to distinguish between landscape elements with different hydrological functions. Also, a conceptual semi-distributed topography-driven model using landscapes classes as prior information and describing dominant hydrological mechanisms per landscape class, reflects the catchment heterogeneity in a realistic way. Parameters of such a model are found to be transferrable to identical landscape classes of an ungauged basin after this has been classified into the same classes using its own geomorphometric characteristics and vegetative cover. Model performance deterioration when applying parameter transfer against model calibration on data from the test basin, proved to be insignificant. Again, NSE is used to evaluate model performance.

Regarding flood modelling the use of Synthetic Unit Hydrographs (SUH) for ungauged basins is known to be the method of choice. In this thesis, the approach of the Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph is adopted in the form of the drainage density Rescaled Width Function (ddRWF) which takes into consideration the heterogeneity of both the earth relief and drainage density of the hydrographic network. For the kinematic parameters of ddRWF, i.e., the effective flow velocity on hillslopes and channels, a novel regionalization procedure is proposed.

The typical values of channel flow velocity by Di Lazzaro et al. (2015) are found too small as demonstrated by the one-hour Unit Hydrograph based on measured precipitation and runoff in Evinos river basin. The adjustment of channel flow velocity in the Evinos basin allow a very accurate estimation of the time to peak (with a lag of only 1 h) and the peak discharge (with an overestimation of 12%) of the 1 h Unit Hydrograph. A method for transfer of channel flow velocity to ungauged basins is devised and tested using the British Institute of Hydrology SUH (IH-SUH) as reference information. The differences from that method encourage the use of ddRWF which is systematically less conservative than IH-SUH. .

Finally, the effect of the uncertainty in DSMs on the extent of inundated areas due to flooding is investigated and the main conclusions are summarized as follows: (1) In both of our test basins, it was noticed that low uncertainty in DSM tends to widen the inundated area, whereas, for high uncertainty in DSMs, the opposite effect appears; hence, using a highly uncertain DSM for flood mapping is very likely to lead to unsafe conclusions, and (2) SRTM DEM data proved to be unsuitable for one-dimensional, cross sections-based hydraulic modelling of floods in river valleys with average transverse ground slopes, from 1.6% to 3.9%; this effect is due to high uncertainty in elevation and low horizontal resolution. More specifically, in our tests, the standard deviation of additional errors in elevation (with respect to the reference DSM) was three to 20 times greater than that of DSMs from other sources such as conventional maps and aerial photos. The horizontal resolution of this product (about 30 m) was clearly coarser than that of DSMs from other sources (5 to 10 m) and lower than the spatial step used in river cross sections (20 m). Also, indices quantifying uncertainty of the inundated area (see section E.5) are presented and commented in the thesis.

1 Εισαγωγή

1.1 Το πρόβλημα της έλλειψης μετρήσεων απορροής

Πριν από αιώνες ο άνθρωπος κατασκεύασε αξιόλογα μέχρι και σήμερα υδραυλικά έργα, κυρίως στηριζόμενος σε εμπειρικές θεωρίες (Rowland and Howe, 2001), χωρίς την αξιοποίηση υδρολογικής γνώσης για την κατασκευή τους και χωρίς τη χρήση μετρήσεων πεδίου σχετικά με φυσικά μεγέθη. Στα χρόνια του Πλάτωνα, ο υδρολογικός κύκλος ήταν μεν γνωστός, αλλά χωρίς να είναι με ακρίβεια διατυπωμένος μιας και, ουσιαστικά από τον 17ο αιώνα και ύστερα, η υδρολογική γνώση στηρίχτηκε στις μετρήσεις των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018). Οι πρώτες μετρήσεις της βροχόπτωσης και της εξάτμισης από τον Perrault, της παροχής και μετέπειτα της ταχύτητας ροής από τον Mariotte αποτέλεσαν εκείνη την περίοδο τα πρώτα βήματα της σύγχρονης υδρολογικής επιστήμης.

Η αέναη κίνηση του νερού στον πλανήτη μας, σε συνδυασμό με την αδιάλειπτη προσπάθεια των οργανισμών να εξασφαλίσουν τις αναγκαίες ποσότητες νερού για τη ζωή τους, αποτελούν την κυρίαρχη φυσική λειτουργία που περιγράφεται στον κύκλο του νερού, δηλαδή την κίνηση του νερού ανάμεσα στην ατμόσφαιρα, την ξηρά και τη θάλασσα, υπό την υγρή, τη στερεή και την αέρια μορφή του. Αν και η επιστήμη της Υδρολογίας, ασχολείται με την κυκλοφορία, την κατανομή, την ποσότητα και τις ιδιότητες του νερού, συνήθως οι υδρολόγοι επικεντρώνονται στις ποσότητες του νερού που φτάνουν στην ξηρά και στις φυσικές διεργασίες που σχετίζεται με το φαινόμενο της επιφανειακής απορροής. Η επιφανειακή απορροή απασχολεί τον άνθρωπο από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα, καθώς αυτή συνδέεται με την κατασκευή έργων για τη διαχείριση και προστασία των υδατικών πόρων, την κατασκευή έργων για την αντιμετώπιση καταστροφών και, επιπλέον, αποτελεί το βασικό μέγεθος, στο οποίο στηρίζεται η μελέτη και η διαστασιολόγηση των έργων.

Με τον όρο *επιφανειακή απορροή* νοείται η ροή του νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας, κατά μήκος των φυσικών υδατορευμάτων (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999· Robinson and Ward, 1990). Στον παραπάνω ορισμό δεν υπάρχει διάκριση της χωρικής κλίμακας που να αφορά το υδρογραφικό δίκτυο, επομένως ο ορισμός αφορά όλα τα υδατορεύματα, από το πιο μικρό ρυάκι μέχρι και τον πιο μεγάλο ποταμό, και, επομένως, με αναγωγή στο επίπεδο της λεκάνης απορροής, προκύπτει ότι η χωρική κλίμακα των λεκανών απορροής ποικίλει σε ευρέα όρια.

Η *λεκάνη απορροής* αποτελεί τον φυσικό υποδοχέα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και δρα με όλα τα μορφολογικά, εδαφολογικά και λοιπά χαρακτηριστικά της, ως ένα σύστημα μετασχηματισμού των κατακρημνισμάτων σε απορροή στην έξοδό της. Η λεκάνη απορροής αποτελεί τη θεμελιώδη χωρική μονάδα αναφοράς στην Υδρολογία. Το όριο της γεωγραφικής περιοχής, τα κατακρημνίσματα της οποίας συνεισφέρουν στην απορροή σε συγκεκριμένη θέση εξόδου, καλείται επιφανειακός υδροκρίτης. Ο τελευταίος περικλείει το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης, τέμνοντάς το μόνο στην έξοδο αυτής.

Η λεκάνη απορροής αποτελεί το θεμελιώδες σύστημα μετασχηματισμού και την μικρότερη χωρική υδρολογική οντότητα προς μελέτη, όπου τα φυσικά χαρακτηριστικά της, σε συνδυασμό με τα φυσικά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου, επηρεάζουν τη διαδικασία του μετασχηματισμού και τις τελικές ποσότητες της απορροής. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να ποσοτικοποιηθούν με τη βοήθεια δεικτών και να αποδώσουν τη μορφή, το ανάγλυφο, τη

σύσταση του εδάφους και άλλες ιδιότητες, βοηθώντας την κατανόηση της διαδικασίας μετασχηματισμού. Για παράδειγμα, είναι γνωστό ότι η έκταση της λεκάνης απορροής, η κλίση του εδάφους και το μήκος των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου, συσχετίζονται με την απορροή της λεκάνης.

Βασικός παράγοντας διαμόρφωσης της μορφής και του αναγλύφου της λεκάνης απορροής είναι η επιφανειακή κίνηση του νερού λόγω της βαρύτητας, και σε δεύτερο βαθμό, η υπεδάφια κίνησή του. Η δράση αυτή του νερού αποτελεί την κύρια αιτία της δημιουργίας των λεκανών απορροής, στις οποίες παρατηρούνται έντονες βουνοκορφές, ηπιότερες κλιτύες, πεδινές περιοχές ήπιου αναγλύφου και μισγάγγειες, όπου στις τελευταίες το νερό συγκεντρώνεται και δημιουργεί το υδρογραφικό δίκτυο. Ουσιαστικά, το υδρογραφικό δίκτυο αποτελεί το δίκτυο αποστράγγισης μιας λεκάνης απορροής μέσω της κίνησης και της μεταφοράς του νερού και των ιζημάτων.

Κατά τη μελέτη του υδρογραφικού δικτύου και της λεκάνης απορροής χρησιμοποιείται πληθώρα δεικτών για την αριθμητική περιγραφή των ιδιοτήτων τους, π.χ. των μορφολογικών χαρακτηριστικών τους. Μερικές από τις περιγραφικές ιδιότητες των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου είναι η τάξη, το μήκος, η κλίση πυθμένα, κ.ά. Το σύνολο των κλάδων διαφορετικής κλίμακας, μαζί με το σύνολο των συμβολών τους (γνωστών ως κόμβων) αποτελεί το *υδρογραφικό δίκτυο* μιας λεκάνης απορροής.

Συνήθως στις περιοχές της Μεσογείου, από ανάντη προς κατόντη σε μια λεκάνη απορροής, συναντώνται εφήμερα ρέματα (κλάδοι) μικρού μήκους, με στενή κοίτη και μικρή παροχή, που βρίσκονται σε περιοχές με μεγάλο υψόμετρο και έντονες κλίσεις εδάφους, ενώ, όσο τα υψόμετρα μικραίνουν, συναντώνται κλάδοι με σχετικά μεγαλύτερη παροχή και διατομές μεγαλύτερου πλάτους. Όλοι οι κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου συνδέονται μεταξύ τους, με αποτέλεσμα, λόγω της βαρύτητας, το νερό να κατευθύνεται από τους κλάδους που βρίσκονται ανάντη, σε αυτούς που βρίσκονται κατόντη. Η παραπάνω τοπολογία αποτελεί και έναν από τους βασικούς κανόνες που πρέπει να πληροί το υδρογραφικό δίκτυο το οποίο εξετάζεται και εξάγεται από Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (ΨΜΕ).

Η *επιφανειακή απορροή* ενδιαφέρει περισσότερο από κάθε άλλη συνιστώσα του κύκλου του νερού, τόσο γιατί δίνει το μεγαλύτερο μέρος των εκμεταλλεύσιμων υδατικών πόρων, όσο και γιατί δημιουργεί σημαντικούς φυσικούς κινδύνους στις περιπτώσεις πλημμυρών (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999). Η κατανόηση των διεργασιών που δημιουργούν επιφανειακή απορροή είναι σημαντική, μιας και αυτή σχετίζεται με την εκτίμηση και την πρόγνωση πλημμυρών.

Για να γίνει εύκολα κατανοητή η μεταφορά των ποσοτήτων νερού στο εσωτερικό των λεκανών απορροής, εφαρμόζεται η παραδοχή του διαχωρισμού αυτών, (α) στην μεταφορά εντός του υδρογραφικού δικτύου, και (β) στην μεταφορά που λαμβάνει χώρα στο υπόλοιπο της λεκάνης απορροής (επί του εδάφους). Στην πρώτη περίπτωση, η κίνηση περιγράφεται από τις μαθηματικές εξισώσεις της υδραυλικής, ενώ στη δεύτερη, η κίνηση ακολουθεί τους μηχανισμούς γένεσης της απορροής, που περιλαμβάνουν επιφανειακές και υπεδάφειες διεργασίες, μέχρι το νερό να φτάσει στο υδρογραφικό δίκτυο.

Οι *μηχανισμοί γένεσης της απορροής* είναι αντικείμενο που απασχόλησε στο πλαίσιο αυτής της διδακτορικής διατριβής, και γίνεται προσπάθεια στη συνέχεια να περιγραφούν και να εκτιμηθούν οι παράγοντες από τους οποίους αυτοί επηρεάζονται (βλ. Υποκεφάλαιο 2.3).

Οι μηχανισμοί γένεσης της απορροής αφορούν όλους εκείνους τους μηχανισμούς που δρουν πριν το νερό φτάσει στο υδρογραφικό δίκτυο. Σε αυτούς περιλαμβάνονται επίγειες και

υπεδάφειες ροές που συμβαίνουν σε διαφορετική χρονική κλίμακα. Η πολυπλοκότητα των φυσικών φαινομένων και των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε μια λεκάνη απορροής, σε συνδυασμό με την έλλειψη μετρήσεων και γενικευμένης γνώσης στην κατανόηση της συμπεριφοράς των λεκανών απορροής, παρά την πληθώρα δημοσιεύσεων για περιοχές μελέτης σε όλο τον κόσμο, την μεγάλη ανάπτυξη και τον αριθμό των μοντέλων προσομοίωσης, και την ύπαρξη εμπειρικών σχέσεων, τελικά εντείνει την αβεβαιότητα στην εκτίμηση και πρόγνωση της συμπεριφοράς των λεκανών απορροής (Hrachowitz et al., 2013· Sivapalan, 2003).

Το 2003, η διαπίστωση (Sivapalan, 2003) ότι οι εμπειρικές σχέσεις και τα μαθηματικά μοντέλα, ή τα εργαλεία γενικότερα που διαθέτουν οι υδρολόγοι, είναι ανεπαρκή για πρόγνωση της απορροής σε λεκάνες που στερούνται μετρημένες απορροές, οδήγησε στον επανακαθορισμό στόχων και προτεραιοτήτων ως προς την αντιμετώπιση του κενού αυτού. Οι λεκάνες απορροής στις οποίες δεν υπάρχουν επαρκείς μετρήσεις απορροής καλούνται μη μετρούμενες λεκάνες απορροής (*ungauged basins*) και αποτελούν την πλειονότητα των λεκανών παγκοσμίως (McMahon et al., 2013). Η ανάγκη να αντιμετωπιστεί το κενό γνώσης αναφορικά με την πλειονότητα των λεκανών απορροής παγκοσμίως (μη μετρούμενες λεκάνες απορροής) προκύπτει από την γενική διαπίστωση ότι ένα ευρύ φάσμα σχετικών με το νερό επιπτώσεων απειλούν όλο και περισσότερο την ανθεκτικότητα της ανθρώπινης κοινωνίας. Οι επιπτώσεις αυτές προέρχονται από κινδύνους που σχετίζονται με το νερό, όπως πλημμύρες (Hrachowitz et al., 2013). Επιπλέον, υπήρχε η ανάγκη καλύτερης κατανόησης της αλληλεπίδρασης και του τρόπου σύνδεσης μεταξύ της απόκρισης της λεκάνης απορροής σε μια βροχόπτωση και του αναγλύφου αυτής, δηλαδή, των μορφομετρικών ιδιοτήτων της λεκάνης, ώστε η γνώση αυτή να μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατάλληλα στην αντιμετώπιση της «υδρολογικής» πρόκλησης, δηλαδή, της πρόγνωσης της απόκρισης των μη μετρούμενων λεκανών απορροής.

Όπως προαναφέρθηκε, από τις διεργασίες που παρατηρούνται σε μία λεκάνη απορροής, σπουδαιότερη είναι η δημιουργία της απορροής από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Η δημιουργία της επιφανειακής απορροής είναι άμεσα επηρεαζόμενη από τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Η κατανόηση του φαινομένου έγκειται στη μελέτη των μηχανισμών γένεσης της απορροής που δρουν σε μια λεκάνη, αλλά και στην αναζήτηση της σχέσης που συνδέει την απορροή με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης λεκάνης. Προφανώς, η σχέση αυτή δεν είναι γραμμική λόγω, μεταξύ άλλων, της διαφορετικής χρονικής κλίμακας την οποία ακολουθεί κάθε διεργασία.

Η μέτρηση της απορροής αποτελεί την κύρια υδρολογική πληροφορία για την κατανόηση της συμπεριφοράς κάθε λεκάνης. «Μία μέτρια μέτρηση αξίζει πολύ περισσότερο από έναν καλό υπολογισμό» (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999), και αυτό γιατί οι υδρολογικές μεταβλητές εμπεριέχουν τον τυχαίο παράγοντα και, επιπλέον, είναι δύσκολη η εφαρμογή παγκόσμιων νόμων, καθόσον οι υδρολογικές μεταβλητές διακυμαίνονται στο χώρο και στο χρόνο, αλλά και λόγω της πολυπλοκότητας των υδρολογικών διεργασιών. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η εφαρμογή εξισώσεων και σχέσεων με σχετικά περιορισμένη αποτελεσματικότητα, π.χ. κατάλληλη μόνον για συγκεκριμένη περιοχή, ή για συγκεκριμένο κλίμα.

Σήμερα, θεωρείται σχεδόν αυτονόητο ότι η κατανόηση των φαινομένων, είτε μέσω θεωρίας, είτε μέσω εμπειρικών σχέσεων, αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την μελέτη και την κατασκευή ενός τεχνικού έργου. Ωστόσο, η ιστορία ακολούθησε την ακριβώς αντίθετη διαδρομή: Πρώτα έγινε η εμπειρική εφαρμογή, με την κατασκευή αρδευτικών έργων και υδραγωγείων και, εκ των υστέρων, ακολούθησε η κατανόηση και η επιστημονική συγκρότηση των γνώσεων (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Παρά το γεγονός ότι η εποχή μας χαρακτηρίζεται από την εξέλιξη και εφαρμογή τηλεπισκοπικών και μη μεθόδων για τη μέτρηση και τη συλλογή υδρολογικών δεδομένων (π.χ., συστήματα επίγειας τηλεμετρίας, ραντάρ, μετεωρολογικοί δορυφόροι), ως προς τη μέτρηση της παροχής σε διατομές ποταμών, το πρόβλημα παραμένει. Εφόσον, όμως, υπήρχαν μεγάλου μήκους χρονοσειρές με μετρημένες παροχές σε διατομές ποταμών, πολλά υδρολογικά ερωτήματα θα έβρισκαν απάντηση και, πιθανότατα, δεν θα χρειάζονταν να μετρηθούν άλλες υδρολογικές μεταβλητές.

Λόγω της έλλειψης των δεδομένων απορροής, δόθηκε έμφαση στην ανάπτυξη υδρολογικών μοντέλων, και, πιο συγκεκριμένα, στην αναζήτηση και κατανόηση των υδρολογικών διεργασιών ώστε αυτές να περιγράφονται με μοντέλα φυσικής βάσης (physically-based) ή με εννοιολογικά μοντέλα (conceptual), ενώ ακολούθησε η εφαρμογή μοντέλων σε ευρύ πλήθος λεκανών απορροής (Grayson et al., 1992· O'Connell and Todini, 1996· Beven, 2001· Todini, 2007· 2011· Refsgaard et al., 2010· Nalbantis et al., 2011· Papageorgaki and Nalbantis, 2016). Τα παραπάνω οδήγησαν στην ανάπτυξη πληθώρας υδρολογικών μοντέλων, ποικίλης πολυπλοκότητας και μεθοδολογικής φιλοσοφίας όπως τα εξής: Variable Infiltration Capacity model (VIC; Wood et al., 1992), Sacramento Soil Moisture Accounting model (SAC-SMA; Burnash, 1995), GR4J (Perrin et al., 2003), TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979), Distributed Hydrology Soil Vegetation model (DHSVM; Wigmosta et al., 1994), TOPKAPI (Todini and Ciarapica, 2001), MIKESHE (Refsgaard and Storm, 1995), και πολλά άλλα που συναντώνται στη βιβλιογραφία (Beven, 2001b· Singh and Frevet, 2002· Singh and Woolhiser, 2002· Beven, 1997). Προφανές είναι ότι ορισμένα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν περισσότερο από άλλα, για διάφορους λόγους, όπως η απλότητα της εφαρμογής, οι απαιτήσεις σε δεδομένα, η διαθεσιμότητα κώδικα, το επίπεδο τεκμηρίωσής του, και η διάδοση του μοντέλου.

Για πολλούς υδρολόγους η έλλειψη μετρήσεων συνίσταται στο γεγονός ότι, για τις λεκάνες απορροής ενδιαφέροντος, δεν υπάρχουν διαθέσιμα συνεχή δεδομένα μετρήσεων πεδίου που να αφορούν τις παρατηρούμενες μετεωρολογικές και υδρολογικές παραμέτρους εντός της λεκάνης απορροής (Blöschl et al., 2013· Hrachowitz et al., 2013). Η έλλειψη μετρήσεων πεδίου είναι κρίσιμη, καθώς σε πολλές λεκάνες απορροής χρειάζονται περισσότερες πληροφορίες για τις παραμέτρους του υδρολογικού τους κύκλου και τις συνθήκες αποθήκευσης νερού για τη βέλτιστη διαχείριση των υδατικών τους πόρων ή την διαχείριση κινδύνων που αφορούν το νερό (Merwade et al., 2008· Hirsch and Costa, 2004· Abimbola et al., 2017). Στις υδρολογικές μελέτες, συνήθως προτιμώνται μετρήσεις από τις διαθέσιμες πηγές δεδομένων που βρίσκονται εντός της λεκάνης απορροής, ως είσοδοι στα συστήματα μοντελοποίησης, βαθμονόμηση και επικύρωση, όπως είναι οι επιτόπιες καταγραφές των μετεωρολογικών σταθμών, δηλαδή, η θερμοκρασία αέρα, η βροχόπτωση, η χιονόπτωση, η υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία και οι πληροφορίες ανέμου, σε συνδυασμό με τις καταγραφές της απορροής στις εξεταζόμενες διατομές ποταμών (Weber et al., 2021).

Στην προσπάθεια των υδρολόγων να υποκαταστήσουν τις μετρήσεις απορροής, οι εμπειρικές σχέσεις που εφαρμόζονταν και εφαρμόζονται ευρύτατα, χρησιμοποιούνται για να καλύψουν το κενό των δεδομένων, παρά το γεγονός ότι υπόκεινται σε εγγενείς περιορισμούς που αφορούν τις τοπικές κλιματικές και γεωμορφολογικές συνθήκες με αποτέλεσμα η χρήση τους πιθανόν να οδηγεί σε ελλιπή ή ανακριβή συμπεράσματα. Σε άλλες περιπτώσεις γίνεται χρήση των μετρημένων δεδομένων απορροής μιας εκ των γειτονικών λεκανών απορροής (δότης δεδομένων), με την παραδοχή ότι η συμπεριφορά αυτής είναι παρόμοια με την εξεταζόμενη λεκάνη (αποδέκτης δεδομένων) σε παρόμοια γεγονότα βροχόπτωσης ή εφαρμόζονται απλοποιημένες παραδοχές μέσω μιας μεθοδολογίας διερεύνησης της υδρολογικής ομοιότητας

της λεκάνης απορροής με άλλες λεκάνες για τις οποίες υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις απορροής.

Το γεγονός ότι η πλειονότητα των λεκανών παγκοσμίως είναι μη μετρούμενες, στρέφει το ερευνητικό ενδιαφέρον σε αναζήτηση μεθόδων υποκατάστασης των απαιτούμενων μετρήσεων. Μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση στο θέμα αποτελεί η αποκλειστική χρήση μορφομετρικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής. Αυτή η προσέγγιση εντάσσεται στο πλαίσιο της σύγχρονης τάσης για αποδέσμευση από συστηματικές μετρήσεις υδρολογικών μεγεθών. Η τάση αυτή θέτει στο επίκεντρο του ερευνητικού ενδιαφέροντος τις γνώσεις για τις φυσικές υδρολογικές διεργασίες και την κατανόηση αυτών σε ένα εύρος χωροχρονικών κλιμάκων.

Σε παγκόσμια χωρική κλίμακα, η έλλειψη υδρολογικών δεδομένων σε λεκάνες απορροής είναι γνωστή και συχνά εμφανιζόμενη συνθήκη υπό την οποία καλούνται να εργαστούν οι υδρολόγοι. Το υδρολογικό πρόβλημα των μη μετρούμενων λεκανών απορροής δημιούργησε την ανάγκη για αναζήτηση σχέσεων και συσχετίσεων της απορροής με άλλα μεγέθη, τοπογραφικά, κλιματολογικά, γεωλογικά, εδαφολογικά κ.ά.

Στην αρχή του 21^{ου} αιώνα, η Διεθνής Ένωση Υδρολογικών Επιστημών, με αφορμή το γεγονός ότι το τότε υπάρχον θεωρητικό πλαίσιο (υδρολογικά μοντέλα, εξισώσεις, εμπειρικές σχέσεις) ήταν ανεπαρκές για πρόβλεψη της απορροής των μη μετρούμενων λεκανών απορροής (Sivapalan, 2003b), έθεσε ένα στόχο προς αυτή την κατεύθυνση, για την μετέπειτα δεκαετία που επιγράφηκε ως «*A decade of predictions in ungauged basins (PUB)*» (2003-2012). Πιο αναλυτικά, ο στόχος ήταν να δημιουργηθεί η υδρολογική κουλτούρα που θα συνέβαλλε στην κατανόηση των υδρολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε μια λεκάνη απορροής, θα περιόριζε την αβεβαιότητα των διαδικασιών πρόβλεψης, και θα σχετιζόταν με το σχεδιασμό ρεαλιστικών μοντέλων που θα μπορούσαν να δίνουν καλύτερες υδρολογικές προβλέψεις (Hrachowitz et al., 2013) υπό αυτές τις συνθήκες. Η πρωτοβουλία αφορούσε την διαμόρφωση και εφαρμογή κατάλληλων επιστημονικών προγραμμάτων τα οποία να εμπλέκουν και να εμπνέουν την επιστημονική κοινότητα συντονισμένα και με αποτελεσματικό τρόπο, προς την επίτευξη προόδου σε θέματα που σχετίζονται με την ικανότητα να γίνονται υδρολογικές προβλέψεις σε μη μετρημένες λεκάνες απορροής. Για την πρόβλεψη της απορροής σε μη μετρημένες λεκάνες απορροής, συνιστάται η χρήση μοντέλου κατάλληλης δομής (Blöschl et al., 2013), ώστε να συμβάλλει στη μείωση της αβεβαιότητας της πρόβλεψης (Son and Sivapalan, 2007).

Αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων αποκλειστικής χρήσης μορφομετρικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής για την κατάταξή τους σε κατηγορίες υδρολογικά όμοιων λεκανών. Στόχος της διατριβής είναι να προτείνει κατάλληλα μορφομετρικά χαρακτηριστικά που να επιτρέπουν την κατάταξη μη μετρούμενων λεκανών απορροής. Η μελέτη των λεκανών απορροής βασίζεται στη διερεύνηση των μετρήσεων των υδρολογικών παραμέτρων, όπως, η βροχόπτωση, η θερμοκρασία αέρα, και η εξάτμιση. Η προσέγγιση αυτή, μέσω των αποτελεσμάτων της, αποτελεί την «αλήθεια» πάνω στην οποία στηρίζεται οποιαδήποτε άλλη προσέγγιση. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέρχονται από την χρήση τοπογραφικών ή μορφομετρικών παραμέτρων, με τα αποτελέσματα της πρώτης προσέγγισης, έχει στόχο να ελεγχεί το κατά πόσο οι μορφομετρικές παράμετροι μπορούν να αποτελέσουν κριτήρια για τον προσδιορισμό και εκτίμηση του ίδιου συμπεράσματος.

Οι αναμενόμενες θετικές επιπτώσεις από τα αποτελέσματα αυτής της προσπάθειας είναι οι εξής: (α) βελτίωση του σχεδιασμού νέων έργων διαχείρισης υδατικών πόρων και, κυρίως, των αντιπλημμυρικών έργων που σχεδιάζονται, συνήθως, με βάση μεγέθη ακραίων υδρολογικών γεγονότων (π.χ., παροχή αιχμής πλημμύρας σχεδιασμού), και (β) η υποκατάσταση των

υδρολογικών μετρήσεων, με άλλη πληροφορία ευρέως διαθέσιμη, όπως πληροφορία η οποία αφορά την τοπογραφία.

1.2 Η συμβολή της Διδακτορικής Διατριβής στην επιστήμη της Υδρολογίας

Μέχρι σήμερα δεν υφίσταται ένα ενιαίο σύστημα κατάταξης των λεκανών απορροής παγκοσμίως ως προς την υδρολογική τους συμπεριφορά. Ένα τέτοιο σύστημα απαιτεί καθολική προσέγγιση, καθόσον θα πρέπει να περιλαμβάνει μεγάλη ποικιλία πληροφοριών (εδαφολογικές, υδρολογικές και κλιματικές πληροφορίες). Η υδρομετρική πληροφορία, δηλαδή οι μετρημένες χρονοσειρές παροχής, είναι πολύ περιορισμένη, ειδικά στην Ελλάδα, και σε κάθε περίπτωση, αναφέρεται σε σχετικά μεγάλες και σχετικά ορεινές λεκάνες απορροής, όπου υπάρχουν μεγάλα έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων (π.χ. φράγματα της ΔΕΗ). Το γεγονός ότι η πλειονότητα των λεκανών παγκοσμίως είναι μη μετρούμενες, στρέφει το ερευνητικό ενδιαφέρον σε αναζήτηση μεθόδων υποκατάστασης των απαιτούμενων αλλά μη υπαρχουσών μετρήσεων. Όπως ήδη αναφέρθηκε, μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση στο θέμα αποτελεί η αποκλειστική χρήση μορφομετρικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής.

Η διατριβή έχει στόχο να συμβάλει: (α) στην κατάταξη των μη μετρούμενων λεκανών από την άποψη των επικρατούντων μηχανισμών γένεσης της απορροής, και (β) στη βελτίωση των μοντέλων προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών σε λεκάνες απορροής με φτωχή υδρολογική πληροφορία ή παντελή έλλειψη αυτής.

Τίθενται, συνεπώς, τα παρακάτω ερευνητικά ερωτήματα, με σκοπό να συμβάλουν στο στόχο της διατριβής.

Ερώτημα 1: Πως είναι δυνατό να μεταφερθεί υδρολογική πληροφορία από μια μετρούμενη λεκάνη απορροής σε μια μη μετρούμενη, όταν η προσέγγιση είναι αδιαμέριστη (lumped) στο χώρο και η χρονική κλίμακα αδρή (π.χ. ημερήσια, μηνιαία);

Στην ευρύτερη διατύπωση του ερωτήματος εντάσσονται επί μέρους ερωτήματα που αφορούν:

- στον εντοπισμό χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια υδρολογικής ομοιότητας και να επιτρέψουν την μεταφορά,
- στην κατάρτιση κατάλληλου μεθοδολογικού πλαισίου ταξινόμησης των μη μετρούμενων λεκανών απορροής,
- στον προσδιορισμό ενός αντικειμενικού τρόπου εκτίμησης των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών που θα χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια ταξινόμησης.

Ερώτημα 2: Πως είναι δυνατό να εξαχθεί το υδρογραφικό δίκτυο μιας λεκάνης απορροής με βάση αντικειμενική πληροφορία από ΨΜΕ, μιας και αυτό αποτελεί στοιχείο βαρύνουσας σημασίας για τη μελέτη της υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης απορροής και, επί πλέον, ποια είναι η χωροχρονική διακύμανση αυτού;

Ερώτημα 3: Πως είναι δυνατό να μεταφερθεί υδρολογική πληροφορία από μια μετρούμενη λεκάνη σε μια μη μετρούμενη, όταν η προσέγγιση είναι αδιαμέριστη στο χώρο, και η χρονική κλίμακα είναι λεπτή (π.χ. 1 h), κατάλληλη, επομένως, για την πρόβλεψη πλημμυρικών μεγεθών ενδιαφέροντος;

Στην ευρύτερη διατύπωση του ερωτήματος εντάσσονται επί μέρους ερωτήματα, όπως:

- Πως είναι δυνατόν να καταρτιστεί ένα Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα μιας μη μετρούμενης λεκάνης απορροής, με βάση πληροφορία από ΨΜΕ και υδρολογική πληροφορία που μεταφέρεται από άλλες λεκάνες απορροής;
- Ποια είναι η επίδραση των σφαλμάτων των διαθέσιμων ΨΜΕ στον εντοπισμό των ορίων των κατακλυζόμενων περιοχών, κατά την υδρολογική μελέτη πλημμυρών;

Ερώτημα 4: Πως είναι δυνατό να μεταφερθεί υδρολογική πληροφορία από μια μετρούμενη σε μια μη μετρούμενη λεκάνη απορροής, όταν η προσέγγιση είναι ημικατανομημένη (semi-distributed) στο χώρο, και η χρονική κλίμακα είναι αδρή;

Στην ευρύτερη διατύπωση του ερωτήματος εντάσσονται επί μέρους ερωτήματα που αφορούν:

- στον εντοπισμό των εδαφικών ενότητων (landscape classes) της λεκανών απορροής που θα επιτρέψουν τη μεταφορά των υδρολογικών παραμέτρων ενός ημικατανομημένου μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής,
- στην κατάρτιση κατάλληλου μεθοδολογικού πλαισίου ταξινόμησης του γήινου αναγλύφου των λεκανών απορροής,
- στον προσδιορισμό των κατάλληλων χαρακτηριστικών, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια ταξινόμησης του γήινου αναγλύφου των λεκανών απορροής.

1.3 Πρωτότυπα σημεία

Η έρευνα της βιβλιογραφίας δείχνει ότι, παγκοσμίως, υπάρχει πρόβλημα με την έλλειψη μετρήσεων απορροής στις λεκάνες απορροής, γεγονός που οδηγεί σε αβεβαιότητα στην πρόβλεψη της υδρολογικής συμπεριφοράς των λεκανών αυτών (Hrachowitz et al., 2013). Κατά συνέπεια, δημιουργείται η ανάγκη υποκατάστασης των παραπάνω δεδομένων με εφαρμογή νέων μεθόδων πρόβλεψης. Η μελέτη της αποκλειστικής χρήσης τοπογραφικών χαρακτηριστικών για την κατάταξη ή, ακόμη και την πρόβλεψη του κυρίαρχου καθεστώτος απορροής μιας λεκάνης απορροής, είναι πρωτότυπη και πολλά υποσχόμενη προσέγγιση, για την αντιμετώπιση του προβλήματος έλλειψης δεδομένων και για την ταξινόμηση, ει δυνατόν, των λεκανών απορροής, σε κατηγορίες με παρόμοια υδρολογική συμπεριφορά.

Στην Υδρολογία υπάρχουν, παγκοσμίως, κοινώς αποδεκτοί τρόποι και μεθοδολογίες χειρισμού των φαινομένων, όπως, για παράδειγμα, η εξίσωση συνέχειας ως απόρροια της αρχής διατήρησης της μάζας, παρά το γεγονός ότι οι τεχνικές μέτρησης μεγεθών, όπως η απορροή και το απόθεμα νερού παραμένουν ακόμα περιορισμένες (Beven, 2006). Σε ό,τι αφορά τη διαδικασία ταξινόμησης, δεν υπάρχει ένα κοινώς αποδεκτό σύστημα ταξινόμησης των λεκανών απορροής, ως προς την υδρολογική συμπεριφορά τους, παρά το γεγονός ότι υπάρχουν κατηγοριοποιήσεις των λεκανών απορροής βασισμένες στο κλίμα (υγρή, άνυδρη), στις χρήσεις γης και τη βλάστηση (δασώδεις, αγροτικές, αστικές), στο χρόνο απόκρισης (ταχεία, αργή), στην αποθηκευτικότητα και τον κυρίαρχο μηχανισμό (όπου κυριαρχούν είτε τα υπόγεια ύδατα, είτε τα επιφανειακά ύδατα) κ.ά. Παρά, λοιπόν, τις παραπάνω κατηγοριοποιήσεις, καμία από αυτές δεν αποτελεί ένα περιεκτικό σύστημα που να είναι ξεκάθαρα ορισμένο. Από την άλλη μεριά, προσπάθειες για ανάπτυξη ενός συστήματος ταξινόμησης ενέχουν δυσκολία (Robinson and Sivapalan, 1997· Papageorgaki and Nalbantis, 2016).

Στο πρώτο ερευνητικό ερώτημα του Υποκεφαλαίου 1.2 εξετάστηκε η δυνατότητα ταξινόμησης λεκανών απορροής σε κλάσεις με παρόμοια απόκριση στις μετεωρολογικές διεγέρσεις. Η βασική ιδέα πίσω από την αδιαμέριστη ταξινόμηση των λεκανών απορροής είναι η δυνατότητα ταξινόμησης με χρήση κλιματικών μεταβλητών και πληροφορίας από το γήινο ανάγλυφο, όπως τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Σύμφωνα με την προτεινόμενη διαδικασία γίνεται προσπάθεια υποκατάστασης των μετρήσεων απορροής μέσω των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης, ενώ επιλέγεται και η βροχόπτωση, καθώς αυτή η μετεωρολογική μεταβλητή μετριέται στην πλειονότητα των λεκανών απορροής.

Πρωτότυπο στοιχείο της παρούσας διατριβής αποτελεί η προτεινόμενη μεθοδολογία για ταξινόμηση των λεκανών απορροής με αποκλειστική χρήση τοπογραφικής πληροφορίας ως κριτηρίου ταξινόμησης (Papageorgaki and Nalbantis, 2015· 2016). Η αποκλειστική χρήση της

τοπογραφίας στην εκτίμηση του κυρίαρχου μηχανισμού γένεσης της απορροής αλλά και στην εκτίμηση της συμπεριφοράς μιας λεκάνης απορροής αποτελεί καινοτόμο αντιμετώπιση, η οποία αναμένεται να συμβάλει στην απόδειξη της κρισιμότητας της τοπογραφικής πληροφορίας στην μοντελοποίηση της υδρολογικής συμπεριφοράς.

Στόχος της προτεινόμενης μεθοδολογίας ταξινόμησης είναι να ταξινομηθεί, σε μια κλάση με όμοιες με αυτήν λεκάνες απορροής, μια λεκάνη η οποία θεωρείται μη μετρούμενη, με βάση γνωστά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τα οποία είναι υπολογισμένα από ΨΜΕ, και γνωστή τη βροχόπτωση από μετρήσεις.

Με βάση υδρολογική πληροφορία και μέσω απλών γνωστών μεθόδων ταξινόμησης, αναζητείται ο αριθμός των κλάσεων όμοιων λεκανών, καθώς και οι ίδιες οι κλάσεις, ενώ στη συνέχεια εκτελείται επιβλεπόμενη ταξινόμηση, κατά την οποία αναζητείται η σχέση μεταξύ των μορφομετρικών χαρακτηριστικών των λεκανών, δηλαδή των παραγόντων πρόβλεψης, και των κλάσεων οι οποίες έχουν προηγουμένως δημιουργηθεί. Βάσει της σχέσης αυτής, στη συνέχεια, η μη μετρούμενη λεκάνη απορροής ταξινομείται στη κατάλληλη κλάση, σύμφωνα με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της.

Στη συνέχεια γίνεται επέκταση του μεθοδολογικού πλαισίου της υδρολογικής ταξινόμησης ώστε να ελεγχθεί αν είναι δυνατή η μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας μεταξύ όμοιων υδρολογικά λεκανών απορροής. Για τη μεταφορά αυτή χρησιμοποιείται μια τροποποιημένη εκδοχή του μοντέλου FLEX-Topo του Savenije (2010) και ο έλεγχος γίνεται σε λεκάνες απορροής οι οποίες ανήκουν στην ίδια κλάση.

Στο πρώτο βήμα του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου, η διαδικασία της ταξινόμησης εκτελείται μέσω της χρήσης των υδρολογικών υπογραφών, οι οποίες παρέχουν ξεκάθαρη πληροφορία για τη διάκριση του μηχανισμού γένεσης της απορροής, ενώ η χρήση της βροχόπτωσης σε συνδυασμό με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά εξασφαλίζει την επιτυχή αναγνώριση της κλάσης στην οποία ανήκει η κάθε λεκάνη απορροής. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ένα πρωτότυπο και αντικειμενικό σύστημα ταξινόμησης λεκανών απορροής.

Το πρωτότυπο σύστημα ταξινόμησης ελέγχθηκε και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ασφαλή μεταφορά της υδρολογικής πληροφορίας μεταξύ λεκανών απορροής που ανήκουν στην ίδια κλάση. Αν και η μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας μεταξύ λεκανών απορροής που ανήκουν στην ίδια κλάση οδηγεί σε μικρή απώλεια πληροφορίας, αυτό δεν αλλοιώνει ουσιαστικά την ποιότητα προσομοίωσης της υδρολογικής συμπεριφοράς της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής η οποία δέχεται την πληροφορία.

Στο δεύτερο ερευνητικό ερώτημα, αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα του αντικειμενικού προσδιορισμού του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής, το οποίο αποτελεί κρίσιμο στοιχείο στην εκτίμηση χρήσιμων γεωμορφολογικών μεγεθών.

Σημαντικό ρόλο στον εντοπισμό των διεργασιών που επιτελούνται εντός μιας λεκάνης απορροής διαδραματίζει η χρονική και χωρική μεταβολή του υδρογραφικού δικτύου, ή καλύτερα των φυσικών υδατορευμάτων (streams), καθώς είναι αυτά που συνδέονται με την επιφανειακή απορροή. Στη γενική αυτή διατύπωση στον ορισμό της επιφανειακής απορροής, η χρονική και χωρική κλίμακα δεν λαμβάνεται υπόψιν, με αποτέλεσμα το ανάπτυγμα των υδατορευμάτων μιας λεκάνης απορροής να είναι ακαθόριστο ως προς τις εποχές ή τα όρια της λεκάνης απορροής. Στην παρούσα διατριβή γίνεται λόγος για τον καθορισμό της *Ανάπτυξη Συμβάλλουσας Έκτασης* ή ΑΣΕ (Papageorgaki and Nalbantis, 2017· 2018), ως εκείνης της παραμέτρου η οποία προτείνεται για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής, και με την οποία, αποδίδεται η έννοια της χωρικής κλίμακας αλλά και της δυναμικής του αναπτύγματος των υδατορευμάτων, ανάλογα με την εποχή. Ένα υδρογραφικό δίκτυο

αποτελείται από εφήμερα ρέματα τα οποία συρρικνώνονται εποχιακά, καθώς και από κλάδους συνεχούς ροής οι οποίοι δεν μεταβάλλονται.

Η προταθείσα μέθοδος εξαγωγής, από δεδομένα ΨΜΕ, του υδρογραφικού δικτύου μέσω της ΑΣΕ, λαμβάνει υπόψιν δύο χρονικές περιόδους της χωρικής κατανομής του υδρογραφικού δικτύου και προτείνει τη χρήση της διάμεσης τιμής της ΑΣΕ, ως κριτηρίου σταθερής ανάντη έκτασης που με τα νερά της συμβάλλει στη δημιουργία επιφανειακής απορροής στην κεφαλή του κάθε κλάδου του υδρογραφικού δικτύου.

Σημαντικά στοιχεία της μεθόδου είναι, (α) ότι προτείνει ένα κατώφλι σταθερής έκτασης που εμπεριέχει την διακύμανση λόγω εποχικότητας, αλλά μπορεί να μεταφερθεί και να εφαρμοστεί εύκολα σε ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών, ως πλήθος ανάντη κελιών, και, (β) η εφαρμογή του κατωφλίου παράγει ένα υδρογραφικό δίκτυο ελαφρώς συρρικνωμένο σε σχέση με το υδρογραφικό δίκτυο που αποδίδεται στους χάρτες και πιο εκτεταμένο σε σχέση με το θερινό ανάπτυγμα του υδρογραφικού δικτύου.

Για τον ελλαδικό χώρο, οι χάρτες βασικής χωρικής κλίμακας 1/50000, οι οποίοι αποδίδουν το υδρογραφικό δίκτυο και συνήθως χρησιμοποιούνται στις μελέτες τεχνικών έργων, υπερεκτιμούν το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής, με αποτέλεσμα οι κεφαλές αυτού να βρίσκονται, εσφαλμένα, σε μικρή απόσταση από τον υδροκρίτη της λεκάνης απορροής.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, οι συμβατικοί τοπογραφικοί χάρτες είναι κατάλληλοι και χρήσιμοι για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τις κεφαλές των υδατορευμάτων πρώτης τάξης και, κατά συνέπεια, και για την εκτίμηση της ΑΣΕ. Μόνη προϋπόθεση είναι οι χάρτες να περιέχουν πληροφορίες τόσο για τα εφήμερα ρεύματα όσο και για τα ρέματα μόνιμης ροής μιας λεκάνης απορροής. Προτάθηκε η χρήση της διάμεσης τιμής της ΑΣΕ που προκύπτει από κάθε κεφαλή υδατορεύματος. Οι εν λόγω κεφαλές εντοπίζονται τόσο για την υγρή όσο και για την ξηρή περίοδο. Η προτεινόμενη διάμεση τιμή της ΑΣΕ του προηγούμενου σημείου είναι, προφανώς, διαφορετική για την υγρή και την ξηρή περίοδο του έτους. Για την ενδιάμεση εποχή (φθινόπωρο και άνοιξη) προτάθηκε η χρήση της μέσης τιμής των ΑΣΕ της υγρής και την ξηρής περιόδου. Επομένως, τελικά, προτείνονται τρεις σταθερές τιμές της ΑΣΕ: για την υγρή, την ξηρή και την ενδιάμεση εποχή του έτους.

Σε ό,τι αφορά στο τρίτο ερευνητικό ερώτημα, εξετάζονται θέματα αναφορικά με το πρόβλημα της κατάρτισης Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (ΣΜΥ) μιας λεκάνης απορροής. Διερευνήθηκε η δυνατότητα αξιοποίησης, στην εκτίμηση της παροχής σχεδιασμού υδραυλικών έργων, της μεθόδου εκτίμησης του Γεωμορφολογικού Στιγμαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος υπό τη μορφή της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους (Rescaled Width Function, ή RWF). Η μέθοδος RWF λαμβάνει υπόψη την ετερογένεια τόσο του γήινου αναγλύφου, όσο και της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου και, στο πλαίσιο της διατριβής, τροποποιήθηκε με αξιοποίηση των ερευνητικών αποτελεσμάτων σχετικών με την ΑΣΕ.

Πρώτα εξετάστηκε η προσέγγιση της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους (Rescaled Width Function, RWF) (Rinaldo et al., 1995) και στις δύο εκδοχές αυτής: (α) την κλασική εκδοχή (cRWF), και (β) την τροποποιημένη από τους Di Lazzaro et al. (2015) εκδοχή, γνωστή ως Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους, σταθμισμένη μέσω της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου (drainage density ή dd), ή ddRWF. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους. Επίσης, συγκρίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα δύο μεθοδολογιών για εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου: της προτεινόμενης ΑΣΕ και της μεθόδου κατά Tucker et al. (2001).

Τα Μοναδιαία Υδρογραφήματα που προκύπτουν συγκρίνονται με ένα κλασικό Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα (ΣΜΥ) που επιλέχθηκε να είναι το τριγωνικό με εκτίμηση του χρόνου ανόδου, όπως προτάθηκε από το Βρετανικό Ινστιτούτο Υδρολογίας (Sutcliffe, 1978). Σημειώνεται ότι, πέραν της δημοσίευσης των Di Lazzaro et al. (2015) δεν έχει εντοπιστεί άλλη εφαρμογή της μεθόδου ddRWF και, κυρίως, δεν υπάρχει εφαρμογή προσανατολισμένη προς τον υδρολογικό σχεδιασμό υδραυλικών έργων. Χάρτες του μεγέθους της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου (drainage density) αναδεικνύουν την ετερογένεια του αναγλύφου ως προς την παραγωγή απορροής, πληροφορία η οποία προτείνεται για την εκτίμηση της παροχής σχεδιασμού υδραυλικών έργων (Ναλμπάντης και Παπαγεωργάκη, 2015· 2022).

Σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των μηκών επί πλαγιάς και των μηκών εντός του υδρογραφικού δικτύου από το ΨΜΕ για τις δύο μεθοδολογίες εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου. Το ΨΜΕ είναι υδρολογικά ορθό, και όλα τα μήκη ελέγχονται ως προς τη συνέχειά τους, ώστε να υπολογίζονται μέχρι το στόμιο της εξόδου της λεκάνης απορροής. Με βάση το τελικό ΣΜΥ, συγκρίνεται η προτεινόμενη μέθοδος με χρήση της ΑΣΕ με την προσέγγιση των Tucker et al. (2001). Η τελευταία περιλαμβάνει συνδυαστική χρήση κριτηρίων, όπως η συνολική ανάντη έκταση και η τοπική κλίση.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται σε έξι λεκάνες απορροής του ελληνικού χώρου. Σημειώνεται ότι για μία από τις 6 λεκάνες, την λεκάνη απορροής του π. Ευήνου, είναι διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης και απορροής, και αξιοποιείται το ήδη διαθέσιμο Μοναδιαίο Υδρογράφημα από παλιότερη μελέτη με βάση τα δεδομένα αυτά, ενώ οι υπόλοιπες λεκάνες απορροής μελετώνται ως μη μετρούμενες. Για τις κινηματικές μεταβλητές της μεθόδου RWF, στην παρούσα διατριβή, έγινε αναγωγή της ταχύτητας ροής εντός υδατορεύματος από τη λεκάνη απορροής του π. Ευήνου (μετρούμενη λεκάνη απορροής) σε άλλες πέντε λεκάνες απορροής του ελληνικού χώρου (μη μετρούμενες λεκάνες απορροής) με βάση την μέση κλίση των ρεμάτων, γεγονός το οποίο αποτελεί πρωτότυπη και κομβική παραδοχή στο πλαίσιο της μεθοδολογικής διαδικασίας.

Καταληκτικά, κερδήθηκε γνώση, καθόσον διαπιστώνεται ότι η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου με χρήση της ΑΣΕ έχει επίπτωση στο Μοναδιαίο Υδρογράφημα.

Στο ίδιο ερευνητικό ερώτημα εντάσσεται και η διερεύνηση της επίδρασης της αβεβαιότητας στην διατιθέμενη πληροφορία σχετικά με την γήινη επιφάνεια επί της εκτάσεως των κατακλυζόμενων περιοχών λόγω πλημμύρας. Εδώ, αξιοποιήθηκαν διαθέσιμα αποτελέσματα από έρευνα η οποία έχει γίνει στο παρελθόν στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου με τίτλο «Επίδραση της αβεβαιότητας των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους στην αβεβαιότητα των κατακλυζόμενων εκτάσεων λόγω πλημμύρας» που ανατέθηκε από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο στο πλαίσιο του Προγράμματος Ενίσχυσης Βασικής Έρευνας (ΠΕΒΕ) τον Νοέμβριο 2009 σε ερευνητική ομάδα του Τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ με επιστημονικό υπεύθυνο τον τότε Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ Ι. Ναλμπάντη και μέλος της ερευνητικής ομάδας την υποφαινόμενη (Ινώ Παπαγεωργάκη). Στο πλαίσιο της διατριβής η επίδραση της αβεβαιότητας του ΨΜΕ εξετάζεται ως προς τον προσδιορισμό των ορίων της κατακλυζόμενης ζώνης.

Για την αναπαράσταση της γήινης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν ΨΜΕ και τοπογραφική πληροφορία από φωτογραμμετρικά δεδομένα και τοπογραφικά διαγράμματα. Έγινε προσδιορισμός των ορίων της κατακλυζόμενης ζώνης λόγω πλημμυρικών φαινομένων διαφορετικών περιόδων επαναφοράς σχεδιασμού και ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας στο ΨΜΕ μέσω της μεθόδου Monte Carlo. Η χάραξη των ορίων έγινε στο κατάντη τμήμα δύο

λεκανών απορροής της ελληνικής επικράτειας και ορίστηκαν μεγέθη για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης της αβεβαιότητας στο ΨΜΕ (το χρονικά μέγιστο εμβαδόν κατακλυζόμενης ζώνης, τα χρονικά μέγιστα τριών ποσοτήτων που μεταβάλλονται ανά διατομή και, συγκεκριμένα, το βάθος του νερού στον άξονα ροής, η μέση ταχύτητα ροής και το πλάτος της κατακλυζόμενης ζώνης στη διατομή).

Χρησιμοποιείται ένα ΨΜΕ αναφοράς, ενώ με τη μέθοδο Monte Carlo λαμβάνονται πολλά εσφαλμένα ΨΜΕ. Στην τελευταία περίπτωση χρησιμοποιούνται τα ποσοστιαία σημεία 90% των παραπάνω μεγεθών, καθώς και στατιστικά χαρακτηριστικά αυτών στο χώρο (χωρική διάμεση τιμή του ποσοστιαίου σημείου 90% του πλάτους της κατακλυζόμενης ζώνης, μέγιστη τιμή του ποσοστιαίου σημείου 90% του πλάτους της κατακλυζόμενης ζώνης).

Η χρήση των παραπάνω παραμέτρων, προκειμένου να οριοθετηθεί η κατακλυζόμενη περιοχή από πλημμυρικά φαινόμενα υψηλής, μέσης και χαμηλής πιθανότητας, αποδεικνύει ότι η χωρική πληροφορία με τη μορφή ΨΜΕ είναι πολύτιμη, και είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί από σύγχρονα υδρολογικά και υδραυλικά μοντέλα (Nalbantis et al., 2012· 2017). Η παραπάνω διαπίστωση επιτρέπει την ανάδειξη των ΨΜΕ σε σημαντικά εργαλεία για τη μελέτη των πλημμυρών.

Η δωρεάν διάθεση των ΨΜΕ, η παγκόσμια κάλυψη αυτών, ο σχετικά εύκολος τρόπος χειρισμού αυτών των δεδομένων, και η αλληλεπίδραση της τοπογραφίας με τις παραμέτρους που περιγράφουν την υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών απορροής, είναι μερικά από τα κριτήρια με τα οποία επιλέχθηκαν τα ΨΜΕ, ως βασικά δεδομένα της παρούσας διατριβής.

Σημειώνεται ότι, για τη χαρτογράφηση και τον εντοπισμό των πλημμυρικών κινδύνων, έχει αποδειχθεί ότι για την εκτίμηση μιας εξαιρετικά ακριβούς εκτίμησης του ορίου της κατακλυζόμενης ζώνης βάσει ΨΜΕ απαιτείται ψηφιακή πληροφορία υψηλής ποιότητας ως προς την τοπογραφία του εδάφους, έχοντας τυπική απόκλιση σφαλμάτων, περίπου κάτω από 0.50 m. Αυτό φυσικά οδηγεί στην επιλογή προϊόντων από νεότερες τεχνολογίες όπως το LiDAR ή σε υψηλής ανάλυσης αεροφωτογραφίες ή δορυφορικές εικόνες.

Τέλος, πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής είναι η ταξινόμηση λεκανών απορροής θεωρουμένων τόσο ως ενιαίας χωρικής ενότητας (αδριαμέριστη ταξινόμηση) όσο και ως χωρικά καταναμημένων κατηγοριών τοπίου στο εσωτερικό της λεκάνης απορροής (ημικαταναμημένη ταξινόμηση). Η συμβολή έγκειται στον εντοπισμό υδρολογικά όμοιων λεκανών μεταξύ των οποίων η μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας (π.χ. παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων) μπορεί να πραγματοποιηθεί με αυξημένη πιθανότητα επιτυχίας σε σχέση με της χρήση απλών κριτηρίων ομοιότητας, όπως αυτό της γεωγραφικής εγγύτητας.

Σε ό,τι αφορά στο τέταρτο ερευνητικό ερώτημα, εξετάστηκε η ημικαταναμημένη προσέγγιση μοντελοποίησης της σχέσης βροχόπτωσης απορροής μιας λεκάνης απορροής, μέσω της ταξινόμησης τοπίου (landscape classification). Η ταξινόμηση τοπίου σε υδρολογικές κλάσεις τοπίου είναι ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο για την ημικαταναμημένη υδρολογική προσομοίωση μέσω μοντέλων βροχόπτωσης – απορροής. Η προσομοίωση μέσω της ταξινόμησης τοπίου επιτρέπει την πρόβλεψη της απορροής σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής.

Μέσω της ταξινόμησης τοπίου και της εφαρμογής του μεθοδολογικού πλαισίου το οποίο ορίζεται και προτείνεται, εντοπίζονται υδρολογικά ομογενείς χωρικές ενότητες εντός μιας λεκάνης απορροής οι οποίες, στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται εντός του επιλεγόμενου κάθε φορά μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής. Υιοθετήθηκε μια τροποποιημένη εκδοχή του υδρολογικού μοντέλου FLEX-Toro του Savenije (2010) για την πρόβλεψη της απορροής μη

μετρούμενης λεκάνης, ενώ προηγήθηκε βαθμονόμηση του μοντέλου σε μετρούμενη λεκάνη. Η αξιοποίηση της ταξινόμησης τοπίου έγινε με μεταφορά των παραμέτρων του μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής στην μη μετρούμενη λεκάνη, που εξετάζεται κάθε φορά.

Στόχος της προσέγγισης της μοντελοποίησης της συμπεριφοράς των κατηγοριών τοπίου είναι η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας για πρόβλεψη της υδρολογικής συμπεριφοράς των λεκανών απορροής υπό συγκεκριμένες συνθήκες, δηλαδή, είτε πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας λεκάνης απορροής στην οποία υπάρχουν μετρήσεις, αλλά εξετάζεται η περίπτωση αβέβαιων μελλοντικών συνθηκών, είτε πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας μη μετρούμενης λεκάνης απορροής με ένα μη βαθμονομημένο μοντέλο, μέσω απλής μεταφοράς παραμέτρων από τις ίδιες κατηγορίες τοπίου άλλης λεκάνης. Η χρήση ενός ευέλικτου μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής σε υδρολογικές εφαρμογές είναι μεγάλης σημασίας, μιας και η ετερογένεια που καλείται να αντιμετωπίσει ένα μοντέλο είναι μεγάλη και σε διαφορετικά πεδία, όπως, για παράδειγμα, στην τοπογραφία και την επιφάνεια του εδάφους, το τοπίο, τη γεωλογία και τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.

Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο εφαρμόστηκε σε τρεις λεκάνες απορροής του ελληνικού χώρου, με ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Ο έλεγχος τριών και τεσσάρων κατηγοριών τοπίου, σε συνδυασμό με διάφορα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, ανέδειξε ότι είναι απαραίτητη η πληροφορία για τις χρήσεις γης και, συγκεκριμένα, τη βλάστηση, ώστε να γίνει επιτυχής ταξινόμηση περιοχών εσωτερικά της λεκάνης απορροής. Η χρήση της βλάστησης για τον εντοπισμό και τον διαχωρισμό των κατηγοριών τοπίου εντός της λεκάνης απορροής προτείνεται για πρώτη φορά σε ημικαταναμημένη ταξινόμηση τοπίου υδρολογικού χαρακτήρα.

Η ταξινόμηση τοπίου πραγματοποιήθηκε με χρήση ορθοεικόνων και ενός Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου στο οποίο εισάγονται οι τιμές τεσσάρων κριτηρίων, εν προκειμένω, γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών καθώς και πληροφορία για τη φυτοκάλυψη (βλάστηση). Η χρήση κριτηρίων, όπως η βλάστηση, γίνεται ώστε να συμβάλουν στη διάκριση μεταξύ των κατηγοριών τοπίου.

Ως προς τη συγκεκριμένη εφαρμογή, η ταξινόμηση, με χρήση μορφομετρικών χαρακτηριστικών, σε κατηγορίες τοπίου του γήινου αναγλύφου τριών λεκανών απορροής επιτρέπει την κατάρτιση μοντέλου βροχόπτωσης απορροής στις εν λόγω λεκάνες απορροής. Επίσης, το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (ΤΝΔ) μελετήθηκε και εφαρμόστηκε στις συγκεκριμένες λεκάνες μέσω της χρήσης τοπικής πληροφορίας σχετικής με το γήινο ανάγλυφο της κάθε λεκάνης απορροής, ελέγχθηκε δειγματοληπτικά και επιβεβαιώθηκε η επιτυχημένη ταξινόμηση των περιοχών της κάθε λεκάνης απορροής στην κατάλληλη κατηγορία τοπίου.

Σύμφωνα με το μεθοδολογικό πλαίσιο της υδρολογικής ταξινόμησης τοπίου που προτείνεται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, είναι δυνατή η μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας μεταξύ όμοιων υδρολογικά κατηγοριών τοπίου σε άλλες λεκάνες απορροής, καθώς οι τιμές των κριτηρίων της υδρολογικής προσομοίωσης (δείκτη NSE) έχουν μικρές αριθμητικές διαφορές στην περίπτωση κατά την οποία μεταφέρονται οι παράμετροι από άλλη λεκάνη, σε σχέση με τη χρήση των παραμέτρων από βαθμονόμηση στην ίδια τη λεκάνη.

Συμπεραίνεται, επομένως, ότι η μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας στο πλαίσιο της ταξινόμησης των λεκανών απορροής σε κατηγορίες τοπίου, χρησιμοποιώντας τοπογραφική πληροφορία του γήινου αναγλύφου και ακολουθώντας όρους υδρολογικής ομοιότητας, οδηγεί σε μικρή απώλεια πληροφορίας και ασφαλή συμπεράσματα ως προς την υδρολογική συμπεριφορά της εξεταζόμενης, μη μετρούμενης λεκάνης απορροής. Η παραπάνω προσέγγιση αποτελεί πολλά υποσχόμενη αντιμετώπιση του προβλήματος της έλλειψης υδρολογικής πληροφορίας.

Επιγραμματικά, τα κύρια πρωτότυπα σημεία της διατριβής συνοψίζονται στα εξής:

- Ανάπτυξη μεθοδολογικού πλαισίου ταξινόμησης, σε κλάσεις υδρολογικής συμπεριφοράς σε αδρή χρονική κλίμακα (ημερήσια), μη μετρούμενων λεκανών απορροής με: (α) πρωτότυπη συνδυασμένη χρήση υδρολογικών υπογραφών και μορφομετρικών χαρακτηριστικών, (β) πρωτότυπη συνδυασμένη χρήση εργαλείων μη επιβλεπόμενης και επιβλεπόμενης ταξινόμησης, καθώς και εργαλείων συμπύκνωσης της χρησιμοποιούμενης πληροφορίας, και (γ) έλεγχο της πρακτικής χρησιμότητας του προτεινόμενου πλαισίου με μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας από μετρούμενες σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής, προφανώς ανήκουσες στην ίδια κλάση υδρολογικής συμπεριφοράς. Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο ονομάστηκε αδιαμέριστη ταξινόμηση.
- Βελτίωση υφιστάμενου μεθοδολογικού πλαισίου ταξινόμησης υποπεριοχών εντός μιας λεκάνης απορροής σε υδρολογικές κατηγορίες τοπίου, με προσθήκη στα χρησιμοποιούμενα μορφομετρικά στοιχεία, της πληροφορίας «κατηγορία βλάστησης» και, στη συνέχεια, έλεγχος της χρησιμότητας του προτεινόμενου πλαισίου με μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας σε αδρή χρονική κλίμακα (ημερήσια) από μετρούμενες σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής, προφανώς από την κάθε υδρολογική κατηγορία τοπίου της εξεταζόμενης μετρούμενης λεκάνης, στην αντίστοιχη κατηγορία της εξεταζόμενης μη μετρούμενης λεκάνης. Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο ορίστηκε ως ημικατανεμημένη ταξινόμηση.
- Ορισμός της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης (ΑΣΕ) για τη δημιουργία υδρογραφικού δικτύου, με (α) πρωτότυπη χρήση ευρέως διαθέσιμης χαρτογραφικής πληροφορίας σχετικά με τα εφήμερα ρέματα και τα ρέματα μόνιμης ροής, (β) θεώρηση της χωροχρονικής μεταβολής του υδρογραφικού δικτύου, και πρόταση εκδοχών αυτού λόγω εποχικής διακύμανσης.
- Ανάπτυξη μεθοδολογικού πλαισίου για την κατάρτιση συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος σε μη μετρούμενη λεκάνη απορροής με χρήση της γνωστής μεθόδου της σταθμισμένης μέσω της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους (drainage density based Rescaled Width Function, ddRWF). Η πρωτοτυπία του προτεινόμενου πλαισίου έγκειται στη μέθοδο εκτίμησης των κινηματικών παραμέτρων της μεθόδου ddRWF (ταχύτητες ροής του νερού επί πλαγιάς και εντός υδατορεύματος).
- Πραγματοποίηση υπολογιστικού πειράματος, μέσω της μεθόδου Monte Carlo, για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης, επί των ορίων της κατακλυζόμενης περιοχής λόγω πλημμύρας, των σφαλμάτων της υψομετρικής πληροφορίας από ΨΜΕ παραχθέντα με διάφορες μεθόδους, στη συνέχεια, παραγωγή πρωτότυπων κριτηρίων προσδιορισμού της αβεβαιότητας των ορίων της κατακλυζόμενης περιοχής από πλημμύρες σχεδιασμού διαφόρων περιόδων επαναφοράς, σε δύο διαφορετικούς τύπους γήινου αναγλύφου (πεδινό, λοφώδες) και, τέλος, συσχέτιση των παραπάνω κριτηρίων με την περίοδο επαναφοράς και τον τύπο αναγλύφου.

1.4 Διάρθρωση της Διδακτορικής Διατριβής

Το περιεχόμενο της παρούσας διατριβής διαρθρώνεται σε 11 κεφάλαια και περιλαμβάνει δύο διακριτά Μέρη (I και II). Στο Μέρος I παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο, η υπάρχουσα γνώση και το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο, ενώ το Μέρος II είναι αφιερωμένο σε συγκεκριμένες εφαρμογές του θεωρητικού υποβάθρου καθώς και στα ερευνητικά αποτελέσματα. Πιο λεπτομερώς, η διάρθρωση της διατριβής, συνοψίζεται στα παρακάτω:

Μέρος I

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Κεφάλαιο 2: Υδρολογική ομοιότητα και μη μετρούμενες λεκάνες απορροής

Κεφάλαιο 3: Χαρακτηριστικά ομοιότητας με αξιοποίηση πληροφορίας του γήινου αναγλύφου

Κεφάλαιο 4: Εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου από Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους - Η Ανάντη Συμβάλλουσα Έκταση

Κεφάλαιο 5: Μεθοδολογικό πλαίσιο Υδρολογικής Προσομοίωσης

Μέρος II

Κεφάλαιο 6: Αδιαμέριστη ταξινόμηση λεκανών απορροής

Κεφάλαιο 7: Εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου - Ανάντη Συμβάλλουσα Έκταση

Κεφάλαιο 8: Κατάρτιση Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος με βάση πληροφορία από Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους

Κεφάλαιο 9: Ημικατανεμημένη ταξινόμηση γήινου αναγλύφου

Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση της επίδρασης της ακρίβειας των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους στα όρια των κατακλυζόμενων περιοχών λόγω πλημμύρας

Κεφάλαιο 11: Συμπεράσματα

Αναφορές.

Στο 1^ο Κεφάλαιο (Εισαγωγή) γίνεται μια εισαγωγή στο θέμα της διατριβής, περιγράφεται το πρόβλημα της έλλειψης μετρήσεων απορροής σε λεκάνες απορροής παγκοσμίως, ως αφορμή για την έναρξη της παρούσας διδακτορικής διατριβής, και παρουσιάζεται η Πρωτοβουλία PUB (Predictions in Ungauged Basins) της Διεθνούς Ένωσης των Υδρολογικών Επιστημών (International Association of Hydrological Sciences - IAHS) του 2003 που είχε στόχο την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας στις προβλέψεις σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής.

Το γεγονός ότι η πλειονότητα των λεκανών παγκοσμίως είναι μη μετρούμενες, οδηγεί σε αναζήτηση μεθόδων υποκατάστασης των απαιτούμενων μετρήσεων. Μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση στο θέμα αποτελεί η αποκλειστική χρήση μορφομετρικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής. Αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων αποκλειστικής χρήσης μορφομετρικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής για την ανάδειξη των επικρατούντων μηχανισμών γένεσης της απορροής, και τη βελτίωση των μοντέλων προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών σε λεκάνες απορροής με φτωχή υδρολογική πληροφορία ή παντελή έλλειψη αυτής.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται το αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής, τα πρωτότυπα σημεία, η συμβολή της διατριβής στην επιστήμη της Υδρολογίας και η διάρθρωση των κεφαλαίων αυτής.

Στο 2^ο Κεφάλαιο (Υδρολογική ομοιότητα και μη μετρούμενες λεκάνες απορροής) πραγματοποιείται εκτενής ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας η οποία σχετίζεται με τις μη μετρούμενες λεκάνες απορροής, γεγονός που αναφέρεται στην έλλειψη δεδομένων από μετρήσεις απορροής. Αναλύεται η διεθνής πρωτοβουλία PUB (Predictions in Ungauged Basins) για τις μη μετρούμενες λεκάνες απορροής. Ακολουθεί η περιγραφή των μηχανισμών γένεσης της απορροής, οι οποίοι δρουν πριν το νερό φτάσει στο υδρογραφικό δίκτυο. Στη συνέχεια, ερευνάται η υδρολογική ομοιότητα λεκανών απορροής (hydrologic similarity), όρος που αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο αποκρίνονται οι λεκάνες απορροής στα κατακρημνίσματα, δηλαδή, στην είσοδο στο υδρολογικό φυσικό σύστημα. Η έννοια της

υδρολογικής ομοιότητας αξιοποιείται στην κατάταξη λεκανών απορροής σε ομάδες όμοιων λεκανών. Για αυτό χρησιμοποιούνται δείκτες που περιγράφουν τις στατιστικές ή τις δυναμικές ιδιότητες των κλιματικών και υδρολογικών μεγεθών ως υδρολογικών υπογραφών των λεκανών απορροής. Το κεφάλαιο κλείνει με αναφορά στη συμβολή των υδρολογικών μοντέλων στην προσπάθεια εντοπισμού ενός συστήματος ταξινόμησης λεκανών απορροής.

Στο 3^ο Κεφάλαιο (Χαρακτηριστικά ομοιότητας με αξιοποίηση πληροφορίας του γήινου αναγλύφου) παρουσιάζονται τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου, είτε υπό μορφή δεικτών, είτε ως χωρικά κατανομημένα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Επίσης, παρουσιάζονται μεγέθη του υδρογραφικού δικτύου που σχετίζονται με την απορροή καθώς και άλλες χρήσιμες παράμετροι του υδρογραφικού δικτύου. Επιπλέον, αναλύεται η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, ως η χωρικά κατανομημένη μεταβλητή που αποτελεί μέτρο του αναπτύγματος του υδρογραφικού δικτύου στη θεωρούμενη λεκάνη και επιτρέπει την ανίχνευση της ετερογένειας του αναγλύφου. Περιγράφεται η μεθοδολογία υπολογισμού των παραπάνω δεικτών με αποκλειστική χρήση ΨΜΕ. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με παρουσίαση της συμβολής της τοπογραφίας, μέσω των τοπογραφικών δεδομένων, και της χρήσης των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών στο εγχείρημα της κατάρτισης ενός συστήματος υδρολογικής ομοιότητας και την ταξινόμηση των λεκανών απορροής.

Στο 4^ο Κεφάλαιο (Εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου από Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους - Η Ανάντη Συμβάλλουσα Έκταση) αναλύεται η διαδικασία εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου από δεδομένα ΨΜΕ. Ορίζεται η Ανάντη Συμβάλλουσα Έκταση (ΑΣΕ) ως το κρίσιμο κριτήριο για την διαδικασία αυτή. Αρχικά, γίνεται αναφορά στο ΨΜΕ και στον τρόπο με τον οποίο αυτό συμβάλλει στον εντοπισμό του υδρογραφικού δικτύου. Ακολουθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση των κριτηρίων διαχωρισμού των κελιών ενός ΨΜΕ σε κελιά του υδρογραφικού δικτύου και στα υπόλοιπα κελιά. Περιγράφεται η προτεινόμενη από τους Papageorgaki and Nalbantis (2017) μέθοδος εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου με χρήση της ΑΣΕ και αναφέρονται τα πλεονεκτήματα της μεθόδου η οποία εισάγει την έννοια της εποχικότητας στον καθορισμό του υδρογραφικού δικτύου. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με περιγραφή της μεθόδου της Ανάλυσης Παλινδρόμησης η οποία χρησιμοποιήθηκε στη διερεύνηση της συσχέτισης της ΑΣΕ και ορισμένων μορφομετρικών χαρακτηριστικών της έκτασης ανάντη των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου.

Στο 5^ο Κεφάλαιο, (Μεθοδολογικό πλαίσιο Υδρολογικής Προσομοίωσης) προσεγγίζονται θεωρητικά οι μεθοδολογίες που απασχόλησαν κατά τη διάρκεια της διδακτορικής διατριβής. Στο πλαίσιο του πυρήνα των ερευνητικών δραστηριοτήτων εντάσσεται η μελέτη της ταξινόμησης των λεκανών απορροής με αποκλειστική χρήση γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών. Ο έλεγχος της ταξινόμησης έγινε με παράλληλη χρήση υδρολογικών υπογραφών, ή με την βοήθεια χειροκίνητης ταξινόμησης επιλεγμένων σημείων ή κελιών της εξεταζόμενης λεκάνης σε προεπιλεγμένες κλάσεις. Παρουσιάζονται μεθοδολογίες επιβλεπόμενης και μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης. Η ταξινόμηση ήταν είτε αδιαμέριστη, με την κάθε λεκάνη απορροής θεωρούμενη ως ενιαία οντότητα, είτε ημικατανομημένη, με ταξινόμηση του γήινου αναγλύφου της λεκάνης απορροής σε κατηγορίες τοπίου. Για την τελευταία ταξινόμηση χρησιμοποιείται ένα ΨΜΕ και ποιοτική πληροφορία για τις κατηγορίες τοπίου, που συνήθως λαμβάνεται από αεροφωτογραφίες ή δορυφορικές εικόνες. Η ποιοτική πληροφορία που εξάγεται από την παρατήρηση των εικόνων χρησιμοποιείται ως δεδομένο εκπαίδευσης ενός νευρωνικού δικτύου ως εργαλείου επιβλεπόμενης ταξινόμησης. Κατά την αδιαμέριστη ταξινόμηση γίνεται έλεγχος των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών υπό την μορφή στατιστικών χαρακτηριστικών, κατά τον οποίο αναζητούνται συσχετίσεις μεταξύ των

γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών, και των κλάσεων που προκύπτουν από τις υδρολογικές υπογραφές. Το μεγάλο πλήθος των ανεξάρτητων μεταβλητών μειώνεται δραστικά με Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (Principal Components Analysis, PCA), μέθοδος που παρουσιάζεται με επιγραμματικό τρόπο.

Σχετικά με την κατάρτιση του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος σε μη μετρούμενη λεκάνη απορροής, υιοθετείται η θεωρία του Γεωμορφολογικού Στιγμιαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph, GIUH). Επιλέγεται η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου (drainage density) ως η μεταβλητή που σχετίζεται με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά μιας λεκάνης, και επιτρέπει την αντιμετώπιση του προβλήματος. Περιγράφονται οι ακόλουθες μέθοδοι υπολογισμού του συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος: η κλασική Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους, και η σταθμισμένη, μέσω της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου, Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους.

Σε ό,τι αφορά στην εκτίμηση της επίδρασης της ακρίβειας των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους στα όρια των κατακλυζόμενων περιοχών λόγω πλημμύρας, περιγράφονται τα εξής: η μέθοδος ποσοτικοποίησης της αβεβαιότητας στο χρησιμοποιούμενο ΨΜΕ, και τα αριθμητικά κριτήρια για την ποσοτικοποίηση της μελετούμενης επίδρασης.

Καταληκτικά, στο κεφάλαιο παρουσιάζονται ορισμένα μοντέλα βροχόπτωσης απορροής που είναι χρήσιμα για την ανάδειξη της υδρολογικής ομοιότητας ή τη μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας από λεκάνη σε λεκάνη, καθώς και ο τρόπος με τον οποίον αυτά χρησιμοποιήθηκαν.

Το 6^ο Κεφάλαιο (Αδιαμέριστη ταξινόμηση λεκανών απορροής) αφορά την εφαρμογή της μεθοδολογίας που προτείνεται για αδιαμέριστη ταξινόμηση λεκανών απορροής, σε 24 λεκάνες απορροής, και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής. Ελέγχεται η δυνατότητα ταξινόμησης 24 λεκανών απορροής, οι οποίες βρίσκονται στον ελλαδικό χώρο, με χρήση κριτηρίων που βασίζονται σε κλιματικές μεταβλητές και σε πληροφορία που εξάγεται από το ανάγλυφο του εδάφους. Για το δείγμα των 24 λεκανών απορροής είναι διαθέσιμες όλες οι απαραίτητες μεταβλητές, και, επομένως, οι λεκάνες που συμμετέχουν είναι όλες μετρούμενες. Στις μεταβλητές αυτές ανήκουν τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, τα οποία βασίζονται στο ανάγλυφο και χρησιμοποιούνται στη συνέχεια ως κριτήρια πρόβλεψης της κλάσης, καθώς και η βροχόπτωση η οποία αποτελεί μετεωρολογική μεταβλητή με μετρήσεις που είναι συνήθως διαθέσιμες στις περισσότερες λεκάνες απορροής παγκοσμίως.

Σύμφωνα με τη διαδικασία της προτεινόμενης ταξινόμησης γίνεται προσπάθεια υποκατάστασης των μετρήσεων απορροής μέσω των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης. Ελέγχεται η συμβολή των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών έναντι των υδρολογικών υπογραφών, οι οποίες υπολογίζονται μέσω των μετρήσεων απορροής και άλλων υδρολογικών μεγεθών. Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται είναι, μεταξύ άλλων, στατιστικά στοιχεία για την κλίση του εδάφους και την τιμή του δείκτη Height Above the Nearest Drainage (HAND).

Η προτεινόμενη διαδικασία ταξινόμησης αποτελείται από δύο βήματα. Στόχος της διαδικασίας είναι να ταξινομηθεί μια λεκάνη, θεωρούμενη ως μη μετρούμενη, σε κλάση με όμοιες με αυτήν λεκάνες απορροής από το σύνολο των 24 λεκανών, έχοντας γνωστά όμως τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, υπολογισμένα από το ΨΜΕ, και μετρημένη την βροχόπτωση. Στο πρώτο βήμα, εκτελείται μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Fuzzy c-means για να προσδιοριστεί ο αριθμός των κλάσεων των λεκανών και οι ίδιες οι κλάσεις. Στο δεύτερο βήμα, εκτελείται επιβλεπόμενη ταξινόμηση μέσω της μεθόδου k-Nearest Neighbour και, με γνωστές τις κλάσεις από το προηγούμενο βήμα, αναζητείται και αποδίδεται η σχέση μεταξύ

των μορφομετρικών χαρακτηριστικών των λεκανών, δηλαδή των παραγόντων πρόβλεψης, και των κλάσεων που έχουν δημιουργηθεί. Βάσει της σχέσης αυτής στη συνέχεια ταξινομείται η μη μετρούμενη λεκάνη απορροής στη κατάλληλη κλάση, σύμφωνα με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της.

Το ποσοστό επιτυχίας της διαδικασίας είναι εύκολο να ελεγχθεί μιας και για όλες τις λεκάνες απορροής υπάρχουν στοιχεία για την κλάση που ανήκουν. Από την εφαρμογή στις 24 λεκάνες απορροής του ελλαδικού χώρου, η προτεινόμενη μεθοδολογία ταξινόμησης έχει ποσοστό επιτυχίας μεγαλύτερο από 95%, ως προς τον εντοπισμό της ορθής κλάσης της υπό ταξινόμηση λεκάνης. Τέλος, οι λεκάνες ταξινομούνται σε 4 κλάσεις, τα χαρακτηριστικά των οποίων περιγράφονται.

Στη συνέχεια γίνεται επέκταση του μεθοδολογικού πλαισίου της υδρολογικής ταξινόμησης ώστε να ελεγχθεί αν είναι δυνατή η μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας μεταξύ όμοιων υδρολογικά λεκανών απορροής. Για τη μεταφορά της υδρολογικής πληροφορίας χρησιμοποιείται μια τροποποιημένη εκδοχή του μοντέλου FLEX-Topo του Savenije (2010) και ο έλεγχος γίνεται σε δύο λεκάνες απορροής οι οποίες ανήκουν στην ίδια κλάση και συγκεκριμένα, στην Κλάση 3.

Βάσει των αποτελεσμάτων αποδεικνύεται ότι είναι δυνατή η ταξινόμηση των μη μετρούμενων λεκανών σε κλάσεις μέσω της χρήσης των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών τους και ότι είναι δυνατή η μεταφορά και χρήση των παραμέτρων του μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής από την δότρια λεκάνη (μετρούμενη λεκάνη απορροής) στη μη μετρούμενη λεκάνη απορροής, η οποία όμως έχει ταξινομηθεί και ανήκει στην ίδια κλάση με τη δότρια. Ως μέτρο επίδοσης του μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης NSE.

Στο 7^ο Κεφάλαιο (Εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου - Ανάντη Συμβάλλουσα Έκταση) η χωροχρονική διακύμανση της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης (ΑΣΕ) μελετάται σε τρεις λεκάνες απορροής. Για τον εντοπισμό των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου και την εκτίμηση της ΑΣΕ, χρησιμοποιούνται κλασικοί τοπογραφικοί χάρτες κλίμακας 1:50000 και ένα ΨΜΕ. Οι κεφαλές των εφήμερων κλάδων και των μόνιμων κλάδων του υδρογραφικού δικτύου συμβάλλουν στον προσδιορισμό των αντίστοιχων τιμών της ΑΣΕ για δύο εποχές του υδρολογικού έτους, την υγρή και την ξηρή περίοδο, αντίστοιχα.

Για κάθε τιμή της ΑΣΕ υπολογίστηκαν η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση μορφομετρικών χαρακτηριστικών της ανάντη λεκάνης της κεφαλής, όπως για παράδειγμα της κλίσης του εδάφους, της τετραγωνικής ρίζας της κλίσης του εδάφους και του δείκτη HAND. Η σχέση μεταξύ της ΑΣΕ και των μορφομετρικών χαρακτηριστικών μελετάται με χρήση της ανάλυσης παλινδρόμησης.

Να σημειωθεί ότι οι τρεις λεκάνες απορροής που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας για την εκτίμηση της ΑΣΕ ανήκουν στην Κλάση 3, σύμφωνα με την ταξινόμηση του προηγούμενου Κεφαλαίου, καθώς επίσης ότι προτείνεται η χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ, ή GIS), για την ανάλυση των δεδομένων. Επισημαίνεται ότι τα εφήμερα ρέματα παρουσιάζουν υψηλή εποχικότητα, η οποία μεταβάλλεται από τόπο σε τόπο, επομένως, η μελέτη τόσο της χρονικής όσο και της χωρικής διακύμανσης της ΑΣΕ γίνεται επιτακτική.

Στο 8^ο Κεφάλαιο (Κατάρτιση Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος με βάση πληροφορία από Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους) μελετάται η χρήση του Γεωμορφολογικού Στιγμαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος υπό τη μορφή της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους (Rescaled

Width Function, RWF), η οποία λαμβάνει υπόψιν την ετερογένεια του γήινου αναγλύφου και της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου.

Η προσέγγιση της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους (Rescaled Width Function, RWF) (Rinaldo et al., 1995) εξετάζεται σε δύο εκδοχές: (α) την κλασική εκδοχή (cRWF), και (β) την τροποποιημένη από τους Di Lazzaro et al. (2015) εκδοχή, γνωστή ως Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους, σταθμισμένη μέσω της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου (drainage density ή dd), ή ddRWF. Η μέθοδος RWF τροποποιείται με αξιοποίηση των ερευνητικών αποτελεσμάτων σχετικών με την Ανάντη Συμβάλλουσα Έκταση (ΑΣΕ). Επίσης, εξετάζονται και συγκρίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα δύο μεθοδολογιών οι οποίες αφορούν την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου: της προτεινόμενης ΑΣΕ και της μεθόδου κατά Tucker et al. (2001).

Το μεθοδολογικό πλαίσιο εφαρμόζεται σε έξι λεκάνες απορροής του ελλαδικού χώρου, ενώ αξιοποιείται το διαθέσιμο Μοναδιαίο Υδρογράφημα από δεδομένα βροχόπτωσης και απορροής, που υπάρχει για μία από τις παραπάνω λεκάνες απορροής. Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με ένα τυπικό Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα.

Στο 9^ο Κεφάλαιο (Ημικατανεμημένη ταξινόμηση γήινου αναγλύφου) μελετάται η προσέγγιση ημικατανεμημένης μοντελοποίησης της σχέσης βροχόπτωσης – απορροής μιας λεκάνης απορροής. Υιοθετείται η ταξινόμηση τοπίου (landscape classification) σε υδρολογικές κατηγορίες τοπίου, μέσω της οποίας εντοπίζονται υδρολογικά ομογενείς χωρικά ενότητες που στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στην ημικατανεμημένη υδρολογική μοντελοποίηση. Η ταξινόμηση τοπίου σε υδρολογικές κλάσεις τοπίου είναι ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο για την ημικατανεμημένη υδρολογική προσομοίωση μέσω μοντέλων βροχόπτωσης – απορροής. Η προσομοίωση μέσω της ταξινόμησης τοπίου επιτρέπει την πρόβλεψη της απορροής σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής.

Η ταξινόμηση τοπίου πραγματοποιήθηκε με χρήση ορθοεικόνων, γεωμορφολογικών κριτηρίων υπολογισμένων από ένα ΨΜΕ και πληροφορίας σχετικής με τη φυτοκάλυψη, μέσω ενός Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου. Με χρήση της ταξινόμησης τοπίου εντοπίζονται υδρολογικά ομογενείς χωρικές ενότητες εντός μιας λεκάνης απορροής οι οποίες, στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται εντός του επιλεγόμενου κάθε φορά μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής. Υιοθετήθηκε μια τροποποιημένη εκδοχή του υδρολογικού μοντέλου FLEX-Topo του Savenije (2010) για πρόβλεψη της απορροής μη μετρούμενης λεκάνης, ενώ προηγήθηκε βαθμονόμηση του μοντέλου σε μετρούμενη λεκάνη. Η αξιοποίηση της ταξινόμησης τοπίου έγινε με μεταφορά των παραμέτρων του μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής στην μη μετρούμενη λεκάνη, που εξετάζεται κάθε φορά.

Η υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης για κάθε κατηγορία τοπίου είναι σε αντιστοιχία με τους επικρατούντες μηχανισμούς γένεσης απορροής. Στη συνέχεια, εκτελείται η ημικατανεμημένη υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής με χρήση του τροποποιημένου υδρολογικού μοντέλου βροχόπτωσης απορροής FLEX-Topo (Savenije, 2010) και λαμβάνεται η εκτίμηση της παροχής της λεκάνης απορροής.

Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο εφαρμόστηκε σε τρεις λεκάνες απορροής του ελληνικού χώρου, με ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Ο έλεγχος τριών και τεσσάρων κατηγοριών τοπίου, σε συνδυασμό με διάφορα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, ανέδειξε ότι είναι απαραίτητη η πληροφορία για τις χρήσεις γης και, συγκεκριμένα, τη βλάστηση, ώστε να γίνει επιτυχής ταξινόμηση περιοχών εσωτερικά της λεκάνης απορροής.

Στο 10^ο Κεφάλαιο (Εκτίμηση της επίδρασης της ακρίβειας των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους στα όρια των κατακλυζόμενων περιοχών λόγω πλημμύρας) εντάσσεται η διερεύνηση της

επίδρασης της αβεβαιότητας στη διατιθέμενη πληροφορία σχετικά με την γήινη επιφάνεια επί της εκτάσεως των κατακλυζόμενων περιοχών λόγω πλημμύρας, ενώ αξιοποιήθηκαν διαθέσιμα αποτελέσματα από έρευνα η οποία έχει γίνει στο παρελθόν στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου με τίτλο «Επίδραση της αβεβαιότητας των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους στην αβεβαιότητα των κατακλυζόμενων εκτάσεων λόγω πλημμύρας», το οποίο ανατέθηκε από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο στο πλαίσιο του Προγράμματος Ενίσχυσης Βασικής Έρευνας (ΠΕΒΕ) τον Νοέμβριο 2009 σε ερευνητική ομάδα του Τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ με επιστημονικό υπεύθυνο τον τότε Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ Ι. Ναλμπάντη.

Στο πλαίσιο της διατριβής εξετάζεται η επίδραση της αβεβαιότητας του ΨΜΕ ως προς τον προσδιορισμό των ορίων της κατακλυζόμενης ζώνης. Για την αναπαράσταση της γήινης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν ΨΜΕ και τοπογραφική πληροφορία από φωτογραμμετρικά δεδομένα και τοπογραφικά διαγράμματα.

Μετά τη διόδευση των υδρογραφημάτων στο κατάντη τμήμα των δύο λεκανών απορροής που εξετάστηκαν, έγινε χάραξη των ορίων των κατακλυζόμενων περιοχών. Η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας στο ΨΜΕ πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Monte Carlo.

Από τα αποτελέσματα που λήφθηκαν με βάση την εφαρμογή της μεθοδολογίας στις δύο λεκάνες απορροής εκτιμήθηκαν οι πρωτότυπες παράμετροι, οι οποίες οδηγούν σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της αβεβαιότητας των ΨΜΕ στα όρια των κατακλυζόμενων περιοχών λόγω πλημμύρας.

Στο *11^ο Κεφάλαιο*, (Συμπεράσματα) προσεγγίζονται τα συμπεράσματα της διατριβής και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος, το τεύχος της διατριβής ολοκληρώνεται με τις Αναφορές.

2 Υδρολογική ομοιότητα και μη μετρούμενες λεκάνες απορροής

2.1 Μη μετρούμενες λεκάνες απορροής

Με τον όρο λεκάνη απορροής (drainage basin, catchment, watershed) νοείται ο φυσικός υποδοχέας των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που δρα, με τα μορφολογικά, εδαφολογικά και λοιπά φυσικά χαρακτηριστικά της, ως ένα σύστημα μετασχηματισμού. Η λεκάνη απορροής θεωρείται η θεμελιώδης χωρική μονάδα αναφοράς στην υδρολογία, αναφέρεται σε συγκεκριμένη διατομή ενός υδατορεύματος και ορίζεται ως η γεωγραφική περιοχή, η βροχόπτωση της οποίας συνεισφέρει στην απορροή που διέρχεται από την εν λόγω διατομή. Η μέτρηση της απορροής γίνεται και αναφέρεται σε συγκεκριμένη διατομή υδατορεύματος, στη θέση που είναι τοποθετημένος ένας υδρομετρικός σταθμός. Το όριο της (επιφανειακής) λεκάνης απορροής καλείται *υδροκρίτης* και ορίζεται με βάση το υδρογραφικό δίκτυο και τις ισούψεις καμπύλες. Η υπόγεια λεκάνη (ή υδροφορέας) μπορεί να εκτείνεται εκτός των ορίων της επιφανειακής λεκάνης απορροής (Τσακίρης, 1995· Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999). Από τις διεργασίες που εκτελούνται εντός της λεκάνης απορροής, η επιφανειακή απορροή ενδιαφέρει περισσότερο, είτε γιατί δίνει το μεγαλύτερο μέρος των εκμεταλλεύσεων των υδατικών πόρων, είτε γιατί συνδέεται με τη δημιουργία σημαντικών φυσικών κινδύνων όπως οι πλημμύρες. Οι λεκάνες απορροής που δεν έχουν καταγεγραμμένες χρονοσειρές απορροής σε κάποια διατομή του υδρογραφικού δικτύου τους, καλούνται μη μετρούμενες λεκάνες απορροής. Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι πλειονότητα των λεκανών απορροής είναι μη μετρούμενες. Οι λεκάνες απορροής αυτές είναι κυρίως ορεινές και οδηγούν τα νερά που δέχονται σε άλλες κατάντη λεκάνες απορροής, δημιουργώντας συχνά πλημμύρες.

Από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα, οι πλημμύρες απασχολούν τον άνθρωπο και επηρεάζουν τη ζωή του, που αναπτύσσεται σε γειτνίαση με τα ποτάμια και επομένως για την αντιμετώπιση των φαινομένων αναπτύχθηκαν τεχνικές για την μέτρηση της παροχής των ποταμών ή της στάθμης τους, με πιο γνωστό παράδειγμα, την μέτρηση της στάθμης του ποταμού Νείλου.

Το Νειλόμετρο είναι μια κατασκευή που βρίσκεται στο νησί Ρόντα στο Νείλο, και επικοινωνούσε μέσω μιας σήραγγας με το ποτάμι. Η στάθμη του ποταμού μετριόταν σε μια βαθμονομημένη στήλη στο κέντρο της κατασκευής, η οποία καταλήγει, στο άνω μέρος, της σε ένα κορινθιακό κιονόκρανο. Οι μετρήσεις της στάθμης του Νείλου ξεκινούν στις αρχές του 7ου αιώνα μ.Χ., ενός ταραγμένου αιώνα κατά τον οποίον η κυριαρχία στην Αίγυπτο εναλλασσόταν ανάμεσα στους Βυζαντινούς, τους Πέρσες και τους Άραβες, και, παρά την εναλλαγή της κυριαρχίας, οι μετρήσεις συνεχίζονταν κανονικά και συστηματικά, ενώ έγιναν σποραδικές κατά τη διάρκεια της Οθωμανικής περιόδου. Το μεγάλο ενδιαφέρον αυτής της χρονοσειράς, είναι ότι μας δίνει πραγματικά και συστηματικά (χωρίς διακοπές) δεδομένα μετρήσεων για ένα φυσικό μέγεθος, την στάθμη του Νείλου, για ένα πολύ μεγάλο διάστημα, 849 χρόνια, ξεκινώντας από το 622 μ.Χ.

Πολύ αργότερα γίνονται οι πρώτες προσπάθειες μέτρησης της παροχής ενός ποταμού, περίπου τον 18^ο αιώνα, με τη χρήση του σωλήνα, από τον Pitot, με το επιστόμιο, από τον Borda, και με τον μιλίσκο του Woltman.

Από την αρχαιότητα, γίνεται προσπάθεια κατανόησης των παραμέτρων του υδρολογικού κύκλου αν και, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η φιλοσοφική θεώρηση των φαινομένων οδήγησε στην κατασκευή έργων εκείνη την εποχή και μετέπειτα ακολούθησε η μέτρηση των μεγεθών. Όμως σήμερα, η έλλειψη μετρήσεων έχει δημιουργήσει ένα πρόβλημα διαχείρισης του νερού. Οι λόγοι για τους οποίους δεν γίνονται μετρήσεις στις λεκάνες απορροής, συχνά είναι προφανείς, και άλλοτε όχι. Αν και δεν αφορά το αντικείμενο της διατριβής, συνήθως, λόγοι οικονομικοί ή λόγοι, οι οποίοι σχετίζονται με το μέγεθος ή την σπουδαιότητα των λεκανών απορροής οδηγούν στην εμφάνιση φαινομένων έλλειψης υδρομετεωρολογικών μετρήσεων, παρά την άνθιση της τεχνολογίας. Από την άλλη, ο σύγχρονος τρόπος ζωής και οι αυξανόμενες ανάγκες των ανθρώπινων κοινωνιών σε νερό, σε συνδυασμό με την έλλειψη μετρήσεων απορροής, δυσκολεύουν την γενικότερη διαχείριση των υδατικών πόρων. Τα δεδομένα αποτελούν, λοιπόν, τη βάση σε κάθε είδους πρόοδο προς την κατανόηση και την μοντελοποίηση των υδρολογικών διεργασιών.

Το πρόβλημα των δεδομένων στην υδρολογία το εντοπίζουν εύστοχα οι Sorooshian et al. (1983), οι οποίοι αναφέρουν ότι είναι προτιμότερη η ποιότητα από την ποσότητα, αν και η τελευταία είναι το βασικό χαρακτηριστικό ενός συνόλου δεδομένων (dataset). Τόσο λοιπόν η έλλειψη ή η σπανιότητα όσο και η ποιότητα, ήταν παραδοσιακά στην υδρολογία το κύριο πρόβλημα, και παραμένει υπό τη μορφή αβεβαιότητας σε κάθε υδρολογική εφαρμογή.

Την πρώτη δεκαετία του 21^{ου} αιώνα, έγιναν σημαντικά βήματα προόδου ως προς τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα δεδομένων που σχετίζονται με το περιβάλλον, καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα μεταβλητών, και προέρχονται από διαφορετικές τεχνολογίες συλλογής δεδομένων και στρατηγικές παρατήρησης. Επίσης, γίνονται προσπάθειες εκμετάλλευσης και καλύτερης διαχείρισης των ιστορικών δεδομένων που είναι ήδη διαθέσιμα (Soulsby et al., 2008).

Ένα κρίσιμο ζήτημα ως προς την ποιότητα, την ακρίβεια, και τις απαιτήσεις σε δεδομένα, είναι η εξάρτηση αυτών από την κλίμακα. Σε παγκόσμιο επίπεδο, και σε δεδομένα χαμηλής ανάλυσης, οι τηλεπισκοπικές μέθοδοι συλλογής δεδομένων παρέχουν δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως γενικό υπόβαθρο με χαμηλό κόστος, ενώ αντίθετα, σε επίπεδο λεκάνης απορροής, οι τοπικές βάσεις δεδομένων παρέχουν ανάλογα με τη διαθεσιμότητα και την ακρίβεια, πιο λεπτομερή πληροφορία, σε υψηλότερο κόστος έναντι των αδρομερέστερων κλιμάκων.

Δεδομένης της προόδου στη συλλογή δεδομένων παγκόσμιας κλίμακας, βιώνουμε μια εποχή στην οποία, παρά τις μειώσεις πολλών επίγειων σταθμών συλλογής παρατηρήσεων, κυρίως λόγω οικονομικών περιορισμών, η επιστήμη της υδρολογίας δεν περιορίζεται πλέον από την έλλειψη κλιματικών δεδομένων. Της δίνεται επίσης η δυνατότητα, λόγω της αυξανόμενης διαθεσιμότητας και της βελτίωσης της ποιότητας των δεδομένων από τηλεπισκοπικές μεθόδους, του συνδυασμού διαφορετικών ειδών δεδομένων για τη βελτίωση της πρόβλεψης σε μετρούμενες και μη λεκάνες απορροής, μέσω της τεχνικής της αφομοίωσης δεδομένων (data assimilation) (Troch et al., 2003).

Στις μέρες μας, στην επιστήμη της υδρολογίας, η ευρεία διαθεσιμότητα χωρικών δεδομένων που καλύπτουν σχεδόν το σύνολο της επιφάνειας του πλανήτη, και ιδιαίτερα η ελεύθερη διάθεση των ΨΜΕ, έχει συμβάλει στον άμεσο καθορισμό όλων εκείνων των μορφομετρικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής, π.χ., ορίων της λεκάνης απορροής ή του υδροκρίτη, στην εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου με ημιαυτόματες τεχνικές, στην εκτίμηση μεγεθών

για την περιγραφή του αναγλύφου και της επίδρασής του στη γένεση της απορροής της λεκάνης απορροής, αντικαθιστώντας τις χρονοβόρες διαδικασίες που συνήθως εφαρμόζονταν πάνω σε αναλογικούς, παλαιότερα, και σε ψηφιακούς, πιο πρόσφατα, χάρτες.

Παρά τη συνεχώς αυξανόμενη διαθεσιμότητα δεδομένων που περιγράφουν τις ιδιότητες του πλανήτη Γη, λόγω της ανάπτυξης των δορυφορικών τεχνικών συλλογής δεδομένων, η ύπαρξη μεγεθών που η μέτρησή τους παραμένει δύσκολη ή μεγάλου κόστους διαδικασία, αποτελεί γεγονός. Στα μεγέθη της δεύτερης κατηγορίας, εντάσσεται πληθώρα υδρολογικών μεταβλητών. Η έλλειψη μετρήσεων απορροής, για παράδειγμα, συναντάται σε παγκόσμιο επίπεδο και ουσιαστικά συμβάλλει, εισάγοντας επιπρόσθετη αβεβαιότητα, στη μοντελοποίηση υδρολογικών διεργασιών. Ελλείψεις συνήθως συναντώνται σε δεδομένα ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, σε μετεωρολογικά μεγέθη και, κυρίως, σε μετρήσεις απορροής στις διατομές ποταμών.

Οι λεκάνες απορροής στις οποίες δεν υπάρχουν μετρημένες χρονοσειρές απορροής, ονομάζονται μη μετρούμενες λεκάνες απορροής (ungauged basins). Όμως, γενικότερα, μπορεί μια λεκάνη απορροής να χαρακτηριστεί ως μη μετρούμενη και στην περίπτωση που δεν υπάρχουν μετρήσεις ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων, ή άλλων μετεωρολογικών μεγεθών εντός αυτής. Στην παρούσα διατριβή, ο όρος *μη μετρούμενη λεκάνη απορροής* θα χρησιμοποιείται αποκλειστικά και μόνο για την έλλειψη μετρήσεων της απορροής.

Ως επί το πλείστον, οι μη μετρούμενες λεκάνες απορροής είναι ορεινές, με έντονες κλίσεις και συνήθως χωρίς ανθρωπογενή δραστηριότητα και, επομένως, χωρίς ενδιαφέρον ως προς τη διαχείριση των τοπικών υδατικών πόρων αυτών. Η παραπάνω συνθήκη οδηγεί σε προβλήματα στην μελέτη τους, αλλά συχνά και σε προβλήματα στη μελέτη των κατάντη λεκανών απορροής που συνδέονται και δέχονται τα νερά μη μετρούμενων λεκανών απορροής. Τα προβλήματα συνήθως αφορούν την μοντελοποίηση διεργασιών των μη μετρούμενων λεκανών απορροής, και την αυξημένη αβεβαιότητα των τελικών αποτελεσμάτων των μοντέλων, λόγω έλλειψης δεδομένων βαθμονόμησης. Συχνά, δε, καθιστούν τη μελέτη των μη μετρούμενων λεκανών αδύνατη. Η έλλειψη αυτή στα υδρολογικά δεδομένα κινητοποίησε την επιστημονική κοινότητα στην προσπάθεια υποκατάστασης της υδρολογικής πληροφορίας και στην ανάπτυξη εναλλακτικών μεθόδων πρόβλεψης της υδρολογικής συμπεριφοράς των μη μετρούμενων λεκανών απορροής. Το πρόβλημα των μη μετρούμενων λεκανών απορροής είναι γνωστό στην υδρολογική επιστημονική κοινότητα και μελετάται με ιδιαίτερους χειρισμούς, λόγω της κρισιμότητάς του, καθώς γίνεται προσπάθεια ανάπτυξης επιστημονικής γνώσης, μεθοδολογιών χειρισμού, και εργαλείων, για την εις βάθος κατανόηση αυτού.

Βιβλιογραφικά, πολλές είναι οι εφαρμογές στις οποίες οι υδρολόγοι λαμβάνουν αποφάσεις για την αντιμετώπιση του κενού που δημιουργείται λόγω της έλλειψης μετρήσεων.

Στην οροσειρά των Ιμαλαίων, για παράδειγμα, οι λεκάνες απορροής χαρακτηρίζονται από έντονα ορεινό ανάγλυφο και έλλειψη μετρημένων απορροών (Adamowski et al., 2012) και λόγω της πολυπλοκότητας της σχέσης μεταξύ βροχόπτωσης και απορροής (Jakeman and Hornberger, 1993), αλλά και της έλλειψης μετρήσεων, η προσαρμοστικότητα και η απόδοση των υδρολογικών μοντέλων στην πρόβλεψη των απορροών είναι περιορισμένη στην περιοχή. Για την περιοχή των Ιμαλαίων, τα μοντέλα που βασίζονται σε δεδομένα (data-based models) αποτελούν μια εναλλακτική λύση που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της απορροής στις μη μετρούμενες λεκάνες απορροής, με πιο συνηθισμένες τεχνικές την Multiple linear regression (MLR) και autoregressive moving average (ARMA) models (Raman and Sunilkumar, 1995· Young, 1999· Adamowski, 2008a, b).

Η ραγδαία εξέλιξη της χρήσης των μοντέλων (φυσικής βάσης ή στατιστικών μοντέλων) σε εθνικό επίπεδο (Booker and Woods, 2014· Archfield et al., 2015), για πρόβλεψη της απορροής σε μη μετρούμενες λεκάνες, είναι γεγονός, μιας και πλέον είναι κατανοητό από την επιστημονική κοινότητα ότι δεν αρκεί η μέτρηση της απορροής σε συγκεκριμένες θέσεις, αλλά παράλληλα είναι απαραίτητη και η μέτρηση της απορροής όλων των κλάδων που συμβάλλουν σε αυτές τις θέσεις (McMillan et al., 2016).

Χάρη στις δυνατότητες των υπολογιστών, των ανοιχτών παγκόσμιων βάσεων υδρολογικών δεδομένων, και της διαδεδομένης χρήσης εθνικών μοντέλων τα προηγούμενα χρόνια, οι επιστήμονες οδηγήθηκαν στο συνδυασμό όλων των παραπάνω προσεγγίσεων. Η τάση για χρήση εθνικών υδρολογικών μοντέλων επεκτείνεται περαιτέρω, με τα πρώτα παραδείγματα παγκόσμιας χρήσης υψηλής ανάλυσης υδρολογικών μοντέλων (Bierkens et al., 2015· Wood et al., 2011), παρά την έλλειψη υδρολογικής γνώσης, σε παγκόσμια κλίμακα (Beven and Cloke, 2012· Gupta et al., 2012).

Κλιματικά δεδομένα που καλύπτουν την εθνική ή την παγκόσμια κλίμακα, και δεδομένα απορροής όπου αυτά υπάρχουν, χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισαγωγής σε μοντέλα που εκτελούν υπολογισμούς σε εθνική κλίμακα. Η οργάνωση των δεδομένων απορροής είτε σε ανοιχτές διεθνείς βάσεις όπως η παγκόσμια βάση δεδομένων απορροής (<http://grdc.bafg.de>), ή σε εθνικές βάσεις δεδομένων απορροής (Composite Global Runoff Fields) (Fekete et al., 2002), κάνουν την αναζήτηση ευκολότερη τα τελευταία χρόνια (McMillan et al., 2016). Η τάση για εθνικά υδρολογικά μοντέλα επεκτείνεται περαιτέρω, με τα πρώτα παραδείγματα παγκόσμιας υψηλής ανάλυσης υδρολογικών μοντέλων να εφαρμόζονται ήδη (Bierkens et al., 2015· Wood et al., 2011), αν και η έλλειψη υδρολογικής γνώσης σε παγκόσμια κλίμακα παραμένει ένα αμφιλεγόμενο ζήτημα (Beven and Cloke, 2012· Gupta et al., 2012). Η εκτέλεση ενός εθνικού υδρολογικού μοντέλου απαιτεί κατάλληλες μεθόδους οργάνωσης, σχεδιασμού, και εφαρμογής, ώστε να μπορεί αυτό να εκτελέσει αποτελεσματικούς υπολογισμούς για μεγάλο αριθμό λεκανών απορροής. Από την ενασχόληση με υδρολογικές εφαρμογές τέτοιου επιπέδου και τη μοντελοποίηση ενός σύνθετου υδρολογικού προβλήματος, επιστημονικά, για την ερευνητική κοινότητα μόνον οφέλη προκύπτουν, καθόσον η μοντελοποιημένη συμπεριφορά μιας λεκάνης απορροής μπορεί να συγκριθεί, παραδείγματος χάριν μέσω των υδρομετεωρολογικών παραμέτρων, με άλλες λεκάνες για την εις βάθος κατανόηση των ομοιοτήτων και των διαφορών της δομής του μοντέλου, και της ικανότητας απόδοσης των διαφορετικών υδρολογικών συνθηκών (Gupta et al., 2014).

2.2 Η δεκαετία PUB (Predictions in Ungauged Basins) – Μια διεθνής πρωτοβουλία

Στην αρχή του 21^{ου} αιώνα, η Διεθνής Ένωση Υδρολογικών Επιστημών (International Association of Hydrological Sciences, IAHS), ώθησε το ερευνητικό ενδιαφέρον των υδρολόγων στην σε βάθος κατανόηση των υδρολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στις λεκάνες απορροής, στον έλεγχο της αβεβαιότητας, και στην ανάπτυξη υδρολογικών μοντέλων, με στόχο την ρεαλιστικότερη μοντελοποίηση των διεργασιών και την βελτίωση της ικανότητας πρόβλεψης. Αφορμή για την ώθηση προς αυτή την κατεύθυνση και, ουσιαστικά, τον καθορισμό του στόχου για τη δεκαετία 2003-2012, με τίτλο «*A decade of predictions in ungauged basins (PUB)*», αποτέλεσε το γεγονός ότι το τότε υπάρχον θεωρητικό πλαίσιο (υδρολογικά μοντέλα, εξισώσεις, εμπειρικές σχέσεις) ήταν ανεπαρκές στην πρόβλεψη της απορροής των μη μετρούμενων λεκανών απορροής (Sivapalan, 2003b). Πιο αναλυτικά, ο στόχος ήταν να δημιουργηθεί υδρολογική κουλτούρα που θα συνέβαλλε στην κατανόηση των υδρολογικών

διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε μια λεκάνη, θα περιορίζε την αβεβαιότητα των διαδικασιών πρόβλεψης, και θα σχετιζόταν με το σχεδιασμό ρεαλιστικών μοντέλων που θα μπορούσαν να πραγματοποιούν καλύτερες υδρολογικές προβλέψεις (Hrachowitz et al., 2013).

Αφορμή για την πρωτοβουλία αποτέλεσε η ανάγκη για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας μιας λεκάνης απορροής. Για παράδειγμα, η κατανόηση του τρόπου, με τον οποίο αυτή αποκρίνεται σε μια μεταβλητή εισόδου (π.χ. τη βροχόπτωση), και η κατανόηση της μορφής, ή των φυσικών ιδιοτήτων μιας λεκάνης απορροής, μπορεί να συμβάλλουν στην κατανόηση των διεργασιών μη μετρούμενων λεκανών απορροής (Wagener et al., 2007· Gupta et al., 2008).

Η πρωτοβουλία PUB αφορούσε στην διαμόρφωση και εφαρμογή κατάλληλων προγραμμάτων που να εμπλέκουν και να εμπνέουν την επιστημονική κοινότητα, συντονισμένα και με αποτελεσματικό τρόπο, για την επίτευξη προόδου σε θέματα που σχετίζονται με την ικανότητα να γίνονται υδρολογικές προβλέψεις σε μη μετρημένες λεκάνες απορροής. Την περίοδο εκείνη, ήταν εμφανής η αδυναμία των τότε υδρολογικών θεωριών, των μοντέλων και των εμπειρικών μεθόδων, να κάνουν προβλέψεις σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής (Hrachowitz et al., 2013). Υπήρχε ανάγκη κατανόησης της υδρολογικής συμπεριφοράς και του τρόπου παραγωγής της απορροής των μη μετρούμενων λεκανών.

Η πρωτοβουλία PUB προέτρεπε την επιστημονική κοινότητα, παρέχοντας μεγαλύτερη συνοχή και αρμονία στις επιστημονικές δραστηριότητες και αυξημένες προοπτικές, θέτοντας μακροπρόθεσμους στόχους, όπως: (1) την ανάπτυξη και βελτίωση της ικανότητας των υφιστάμενων υδρολογικών μοντέλων να προβλέπουν υδρολογικά μεγέθη σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής, περιορίζοντας την αβεβαιότητα, και (2) την ανάπτυξη νέων και καινοτόμων υδρολογικών μοντέλων που να λαμβάνουν υπόψιν τη μεταβλητότητα των υδρολογικών διεργασιών στο χρόνο και στο χώρο, ώστε να προβλέπουν με αξιοπιστία τα υδρολογικά μεγέθη σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής.

Το ερώτημα που τέθηκε ως προς την ευρεία έλλειψη υδρολογικών δεδομένων, την έλλειψη μετρήσεων απορροής, σε λεκάνες απορροής παγκοσμίως και, κατ' επέκταση, την αδυναμία των ειδικών να προβλέψουν τις διεργασίες που επιτελούνται εντός των λεκανών απορροής, έστρεψε το ενδιαφέρον σε μια προσπάθεια αναζήτησης απαντήσεων στην γεωμορφολογία της ίδιας της λεκάνης απορροής, σε μετρήσεις ή εκτιμήσεις γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης, και στη μελέτη του κλίματος, της τοπογραφίας, της γεωλογίας, του είδους του εδάφους και της κάλυψης γης και της εκτίμηση της επίδρασης αυτών των πληροφοριών. Λόγω της προσπάθειας για πρόβλεψη της απορροής στις μη μετρούμενες λεκάνες, η χρήση περιβαλλοντικών παραμέτρων συνέβαλε στην εκτίμηση διαφοροποιήσεων στις μεταβλητές του υδρολογικού κύκλου (Costa and Foley, 1999· Groisman et al., 2004), και συνεισέφερε αξιοσημείωτα στην γενικότερη προσπάθεια, καθώς, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας PUB, χρησιμοποιήθηκαν περιβαλλοντικά δεδομένα σε εφαρμογές παγκόσμιου επιπέδου, όπως δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας, μέχρι και τοπικού επιπέδου, όπως περιβαλλοντικά δεδομένα και δεδομένα απορροής (Sheffield and Wood, 2008).

Αν και η πρωτοβουλία PUB έθεσε γενικότερους κατευθυντήριους άξονες έρευνας για να οδηγήσει την υδρολογική κοινότητα στην επιτυχία των προκαθορισμένων στόχων, ως προς τη διαχείριση των δεδομένων, στόχος ήταν να εξαχθεί η μέγιστη δυνατή πληροφορία από τα δεδομένα, είτε με πιο αποτελεσματική εκμετάλλευση των υπάρχοντων διαθέσιμων δεδομένων, είτε με εκμετάλλευση νεότερων δεδομένων για κατανόηση των διεργασιών εντός των μη μετρούμενων λεκανών απορροής.

Παράλληλα, από τη βιβλιογραφία γίνεται κατανοητό ότι χρησιμοποιήθηκαν τοπικού και παγκόσμιου επιπέδου δεδομένα, σε συγκριτικές μελέτες που οδηγούν στην σε βάθος

κατανόηση των μηχανισμών απόκρισης, παρά την πολυπλοκότητα και τη χωρική και χρονική ετερογένεια που τους χαρακτηρίζει. Η υδρολογική γνώση που εξάγεται από τις παραπάνω μελέτες χρησιμοποιείται στην κατάρτιση ρεαλιστικών μοντέλων, που συμπεριλαμβάνουν στις εξισώσεις τους τις ιδιαιτερότητες των μηχανισμών απόκρισης.

Η γνώση που συγκεντρώνεται συμβάλλει στην ανάπτυξη ενός συστήματος που θα επιτρέπει την ομαδοποίηση, την κατάταξη, και πιθανόν τη μεταφορά της σε άλλες περιοχές, όπως οι μη μετρούμενες λεκάνες απορροής, καθώς και την ανάπτυξη μεθοδολογιών για επέκταση ή μεταφορά της υδρολογικής πληροφορίας. Στο πλαίσιο αυτό εντάσσονται προσπάθειες ανάπτυξης και εφαρμογής τεχνικών περιοχοποίησης και μεθόδων ταξινόμησης και κατηγοριοποίησης των λεκανών απορροής με γνώμονα την υδρολογική τους ομοιότητα και τους μηχανισμούς απόκρισης των λεκανών απορροής σε γεγονότα βροχόπτωσης. Η συμβολή των υδρολογικών μοντέλων στην αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων με σκοπό να επιτρέψουν πιο αξιόπιστες προβλέψεις σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής και να περιορίσουν την αβεβαιότητα, αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη μίας νέας υδρολογικής προσέγγισης στην περίπτωση έλλειψης δεδομένων.

Καταληκτικά, κατά τη διάρκεια της δράσης της πρωτοβουλίας PUB αλλά και με αφορμή την παρότρυνση προς αυτή τη θεματολογία, δημοσιεύτηκαν μελέτες που προσέγγισαν και συνέβαλαν στην υδρολογική γνώση, πραγματοποίησαν προβλέψεις σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής, περιορίζοντας την αβεβαιότητα, και διαμόρφωσαν ταξινομήσεις λεκανών απορροής. Όλες οι παραπάνω μελέτες αποτελούν επιτεύγματα αυτής της υδρολογικής δεκαετίας και, ταυτόχρονα, καθορίζουν τα πρώτα βήματα μιας νέας προσπάθειας ανάπτυξης ενός συστήματος ομοιότητας των λεκανών απορροής. Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι η έμφαση της πρωτοβουλίας PUB δόθηκε στις προβλέψεις σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής καθώς και στη κατανόηση των δεδομένων και των διαδικασιών για να υποστηριχθούν αυτές οι προβλέψεις.

2.3 Μηχανισμοί γένεσης της επιφανειακής απορροής

2.3.1 Γενικά

Κατά τη δεκαετία του 1960 και με αφορμή την τότε Διεθνή Υδρολογική Δεκαετία, δόθηκε ώθηση στη μελέτη των μηχανισμών γένεσης της απορροής, με στόχο την καλύτερη κατανόηση των εσωτερικών διεργασιών που συμβάλλουν στη γένεση της απορροής και την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το νερό κινείται από τις κορυφές των κλιτύων μέχρι τα μικρά ανάντη ρέματα κατά τη διάρκεια των επεισοδίων βροχόπτωσης αλλά και στο μεσοδιάστημα μεταξύ αυτών των επεισοδίων. Η παραπάνω μελέτη έγινε με δύο βασικούς τρόπους: (α) μέσω μετρήσεων πεδίου και της αναπαράστασης, μέσω μετρήσεων, των διεργασιών που συμβαίνουν εντός μιας λεκάνης απορροής και (β) μέσω θεωρητικών προσεγγίσεων, στις οποίες η χρήση μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών γινόταν με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Μέσω των μετρήσεων πεδίου, εντοπίστηκαν και περιγράφηκαν σημαντικές διεργασίες, όπως η συμβολή της πλευρικής ροής στην επιφανειακή απορροή ως επίγεια ροή, η υποδερμική ροή, και η υπόγεια ροή. Επίσης, απεδείχθη ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της επίγεια ροής προέρχεται είτε από ανάντη μερική επιφάνεια, η οποία είναι λίγο - πολύ σταθερή σε έκταση και επηρεάζεται από την κατανομή των τύπων του εδάφους, είτε από την μη σταθερή έκταση στο χρόνο ανάντη επιφάνειας, γνωστή με τον όρο *μεταβλητή επιφάνεια συμβολής*, η οποία εντοπίζεται χωρικά ανάντη των κεφαλών των ρεμάτων (ή απλά δίπλα στα ρέματα) και

επηρεάζεται από τα τοπογραφικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των κλιτύων. Η μεταβλητή επιφάνεια συμβολής, ή μερική επιφάνεια, (variable source area, partial area) είναι η επιφάνεια στην οποία εμφανίζεται επίγεια απορροή και η έκτασή της δεν είναι σταθερή στο χρόνο αλλά αυξάνεται κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης και μειώνεται μετά από αυτήν (Betson, 1964).

Επίσης, οι μετρήσεις πεδίου κατάφεραν να αποδείξουν ποιοτικά την συχνά χρησιμοποιούμενη φράση, ότι η κρισιμότητα των διαφορετικών διεργασιών εξαρτάται από παράγοντες όπως το κλίμα, η γεωλογία, η τοπογραφία, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, η βλάστηση και οι χρήσεις γης. Δεν μπορεί να παραγνωριστεί το γεγονός ότι η ποικιλία των συνθηκών που συμβαίνουν στο πεδίο, σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα των ίδιων των διεργασιών, εμπόδισε την ανάπτυξη μιας γενικευμένης ερμηνείας που να βασίζεται αποκλειστικά και μόνο στις παρατηρήσεις, με αποτέλεσμα οι υδρολόγοι γρήγορα να στρέψουν το ερευνητικό ενδιαφέρον στα μαθηματικά μοντέλα, και να απομονώσουν τις διάφορες συνιστώσες του συστήματος. Αποτέλεσμα της υδρολογικής στροφής είναι τα γνωστά φυσικής βάσης μαθηματικά μοντέλα που εφαρμόζονται σε πληθώρα εφαρμογών παγκοσμίως.

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι μηχανισμοί γένεσης της απορροής που δρουν πριν το νερό φτάσει στο υδρογραφικό δίκτυο, και στους οποίους περιλαμβάνονται επίγειες και υπεδάφειες ροές που συμβαίνουν σε διαφορετική χρονική κλίμακα. Η δυσκολία στον εντοπισμό και στην κατανόηση των μηχανισμών έγκειται στο γεγονός ότι, μετά από μια έντονη βροχόπτωση, το νερό κινείται πάνω ή μέσα στο έδαφος και όχι, για παράδειγμα, σε ένα κανάλι, ή εντός της φυσικής κοίτης ενός υδατορεύματος, σύμφωνα με τις γνωστές εξισώσεις της υδραυλικής. Επίσης, υποθέσεις για τις προϋποθέσεις που χρειάζονται για τον σχηματισμό της απορροής έχουν μεν γίνει, αλλά δεν έχουν γενικευμένη ισχύ, στοιχείο που αποδεικνύει την πολυπλοκότητα των διεργασιών. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τον Horton (1933), η επίγεια ροή εμφανίζεται όταν η ένταση της βροχόπτωσης υπερβαίνει την διηθητική ικανότητα του εδάφους. Ωστόσο, σε πολλά εδάφη στα οποία παρατηρείται επίγεια ροή, οι μετρούμενες ταχύτητες διήθησης είναι μεγαλύτερες από τις εντάσεις βροχόπτωσης.

Η λεκάνη απορροής αποτελεί τον φυσικό υποδοχέα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και δρα με όλα τα μορφολογικά, εδαφολογικά και λοιπά φυσικά χαρακτηριστικά της, σαν ένα σύστημα μετασχηματισμού, ορισμένο στο χώρο της λεκάνης απορροής (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999· Μαμάσης, 2012). Γενικότερα, η θεμελιώδης σχέση μεταξύ βροχόπτωσης και απορροής μπορεί να εκφραστεί ως μια αέναη κίνηση του νερού μέσω του υδρολογικού κύκλου. Σε αυτή τη διαδικασία και για τις απλούστερες περιπτώσεις, ο επιφανειακός υδροκρίτης (τοπογραφικός) και ο υπόγειος συμπίπτουν και κάθε υδατόρευμα λαμβάνει νερό, το οποίο απορρέει μόνο μέσα στη δική του λεκάνη απορροής. Κάθε λεκάνη απορροής θεωρείται ως το σύστημα μετασχηματισμού που αποτελεί τον φυσικό υποδοχέα των δεδομένων εισόδου, δηλαδή των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων P , και τα μετασχηματίζει σε εξαγόμενα που είναι η απορροή.

Με τον όρο *επιφανειακή απορροή* περιγράφεται η φυσική κίνηση του νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας κατά μήκος των υδάτινων διαδρομών που ονομάζονται υδατορεύματα (Robinson and Ward, 1990), τα οποία, λόγω κλίμακας, υπόκεινται σε περαιτέρω υποδιαίρεση σε ποτάμια, ή ρέματα, ανάλογα με το μέγεθος, την παροχή και τα χαρακτηριστικά τους.

Συνήθως, στις υδρολογικές εφαρμογές, η ακριβής μαθηματική αναπαράσταση των πολύπλοκων μηχανισμών γένεσης της επιφανειακής απορροής δεν είναι απαραίτητη, επομένως χρησιμοποιείται μια απλουστευμένη σχηματοποίηση της απορροής και, έτσι, το ενδιαφέρον δεν στρέφεται στη μελέτη των μηχανισμών που είναι υπεύθυνοι για τη δημιουργία απορροής.

Η απλουστευμένη σχηματοποίηση της απορροής περιλαμβάνει δύο συνιστώσες, των οποίων η διάκριση βασίζεται στο ρυθμό πραγματοποίησής τους και όχι στο μηχανισμό δημιουργίας τους.

Η άμεση απόκριση της ροής των υδατορευμάτων είναι εμφανής, κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων, καθώς ένα μέρος της βροχόπτωσης ακολουθεί μια γρήγορη πορεία προς τα υδατορεύματα. Από την άλλη, σε πολλά υδατορεύματα, παρατηρείται συνεχής ροή που δεν σχετίζεται με τις έντονες βροχοπτώσεις, καθώς αυτή παρατηρείται και σε περιόδους ανομβρίας, γεγονός που αποδεικνύει ότι ένα μέρος της βροχόπτωσης ακολουθεί μια πολύ αργή πορεία προς τα υδατορεύματα. Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι δύο συνιστώσες της επιφανειακής απορροής είναι η άμεση απορροή (direct flow ή quickflow) και η βασική απορροή (baseflow or slowflow).

Αν και στην υδρολογία το πρωταρχικό ζήτημα είναι η κατανόηση της δημιουργίας της απορροής και ο εντοπισμός των μηχανισμών γένεσης της επιφανειακής απορροής στις λεκάνες απορροής, από την άλλη μεριά, υπάρχει ένας αυξανόμενος αριθμός μελετών που τονίζουν την ανάγκη για κατανόηση, σε βάθος, του πώς οι λεκάνες απορροής συγκρατούν το νερό (McNamara et al., 2011). Η διαδικασία της συγκράτησης νερού από τις λεκάνες απορροής είναι απαραίτητο να είναι γνωστή, αφού: «Οι αλλαγές στην αποθηκευμένη ποσότητα νερού μετριάζουν την ροή και ασκούν κρίσιμο έλεγχο σε ένα ευρύ φάσμα υδρολογικών, χημικών, φυσικών και βιολογικών λειτουργιών μιας λεκάνης απορροής» (Speed et al., 2011). Ο εντοπισμός του μηχανισμού γένεσης της απορροής, σε πολλές μελέτες (Spence, 2007· Spence, 2010· Phillips et al., 2011), ανάγεται στην ανάλυση της χωρικής κατανομής των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου και της αποθηκευτικής τους δυνατότητας, καθώς, από τους μελετητές, η δυνατότητα αποθήκευσης νερού των κεφαλών θεωρείται κρίσιμης σημασίας για την εκτίμηση των ανάντη τμημάτων της λεκάνης απορροής που συμβάλλουν στη δημιουργία της επιφανειακής απορροής.

Στο ίδιο πλαίσιο εντάσσονται μελέτες που αναφέρουν ότι η δυνατότητα μιας λεκάνης απορροής να παράγει απορροή από ένα γεγονός βροχόπτωση εξαρτάται από το που είναι αποθηκευμένο το νερό και κατά πόσο αυτό είναι συνδεδεμένο με την έξοδο της λεκάνης απορροής. Ο Rogger και οι συνεργάτες του (2012a, 2012b), βασιζόμενοι σε λεπτομερείς μετρήσεις πεδίου για τον εντοπισμό των μηχανισμών γένεσης της επιφανειακής απορροής και της αποθηκευτικότητας, έδειξαν ότι η αποθηκευτικότητα των λεκανών απορροής, μπορεί να οδηγήσει στον καθορισμό ενός κατωφλίου καθορισμού της υδρολογικής συμπεριφοράς παρόμοιο με αυτό του πορώδους των μικροπόρων (Hrachowitz et al., 2013· Viglione et al., 2018).

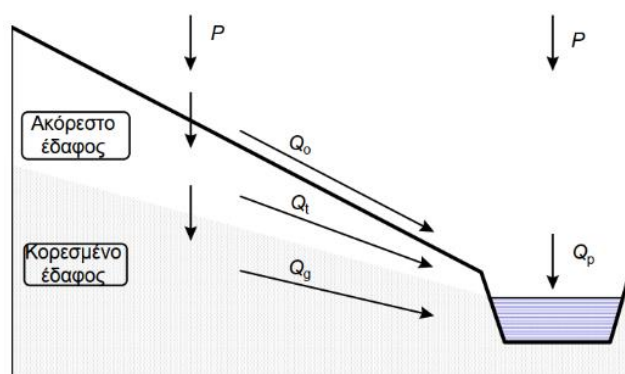
Οι υδρολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα, σε μία λεκάνη απορροής, γίνονται αντιληπτές με τη μελέτη και την κατανόηση του υδατικού ισοζυγίου. Η ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου περιλαμβάνει τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα όλων των μορφών του νερού, στην ξηρά, τη θάλασσα και την ατμόσφαιρα, όπου πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι διαδρομές του νερού σε οποιαδήποτε μορφή του (στερεή, υγρή, αέρια), οι ποσότητες και οι χρόνοι των μετακινήσεων αυτών ή οι χρόνοι αποθήκευσης ή παραμονής του σε υδάτινα σώματα. Σε παγκόσμιο επίπεδο, κατά μέσο όρο, (στον χρόνο) το 36% της συνολικής βροχόπτωσης που πέφτει στην επιφάνεια του εδάφους απορρέει στη θάλασσα (ωκεανούς) υπό την μορφή της επιφανειακής απορροής. Παρόμοιο είναι και το ποσοστό σε επίπεδο λεκάνης απορροής, αν και αυτό διαφοροποιείται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης και τις συνθήκες που επικρατούν στην λεκάνη.

Στις υδρολογικές διεργασίες εντάσσονται οι κατακρημνίσεις ή ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (κυρίως βροχόπτωση, χιονόπτωση, χαλαζόπτωση κ.ά.), η εξατμησοδιαπνοή (εξάτμιση από το έδαφος και τις υδάτινες επιφάνειες, διαπνοή των φυτών), η κατακράτηση

(παρεμπόδιση ποσότητας νερού από τα φυτά, επιφανειακή παγίδευση νερού στην επιφάνεια του εδάφους, κατακράτηση χιονιού), η διήθηση νερού στο έδαφος (ακόρεστη ζώνη), η κατείδυση (επαναφόρτιση υπόγειων υδροφορέων), η επιφανειακή απορροή (επίγεια και υποδερμική ροή) και η υπόγεια απορροή (επιφανειακή ή διεπιφανειακή εκφόρτιση και εκροή στη θάλασσα).

Οι χειρσαίες υδρολογικές διεργασίες αφορούν την κίνηση του νερού πάνω και κάτω από την επιφάνεια της γης σε οποιαδήποτε κλίμακα (είτε χωρική είτε χρονική) και περιλαμβάνουν όλες τις διεργασίες που συνοδεύουν την κίνηση του νερού καθώς και βιολογικές διεργασίες που αλληλοεπιδρούν με την κίνηση (π.χ. ανθρώπινες δραστηριότητες, διαπνοή φυτών).

Με τον όρο *Μηχανισμοί Γένεσης της Απορροής* σε μία λεκάνη απορροής, νοούνται όλες οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια του εδάφους και κάτω από αυτή, και συμβάλλουν στο μετασχηματισμό του νερού, που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους ως κατακρημνίσματα, σε απορροή. Επομένως, με τον όρο *Μηχανισμοί Γένεσης της Απορροής*, νοούνται οι μηχανισμοί που δρουν πριν το νερό φτάσει στο υδρογραφικό δίκτυο (επίγειες και υποδερμικές/υπεδάφεις ροές). Άλλωστε, η κίνηση του νερού μέσω του υδρογραφικού δικτύου, είναι εύκολα κατανοητή. Η δυσκολία είναι σε όλους εκείνους τους μηχανισμούς γένεσης που δρουν πριν το νερό φτάσει στο υδρογραφικό δίκτυο. Να σημειωθεί, πως η χρονική διακύμανση των διεργασιών δυσχεραίνει την κατανόηση. Η χρονική διακύμανση γίνεται αισθητή όταν ποτάμια, στα οποία δεν έχει σημειωθεί εντός της λεκάνης τους επεισόδιο βροχόπτωσης, έχουν συνεχείς μετρημένες παροχές ετήσιας βάσης. Στο Σχήμα 2-1 παρουσιάζονται, σε μορφή σχήματος, οι συνιστώσες που συμβάλλουν στην επιφανειακή απορροή.



Σχήμα 2-1: Οι διαφορετικές προελεύσεις της επιφανειακής απορροής

Αν και ο όρος *επιφανειακή απορροή* αναφέρεται στη ροή του νερού που κυκλοφορεί στη διατομή των υδατορευμάτων, παρόλα αυτά, υπάρχουν διάφορες πηγές προέλευσης της επιφανειακής απορροής:

- Q_p : άμεσα κατακρημνίσματα στην επιφάνεια του υδατορεύματος (direct precipitation onto the water surface),
- Q_o : επίγεια ροή (overland flow),
- Q_t : υποδερμική ροή (shallow subsurface flow, throughflow, interflow) και
- Q_g : υπόγεια ροή (groundwater flow, deep subsurface flow).

Αναλυτικότερα, η επίγεια ροή είναι μέρος της συνολικής απορροής (total runoff), η οποία φτάνει στην έξοδο της λεκάνης απορροής δια μέσω της επιφανειακής απορροής (overland flow) και της άμεσης μετατροπής της βροχόπτωσης, που πέφτει στην επιφάνεια των υδατορευμάτων,

σε απορροή των υδατορευμάτων, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις στη συνολική απορροή περιλαμβάνεται και η υπεδάφια ροή (throughflow), η οποία αποτελεί εκφόρτιση του υπόγειου υδροκρίτη σε κάποια απόσταση από το υδατόρευμα (Robinson and Ward, 1990).

2.3.2 Άμεσα κατακρημνίσματα στην επιφάνεια του υδατορεύματος

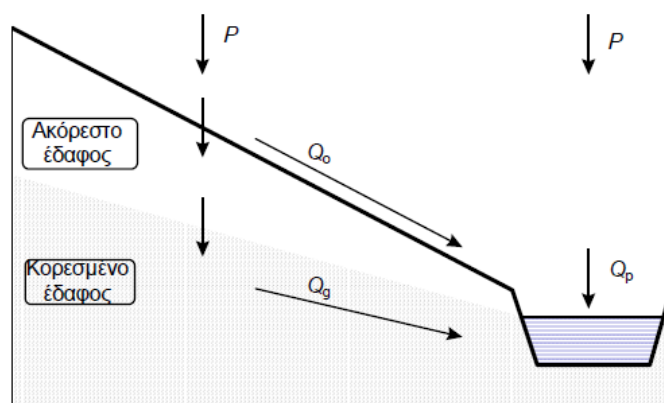
Τα κατακρημνίσματα που φτάνουν στην επιφάνεια του υδρογραφικού δικτύου μετατρέπονται άμεσα σε επιφανειακή απορροή. Η άμεση τροφοδοσία της απορροής από κατακρημνίσματα ουσιαστικά πραγματοποιείται κάθε φορά που υπάρχει γεγονός κατακρημνίσεων, όμως, κατά κανόνα, η συμμετοχή της μεταβλητής αυτής στη συνολική επιφανειακή απορροή είναι αμελητέα, επειδή η επιφάνεια του υδρογραφικού δικτύου είναι συνήθως πολύ μικρότερη σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους σε μια λεκάνη απορροής. Εξάιρεση στην παραπάνω περίπτωση αποτελούν οι λεκάνες που καλύπτονται σε μεγάλο ποσοστό της έκτασης τους από υδάτινα σώματα (π.χ. λίμνες).

2.3.3 Η επίγεια ροή

Ο όρος *επίγεια ροή* (overland flow), Q_0 , αναφέρεται στη δισδιάστατη ροή που πραγματοποιείται στην επιφάνεια του εδάφους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-2. Αυτός είναι σαφής όταν πρόκειται για τελείως αδιαπέρατη επιφάνεια, αλλά έχει ενδιαφέρον η μελέτη αυτού όταν η ροή λαμβάνει χώρα σε διαπερατό φυσικό έδαφος. Στον δεύτερο τύπο εδάφους/επιφάνειας, διακρίνονται δύο περιπτώσεις επίγειας ροής, που προκαλούνται από διαφορετικούς μηχανισμούς:

- η επίγεια ροή Horton (Hortonian overland flow) και
- η επίγεια ροή λόγω κορεσμού (saturation overland flow) (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Η βασική αιτία δημιουργίας της επίγειας ροής, είναι η ανικανότητα του εδάφους να απορροφήσει το επιφανειακό νερό που ουσιαστικά αποτελεί το αποτέλεσμα δύο πρότερων καταστάσεων: της υψηλής έντασης των κατακρημνίσεων και/ή της μικρής τιμής της διηθητικής ικανότητας του εδάφους (infiltration capacity).



Σχήμα 2-2: Οι διαφορετικές προελεύσεις της επιφανειακής απορροής σύμφωνα με την υπόθεση Horton.

Η γνωστή υπόθεση Horton, που προέκυψε μετά από έρευνες του ίδιου το 1933, τον οδήγησαν στο συμπέρασμα, ότι η επίγεια ροή (επίγεια ροή Horton) ξεκινά όταν η ένταση της βροχόπτωσης ξεπεράσει τη διηθητική ικανότητα του εδάφους, f , καθώς τότε δημιουργούνται συνθήκες κατάκλισης του εδάφους, με την προϋπόθεση, όμως ότι το έδαφος έχει μη μηδενική κλίση. Οι συνθήκες κατάκλισης παίζουν ρόλο στον κορεσμό του επιφανειακού καλύμματος του εδάφους, ενώ στα βαθύτερα στρώματα το έδαφος παραμένει ακόρεστο. Για το λόγο αυτό,

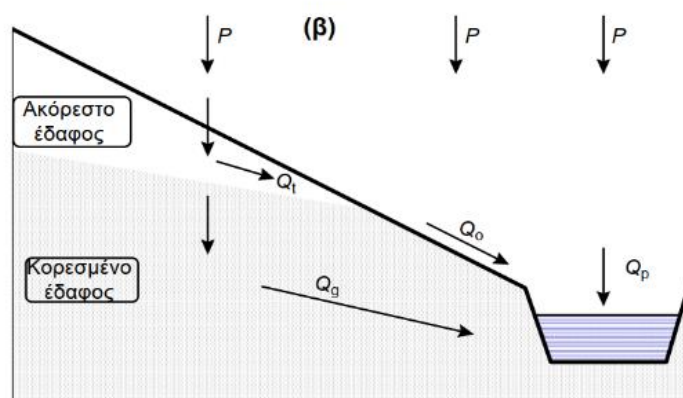
η επίγεια ροή είναι γνωστή με τον όρο επίγεια ροή λόγω κορεσμού από πάνω (overland flow saturated from above). Επομένως, σύμφωνα με την υπόθεση Horton, ένα τμήμα των κατακρημνίσεων P διηθείται τροφοδοτώντας τους υπόγειους υδροφορείς και το υπόλοιπο τμήμα ρέει ως επίγεια ροή Q_o (Σχήμα 2-2). Παράλληλα, οι υπόγειοι υδροφορείς τροφοδοτούν και αυτοί την επιφανειακή απορροή αλλά με πολύ βραδύτερο ρυθμό, μέσω της υπόγειας ροής Q_g .

Παρά το γεγονός ότι η υπόθεση Horton φαίνεται εύλογη και έχει επιβεβαιωθεί εργαστηριακά, στην πραγματικότητα η ροή Horton δεν παρατηρείται σε περιοχές με φυτοκάλυψη, μιας και εκεί το εδαφικό κάλυμμα έχει αρκετά μεγάλη διαπερατότητα, που υπερβαίνει την ένταση βροχής ακόμη και σε ισχυρά επεισόδια. Επομένως, η υπόθεση Horton είναι εφαρμόσιμη κυρίως σε περιοχές με πολύ αραιή βλάστηση και άνυδρα κλίματα (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999). Ιδανικές συνθήκες για την εμφάνιση της επίγειας ροής Horton αποτελούν άγονες ή ημι-άνυδρες περιοχές με μέτριες έως απότομες κλίσεις, όπου η βλάστηση είναι αραιή ή ανύπαρκτη με αποτέλεσμα η επιφάνεια του εδάφους να εκτίθεται στο φαινόμενο των βροχοπτώσεων. Επακόλουθο αυτών των συνθηκών που εμφανίζονται στην νοτιοδυτικές ΗΠΑ, όπου ο Horton πραγματοποίησε τα πειράματά του, είναι η εμφάνιση της απορροής υπό τη μορφή επίγειας ροής Horton.

Αντίθετα, σε υγρές περιοχές όπου η φυτοκάλυψη είναι πυκνότερη και εκτεταμένη, η επίγεια ροή παρατηρείται σπάνια, καθώς είναι λογικό η διήθηση (infiltration) να είναι αυξημένη, καθότι οι περιοχές αυτές αποτελούν δασώδεις ή καλλιεργήσιμες εκτάσεις και η διήθηση είναι απαραίτητη.

Ενδιάμεση των δύο παραπάνω περιπτώσεων είναι η περίπτωση πολλών υγρών και ύφυγων περιοχών, όπου η επίδραση της τοπογραφίας ή ο τύπος του εδάφους διευκολύνουν την αύξηση της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα σε περιόδους βροχοπτώσεων ή την εμφάνιση φαινομένων υπεδάφιας ροής. Υπό αυτές τις συνθήκες, η αποθηκευτικότητα του εδάφους σε νερό μειώνεται και η στάθμη των υπόγειων υδροφόρων πέφτει στο μηδέν, με αποτέλεσμα, την εμφάνιση της επίγειας ροής λόγω κορεσμού (Robinson and Ward, 1990).

Λόγω των αμφιβολιών σχετικά με την εφαρμοσιμότητα της υπόθεσης Horton, που κυρίως εκφράστηκαν από υδρολόγους της Αμερικανικής Δασικής Υπηρεσίας, διατυπώθηκε μια εναλλακτική υπόθεση, πιο εμπειριστατωμένη, με βάση παρατηρήσεις και μετρήσεις πεδίου, η οποία έγινε γνωστή ως υπόθεση Hewlett (Hewlett, 1961· Hewlett and Hibbert, 1967).



Σχήμα 2-3: Οι διαφορετικές προελεύσεις της επιφανειακής απορροής σύμφωνα με την υπόθεση Hewlett.

Σύμφωνα με την υπόθεση Hewlett, η διαπερατότητα του ανώτερου στρώματος του εδάφους, στο μεγαλύτερο μέρος μιας λεκάνης απορροής, είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μην επιτρέπει τον

κορεσμό του *από πάνω*, άρα ούτε και την κατάκλυση, ακόμη και σε ισχυρές και παρατεταμένες καταιγίδες. Έτσι, στο αρχικό στάδιο ενός επεισοδίου βροχής, η βροχοπτώση διηθείται στο σύνολό της χωρίς να πραγματοποιείται επίγεια ροή. Κάτω από το έδαφος όμως πραγματοποιείται πλευρική ροή τόσο στην κορεσμένη περιοχή του εδάφους Q_g , όσο και στην ακόρεστη Q_t . Η σύγκλιση αυτών των ροών στις κατάντη περιοχές έχει ως αποτέλεσμα την ανύψωση του φρεάτιου ορίζοντα, (της διαχωριστικής επιφάνειας κορεσμένου και ακόρεστου εδάφους) μέχρι την επιφάνεια του εδάφους σε ένα τμήμα της έκτασης (Σχήμα 2-3). Σε αυτό το τμήμα δεν είναι πλέον δυνατή η διήθηση, αλλά, αντίθετα, είναι πιθανή η ανάβλυση υπόγειου νερού (return flow), οπότε η βροχοπτώση μετατρέπεται σε επίγεια ροή ή καλύτερα *σε επίγεια ροή λόγω κορεσμού (από κάτω)*.

Πρακτικά, ίδιος τύπος ροής εμφανίζεται και στις περιπτώσεις στις οποίες, σε μικρό βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, εμφανίζεται αδιαπέρατος γεωλογικός σχηματισμός (υποκαθιστά το κορεσμένο τμήμα του εδάφους). Στη λεπτή στρώση διαπερατού εδάφους κοντά στην επιφάνεια, όσο διαρκεί η βροχή και η διήθηση, δημιουργείται προσωρινός υπόγειος ορίζοντας που ανεβαίνει, και όταν φτάσει στην επιφάνεια, ξεκινά η επίγεια ροή.

Σε κάθε περίπτωση η επίγεια ροή κατά Hewlett θυμίζει τη λειτουργία μιας δεξαμενής που αρχικά γεμίζει και στη συνέχεια υπερχειλίζει. Αντίθετα, η επίγεια ροή κατά Horton θυμίζει τη λειτουργία ενός φίλτρου, που η υπερχείλιση συμβαίνει όταν η φόρτισή του ξεπεράσει τη διηθητική του ικανότητα (Κουτσογιάννη και Ξανθόπουλο, 1999).

Επίσης, να σημειωθεί ότι η επιφάνεια επί της οποίας πραγματοποιείται η επίγεια ροή δεν είναι σταθερή στο χρόνο, αλλά αυξάνεται κατά τη διάρκεια της βροχής και μειώνεται μετά την παύση της βροχής. Με αυτό δεδομένο προκύπτει η έννοια της μεταβλητής επιφάνειας συμβολής ή της μερικής επιφάνειας (variable source area ή partial area) (Betson, 1964). Η μεταβλητή επιφάνεια συμβολής διαφέρει από την μερική επιφάνεια, καθώς η μερική επιφάνεια είναι σχετικά σταθερή ως προς τη θέση της και το εμβαδόν της, ενώ η μεταβλητή επιφάνεια συμβολής έχει αυξομειώσεις ακολουθώντας τη βροχοπτώση και, επιπλέον, η μερική επιφάνεια συμβάλλει, με το νερό της, στο υδρογραφικό δίκτυο με επίγεια ροή Horton, ενώ, στην περίπτωση της μεταβλητής επιφάνειας συμβολής, το εκτεταμένο υδρογραφικό, λόγω βροχοπτώσεων, δίκτυο λαμβάνει νερό μέσω υποδερμικής ροής.

2.3.4 Υποδερμική ροή

Σύμφωνα με τους Κουτσογιάννη και Ξανθόπουλο (1999), ο όρος υποδερμική ροή χρησιμοποιείται για να περιγράψει μαζικά διάφορους τύπους υπεδάφινων ροών που πραγματοποιούνται σε σχετικά ταχείς ρυθμούς κατά τη διάρκεια ισχυρών βροχοπτώσεων, συμβάλλοντας τελικώς στην επιφανειακή απορροή. Όπως, όμως, φαίνεται στις προσεγγίσεις των Robinson and Ward (1990) και του Horton (1945), η υποδερμική ροή πραγματοποιείται σε μια ζώνη κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, η οποία βρίσκεται σε ακόρεστη κατάσταση, χωρίς να αποκλείεται η ροή σε συνθήκες κορεσμού από πάνω.

Οι κυριότεροι παράγοντες που ευνοούν τη δημιουργία υποδερμικής ροής είναι η ανισοτροπία και η ανομοιογένεια των εδαφών ως προς την ιδιότητα της υδραυλικής αγωγιμότητας αυτών, και, ιδίως, λόγω των επιφανειακών εδαφικών στρώσεων (Robinson and Ward, 1990). Ειδικότερα, έχει παρατηρηθεί ότι οι επιφανειακές εδαφικές στρώσεις παρουσιάζουν μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα σε διεύθυνση παράλληλη με την επιφάνεια του εδάφους, παρά στην κατακόρυφη διεύθυνση. Αυτό είναι γνωστό ως ανισοτροπία του εδάφους. Αποτέλεσμα του φαινομένου είναι ότι το νερό που εισχωρεί στο έδαφος τείνει να κινηθεί πλευρικά και όχι κατακόρυφα. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι η υδραυλική αγωγιμότητα τείνει να είναι

μεγαλύτερη στα εδαφικά στρώματα που βρίσκονται αμέσως κάτω από την επιφάνεια και μικρότερη στα βαθύτερα στρώματα, κάτι που είναι γνωστό ως ανομοιογένεια του εδάφους. Η ανομοιογένεια αυτού του είδους συντείνει στη δημιουργία υποδερμικής ροής, επειδή το νερό τείνει να διαφύγει πλευρικά και όχι να διεισδύσει βαθύτερα, όπου συναντά μεγαλύτερη αντίσταση.

Η υποδερμική ροή συνήθως ακολουθεί τα επίπεδα αλλαγής της δομής του επιφανειακού εδάφους και τη διεπιφάνεια μεταξύ του εξαλλοιωμένου από αποσάθρωση επιφανειακού μανδύα και του μητρικού πετρώματος. Επίσης, διαδρομές υποδερμικής ροής δημιουργούν οι λεγόμενοι μακροπόροι, δηλαδή επιφανειακοί πόροι μέσα στο έδαφος με πολύ πιο μεγάλες διαστάσεις από τους συνήθεις πόρους ανάμεσα στους εδαφικούς κόκκους (Robinson and Ward, 1990). Οι μακροπόροι δημιουργούνται από τη δράση του παγώματος του νερού, από τις ρίζες των φυτών που έχουν αποσυντεθεί, από διάφορα ζώα που διανοίγουν οπές και, γενικώς, από διάφορες βιολογικές δραστηριότητες, και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη γένεση της απορροής (Dingman, 1994).

2.3.5 Υπόγεια ροή

Το νερό που κατέρχεται προς τα κατώτερα στρώματα φτάνει στη ζώνη όπου το έδαφος βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού, οδηγώντας έτσι στο σχηματισμό των υπόγειων υδροφορέων. Υπό την επίδραση των χωρικών μεταβολών της πιεζομετρίας, το νερό των υπόγειων υδροφορέων κινείται προκαλώντας υπόγεια ροή, η οποία εμφανίζεται στο έδαφος είτε κατά μήκος των φυσικών υδατορευμάτων που βρίσκονται σε επαφή με τους υδροφορείς, είτε με τη μορφή σημειακών πηγών σε ορισμένες θέσεις. Αυτές είναι οι μορφές με τις οποίες η υπόγεια ροή συμβάλλει στην επιφανειακή απορροή. Να σημειωθεί ότι η χρονική κλίμακα της υπόγειας ροής, δεν είναι ανάλογη με της υπόγειας ροής που περιγράφηκε προηγουμένως, με αποτέλεσμα η υπόγεια ροή των υδροφορέων να πραγματοποιείται με πολύ βραδείς ρυθμούς, και, άρα, η τροφοδοσία της επιφανειακής απορροής από την υπόγεια ροή να μην παύει μετά τη λήξη των πλημμυρικών επεισοδίων αλλά να είναι διαρκής.

Καταληκτικά να σημειωθεί ότι η μελέτη και κατανόηση των μηχανισμών γένεσης της απορροής δεν συμβάλλει μόνο στην ανάπτυξη νέων τεχνικών πρόβλεψης της απορροής μετά από γεγονότα βροχοπτώσεων, αλλά συμβάλλει και στην κατανόηση της επίδρασης των υδρολογικών διεργασιών στον σχηματισμό των διαφόρων μορφών του αναγλύφου (landforms).

2.4 Η έννοια της υδρολογικής ομοιότητας

Ο όρος *υδρολογική ομοιότητα* (hydrologic similarity) μεταξύ λεκανών απορροής, κυρίως, αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο αποκρίνονται οι λεκάνες απορροής, στα κατακρημνίσματα, που αποτελούν είσοδο στο υδρολογικό φυσικό σύστημα.

Στο πλαίσιο της Δεκαετίας PUB, της Διεθνούς Ένωσης Υδρολογικών Επιστημών, καταβλήθηκε προσπάθεια να αντιμετωπιστεί η αβεβαιότητα των υδρολογικών προβλέψεων. Αυτή εισάγεται λόγω του ελλιπούς επιπέδου κατανόησης του τρόπου απόκρισης των λεκανών απορροής και λόγω της ελλιπούς κατανόησης της χωροχρονικής ετερογένειας των υδρολογικών διεργασιών που δρουν σε διαφορετικές κατηγορίες τοπίου και σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Εκτιμάται ότι, η έννοια της υδρολογικής ομοιότητας, θα συμβάλει στην προσπάθεια ελέγχου της αβεβαιότητας, και ότι, από την εποχή του Beven (2000) –κατά την οποία η μοναδικότητα του τοπίου αναλυόταν σε διαφορετικές υδρολογικές διεργασίες, σε διαφορετικές χωροχρονικές κλίμακες, λόγω της ετερογένειας της φύσης– περνάμε στην εποχή

στην οποία η ευρεία διάθεση πληροφορίας σε συνδυασμό με τη στατιστική, συμβάλλουν στον εντοπισμό προτύπων και, κατ' επέκταση, υδρολογικής ομοιότητας.

Η βασική ιδέα της υδρολογικής ομοιότητας συνδέεται στενά με τις δυνατότητες αξιοποίησης αυτής για λεκάνες απορροής που ανήκουν στην ίδια ομάδα όμοιων λεκανών. Οι δυνατότητες αυτές έγκεινται στα εξής: (1) μεταφορά πληροφορίας μέσω των τεχνικών περιοχοποίησης από λεκάνες απορροής με υδρολογικές μετρήσεις προς μη μετρούμενες λεκάνες απορροής, (2) παραγωγή γενικευμένης γνώσης του τρόπου απόκρισης μιας λεκάνης απορροής και των μηχανισμών που συμβάλλουν στην δημιουργία της απορροής, (3) κατανόηση της ετερογένειας του τοπίου και των κλιματικών συνθηκών που επικρατούν, και, κατ' επέκταση, των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικές κλίμακες (χωρική και χρονική), (4) κατανόηση των δυναμικών επιπτώσεων των περιβαλλοντικών αλλαγών στη δημιουργία της απορροής και την αβεβαιότητα πρόβλεψης στις μη μετρούμενες λεκάνες απορροής.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, αναφέρεται ότι δεν υπάρχει παγκόσμιο σύστημα ταξινόμησης λεκανών απορροής σύμφωνα με τους μηχανισμούς με τους οποίους παράγεται η απορροή, και, επομένως, τίθεται το ερώτημα κατά πόσο μπορεί να δημιουργηθεί μια ομάδα υδρολογικά όμοιων λεκανών απορροής, τουλάχιστον πρώτης τάξης, με χρήση της διαθέσιμης, σήμερα, υδρολογικής πληροφορίας (δεδομένα βροχόπτωσης, θερμοκρασίας αέρα, απορροής, και των γενικότερων διαθέσιμων περιγραφικών παραμέτρων) (Sawicz et al., 2011). Κατά τους Wagener et al. (2007), το πλαίσιο ταξινόμησης των λεκανών απορροής, πρέπει να είναι τόσο περιγραφικό όσο και προγνωστικό, και μπορεί να προκύψει όταν αυτό βασίζεται στην έννοια των λειτουργιών της λεκάνης απορροής, οι οποίες, με τη σειρά τους, βασίζονται στην απεικόνιση δεικτών υδρολογικής συμπεριφοράς γνωστών ως υδρολογικών υπογραφών και παραμέτρων του κλίματος και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών.

Επίσης, ο όρος *υδρολογική ομοιότητα* αναφέρεται στην ευρύτερη ομοιότητα που παρουσιάζουν οι λεκάνες απορροής σε σχέση με διάφορες μεταβλητές ή χαρακτηριστικά γνωρίσματα του υδρολογικού κύκλου. Η υδρολογική ομοιότητα, κατά αυτή την έννοια, μπορεί να εντοπιστεί σε ευρύτερες περιοχές, επομένως, και μεταξύ των λεκανών απορροής μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές περιοχοποίησης βασισμένες στην υδρολογική ομοιότητα. Ο όρος περιοχοποίηση (regionalisation) για την υδρολογία και τη διαχείριση υδατικών πόρων αναφέρεται σε μεθόδους και τεχνικές μεταφοράς πληροφορίας από γειτονικές ή μη λεκάνες απορροής στη λεκάνη ενδιαφέροντος. Να σημειωθεί ότι οι λεκάνες απορροής που χρησιμοποιούνται ως δότριες, συνήθως είναι λεκάνες απορροής με μετρημένες υδρολογικές χρονοσειρές δεδομένων, ενώ η λεκάνη απορροής που λαμβάνει την πληροφορία (λεκάνη δέκτης) είναι συνήθως μη μετρούμενη λεκάνη.

Η ανίχνευση της υδρολογικής ομοιότητας με χρήση κατάλληλων κριτηρίων ομοιότητας, δεν είναι εύκολη διαδικασία, καθόσον το εύρος των χαρακτηριστικών που χρησιμοποιούνται δεν ανταποκρίνεται με ακρίβεια στα φυσικά φαινόμενα και η χωροχρονική κλίμακα αλλά και η προσέγγιση κάθε φορά, ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή. Τα χαρακτηριστικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια είναι: γεωμορφολογικά, κλιματολογικά, γεωλογικά και εδαφολογικά, ή χαρακτηριστικά κάλυψης γης. Η δυσκολία στον προσδιορισμό *μετρητικών παραμέτρων ομοιότητας* ή καλύτερα, στον καθορισμό ενός συστήματος κατάταξης των λεκανών απορροής, οφείλεται στην πολυπλοκότητα που χαρακτηρίζει τις φυσικές υδρολογικές διεργασίες σε ένα μεγάλο εύρος από χρονικές και χωρικές κλίμακες. Η ετερογένεια αυτή που εμφανίζεται στο χρόνο και στο χώρο δεν επιτρέπει ούτε την πλήρη κατανόηση των διεργασιών ούτε την περιγραφή των σχέσεων και των συνδέσεων μεταξύ των υδρολογικών καταστάσεων. Η υιοθέτηση μεταβλητών που χρησιμοποιούνται ως δείκτες για να ποσοτικοποιήσουν τις

υδρολογικές διεργασίες είναι μια πρόσφορη θεώρηση. Οι χρησιμοποιούμενες μεταβλητές ονομάζονται *υδρολογικές υπογραφές* και λαμβάνονται ως μέτρο ομοιότητας στη συμπεριφορά της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής σε ένα γεγονός βροχόπτωσης, ενώ ο υπολογισμός τους απαιτεί υδρολογικά δεδομένα.

Ανάλογα με τη χρονική και χωρική κλίμακα μελέτης απαιτούνται διαφορετικές υδρολογικές υπογραφές, ενώ, αντίθετα η εφαρμογή μιας γενικευμένης θεωρίας θα οδηγούσε σε παράλειψη τοπικών ιδιαιτεροτήτων.

Η χρήση υδρολογικών υπογραφών έχει στόχο τη δημιουργία ενός εύκολα αντιληπτού κανόνα κατάταξης των λεκανών απορροής ως προς την απόκρισή τους. Στο πλαίσιο αυτό, για να επιτραπεί η ασφαλής μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας, πρέπει να πραγματοποιηθεί γενίκευση των σχέσεων μεταξύ χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής, του κλίματος και της απόκρισης αυτής, αξιολόγηση των σχέσεων αυτών, καθώς και μετέπειτα έλεγχος.

Για παράδειγμα, οι Sawicz et al. (2011) παρουσίασαν μια μεθοδολογία ταξινόμησης λεκανών απορροής βασιζόμενη στην υδρολογική ομοιότητα, που περιγράφεται από υδρολογικές υπογραφές σε αντίθεση με τη χρήση γεωμορφολογικών και υδρομετεωρολογικών χαρακτηριστικών, που αποτελούν την προτεινόμενη προσέγγιση της παρούσας διατριβής. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας του Sawicz και των συνεργατών του, έγινε σε δείγμα 280 λεκανών απορροής στις ΗΠΑ και είχε ως αποτέλεσμα την ομαδοποίηση των λεκανών σε 9 κλάσεις όμοιων λεκανών απορροής. Η μεθοδολογία ταξινόμησης λεκανών απορροής που χρησιμοποιήθηκε είναι η μέθοδος της ανάλυσης κατά συστάδες (cluster analysis), μέσω της χρήσης του αλγόριθμου fuzzy partitioning Bayesian clustering algorithm. Ο αλγόριθμος συνδυάζει την μέθοδο της Ασαφούς Λογικής με την εφαρμογή ενός μοντέλου πιθανοτήτων, και εκτελεί μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση, ενώ ο αριθμός των κλάσεων προκύπτει κατά τη διάρκεια αυτής. Η χρήση 6 υδρολογικών υπογραφών, γνωστών και όχι καινοτόμων, συνδυαστικά, αποτελεί προσπάθεια ποσοτικοποίησης της λειτουργίας της λεκάνης απορροής και επομένως ποσοτικοποίησης της υδρολογικής ομοιότητας. Οι υπογραφές επιλέχθηκαν από ευρύτερο κατάλογο δεικτών (Yadav et al., 2007) ως μη συσχετισμένες μεταξύ τους και ως κατάλληλες για την εκτίμηση της απόκρισης των λεκανών απορροής. Οι υδρολογικές υπογραφές που χρησιμοποιήθηκαν είναι: ο συντελεστής απορροής (runoff ratio), η κλίση της καμπύλης διάρκειας παροχής (the slope of the Flow Duration Curve), ο δείκτης βασικής ροής (baseflow index), η ελαστικότητα απορροής (streamflow elasticity), η αναλογία των ημερών χιονιού (snow day ratio) και η στατιστική κατανομή πιθανότητας του κλάδου ανόδου των υδρογραφημάτων (rising limb density). Για τον υπολογισμό των υπογραφών χρησιμοποιήθηκαν ευρέως διαθέσιμα δεδομένα απορροής, βροχόπτωσης, και θερμοκρασίας, που οδηγούν σε μια ταξινόμηση πρώτης τάξης. Οι εννιά κλάσεις που προέκυψαν αποτελούν μια σχετικά ξεκάθαρη ομαδοποίηση, στην οποία όμως η επίδραση της φυσικής εγγύτητας μεταξύ των λεκανών απορροής είναι εμφανής στον ορισμό των κλάσεων, λόγω των κλιματικών συνθηκών και των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών που διαφοροποιούνται μόνον ελαφρώς στο χώρο.

Στον αντίποδα της παραπάνω προσέγγισης, είναι η προσπάθεια εντοπισμού του καθεστώτος απορροής μιας λεκάνης απορροής, με χρήση των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών. Οι Parageorgaki and Nalbantis (2016) δημοσίευσαν τη μεθοδολογία που χρησιμοποίησαν για την ταξινόμηση 24 λεκανών απορροής του ελλαδικού χώρου. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία ταξινόμησης σύμφωνα με την οποία τα κατακρημνίσματα χρησιμοποιούνται ως παράμετροι με βάση τις οποίες, σε συνδυασμό με 13 μορφομετρικά χαρακτηριστικά που υπολογίζονται από ψηφιακά μοντέλα εδάφους, εγκαθίσταται ένα σύστημα ταξινόμησης. Τα

κατακρημνίσματα και τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται ως δείκτες ταξινόμησης. Η μεθοδολογία ταξινόμησης περιλαμβάνει δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα, με βάση υδρολογικές υπογραφές, πραγματοποιείται μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση μέσω της μεθόδου ασαφούς λογικής fuzzy c-means για την αναγνώριση των κλάσεων των λεκανών απορροής που χρησιμεύουν ως κλάσεις αναφοράς στο επόμενο βήμα. Έπειτα, στο δεύτερο βήμα, πραγματοποιείται μια επιβλεπόμενη ταξινόμηση μέσω της μεθόδου εγγύτερου γείτονα k-Nearest Neighbour η οποία απεικονίζει τους δείκτες ταξινόμησης στις κλάσεις των λεκανών απορροής. Τέλος, γίνεται αξιολόγηση του δείκτη επιτυχίας της ταξινόμησης μέσω της μεθόδου επαναληπτικής δειγματοληψίας jack-knife re-sampling. Αποτέλεσμα της προσέγγισης ήταν η ταξινόμηση των 24 λεκανών απορροής σε 4 κλάσεις όμοιων λεκανών απορροής και η περιγραφή της υδρολογικής συμπεριφοράς κάθε κλάσης.

Οι λεκάνες απορροής αποτελούν μια ευαίσθητη οντότητα του υδρολογικού συστήματος, παρά το μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας και μοναδικότητας της κάθε οντότητας (Bever, 2000). Δεν παραγνωρίζεται ότι υπάρχει ένα επίπεδο οργάνωσης εντός του συστήματος αυτού και επομένως, σε έναν βαθμό, η πρόβλεψη της υδρολογικής συμπεριφοράς είναι δυνατή (Dooge, 1986). Το επίπεδο οργάνωσης μιας λεκάνης απορροής ή είναι προϊόν μιας φυσικής αυτο-οργάνωσης ή είναι αποτέλεσμα συνεξέλιξης των κλιματικών, εδαφικών, τοπογραφικών χαρακτηριστικών (Sivapalan, 2005). Η μοναδικότητα της συμπεριφοράς των λεκανών απορροής περιορίζει την επιτυχία της ταξινόμησης ή την εφαρμογή της υδρολογικής περιοχοποίησης, αλλά, από την άλλη, η πολύχρονη χρήση στατιστικών μεθόδων στην υδρολογία αποδεικνύει ότι η μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας είναι εφικτή. Τα παραπάνω αποτελούν κίνητρο προς την κατεύθυνση μιας επιτυχημένης ταξινόμησης βασισμένης στην υδρολογική ομοιότητα.

Τέλος, να τονιστεί ότι ο καθορισμός της υδρολογικής ομοιότητας ή της ομοιότητας μεταξύ κάποιας ομάδας λεκανών απορροής είναι ασαφής και δεν μπορεί εύκολα να ποσοτικοποιηθεί με ακρίβεια, να αναπαραχθεί σε άλλες λεκάνες απορροής ή να ενταχθεί σε ένα υδρολογικό μοντέλο, καθώς κάθε εφαρμογή ακολουθεί την εκάστοτε συγκεκριμένη και άκαμπτη μεθοδολογική προσέγγιση. Επίσης, η σύγκριση ως προς το τελικό αποτέλεσμα πάλι είναι δύσκολο να υπάρξει, επειδή τα όρια ομοιότητας και το εύρος των κριτηρίων κατάταξης μιας λεκάνης απορροής σε μία ομάδα, κατά τη διάγνωση της ομοιότητας δεν είναι ευκρινή πάντα, και επομένως η ομοιότητα μεταξύ δύο ή περισσότερων λεκανών απορροής μπορεί να είναι δυσδιάκριτη. Για αυτό το λόγο, είναι δύσκολο να αναπτυχθεί ένας κανόνας με καθολική ισχύ και να μπορεί αυτός να ανταποκριθεί σε κάθε λεκάνη απορροής. Παρόλα αυτά, μία αρκετά ασφαλής μέθοδος, για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τον βαθμό ομοιότητας μεταξύ λεκανών απορροής, είναι η σύγκριση και η ταξινόμησή τους με τη χρήση υδρολογικών υπογραφών ως κριτηρίων ταξινόμησης.

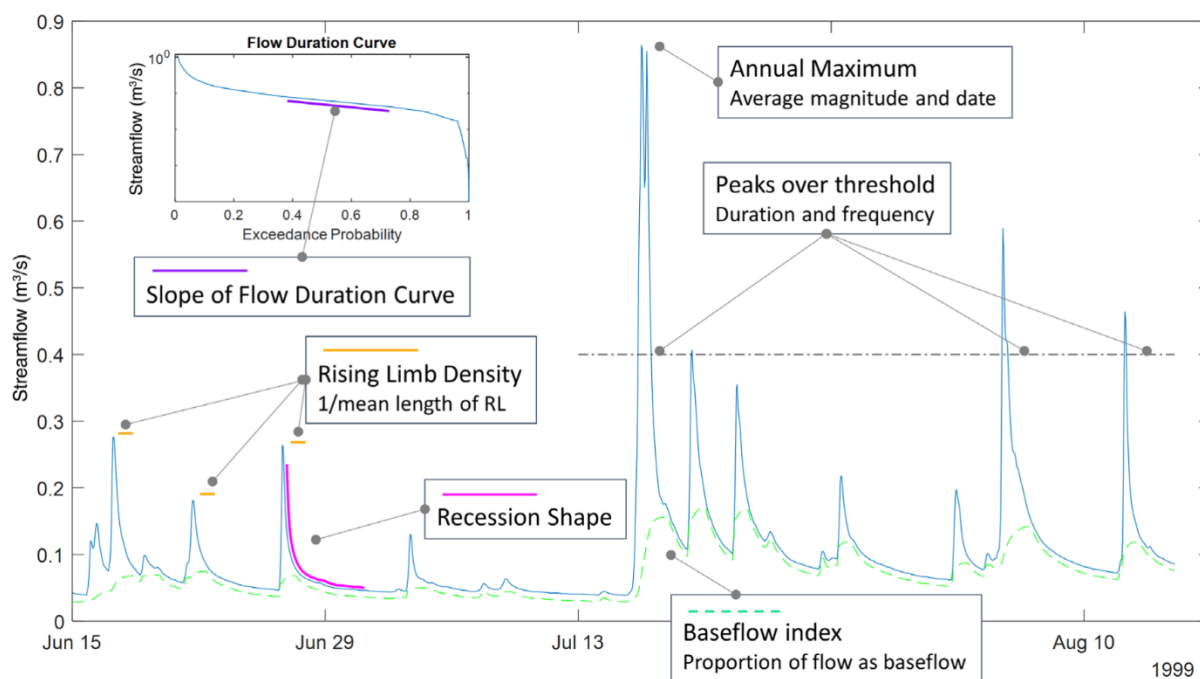
2.5 Υδρολογικές υπογραφές της λεκάνης απορροής

2.5.1 Γενικά

Οι υδρολογικές υπογραφές είναι δείκτες ή ποσοτικοποιημένες μεταβλητές που περιγράφουν τις στατιστικές ή τις δυναμικές ιδιότητες των χρονοσειρών των κλιματικών και υδρολογικών μεγεθών, (απορροή, βροχόπτωσης κ.ά.) Ποικίλοι είναι οι ορισμοί που έχουν προταθεί, χωρίς να εμφανίζουν έντονες εννοιολογικές διαφορές. Οι υδρολογικές υπογραφές μπορούν να υπολογιστούν από δεδομένα που προέρχονται από παρατηρούμενες ή μοντελοποιημένες χρονοσειρές δεδομένων όπως η βροχόπτωση, η θερμοκρασία, η απορροή ή η υγρασία του

εδάφους. Έχουν σχεδιαστεί για να εξάγουν πληροφορίες σχετικές με την υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών απορροής, όπως π.χ. τον εντοπισμό των κυρίαρχων διεργασιών που επιτελούνται σε μια λεκάνη απορροής ή την εκτίμηση των αλλαγών της υδρολογικής συμπεριφοράς. Επίσης, με τη χρήση τους είναι δυνατός ο προσδιορισμός της ισχύος, του χρόνου εμφάνισης, και της χωροχρονικής μεταβλητότητας της απόκρισης στη βροχόπτωση της λεκάνης απορροής.

Συνήθως οι υδρολογικές υπογραφές είναι στατιστικές τιμές μεγεθών, όπως η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση ή το εύρος των ποσοστιαίων τεταρτημορίων (quartiles) των χρονοσειρών ή είναι πιο σύνθετοι δείκτες, όπως δείκτες που περιγράφουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των γραφικών παραστάσεων δύο μεταβλητών ή των καμπυλών των υδρολογικών μεγεθών, είτε ως προς το χρόνο, είτε ως προς άλλα μεγέθη, π.χ. της καμπύλης διάρκειας παροχής, της καμπύλης αποθήκευσης – απορροής (storage-discharge behavior) της λεκάνης απορροής ή είναι απλοί λόγοι, όπως ο συντελεστής απορροής. Στο Σχήμα 2-4, παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα υδρολογικών υπογραφών που αποδίδουν πληροφορία για την υδρολογική συμπεριφορά μιας λεκάνης απορροής, μέσω της μελέτης γραφικών παραστάσεων των χρονοσειρών των δεδομένων.



Σχήμα 2-4: Παραδείγματα υδρολογικών υπογραφών (πηγή: McMillan, 2021).

Υδρολογικές υπογραφές που συνήθως χρησιμοποιούνται και υπολογίζονται από την απορροή είναι ο δείκτης βασικής ροής (Baseflow index) ή η κλίση της καμπύλης διάρκειας παροχής (Flow Duration Curve, FDC). Η τελευταία περιγράφει την κατανομή της απορροής και παρέχει πληροφορίες σχετικές με το καθεστώς του μηχανισμού γένεσης της απορροής (Sawicz et al., 2011· Parageorgaki and Nalbantis, 2016). Αν και υδρολογικοί δείκτες χρησιμοποιούνται από παλιά, ο όρος *υδρολογική υπογραφή* εντάσσεται από τους Gupta et al. (2008), ως ο ελάχιστος τρόπος αναπαράστασης της πληροφορίας που είναι σχετική με τα υδρολογικά δεδομένα.

Η συμβολή και η χρήση των υδρολογικών υπογραφών εμφανίζεται σε πολλές υδρολογικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα, στην εκτίμηση των υδρολογικών διεργασιών μιας λεκάνης απορροής, στη σύγκριση της υδρολογικής συμπεριφοράς μιας λεκάνης απορροής βάσει των παρατηρημένων μετρήσεων, σε σχέση με τη θεωρητική ή την μοντελοποιημένη συμπεριφορά

αυτής, και στην εκτίμηση την υδρολογικής ομοιότητας στο χώρο και το χρόνο. Από τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι η τιμή της υδρολογικής υπογραφής δεν είναι μια μονοσήμαντη αναπαράσταση της υδρολογικής συμπεριφοράς μιας λεκάνης απορροής, και κάτι τέτοιο δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει, μιας και η αβεβαιότητα που εισάγεται στην εκτίμηση των υδρολογικών υπογραφών, σε συνδυασμό με τη μεταβλητότητα των υδρολογικών υπογραφών, όπως και των ίδιων των λεκανών απορροής, μπορούν να οδηγήσουν σε λανθασμένη εκτίμηση της υδρολογικής συμπεριφοράς.

Στη βιβλιογραφία, στις περισσότερες μελέτες, ανάλογα με την προσέγγιση, γίνεται επιλογή διαφορετικών υδρολογικών υπογραφών για να περιγραφούν διαφορετικές πτυχές της απόκρισης της λεκάνης απορροής. Οι λόγοι για τους οποίους επιλέγονται οι υδρολογικές υπογραφές σε κάθε μελέτη επίσης ποικίλουν.

Οι Coxon et al. (2014) επέλεξαν τις παρακάτω υδρολογικές υπογραφές: τη μέση τιμή δεκαετίας (αναπαριστά το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης και την ικανότητα των μοντέλων να προβλέπουν τη μέση συμπεριφορά μιας λεκάνης), την μεταβλητότητα από έτος σε έτος (δείχνει την ικανότητα ενός μοντέλου να αναπαράγει την απόκριση μιας λεκάνης υπό μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες), και την ενδοετήσια μεταβλητότητα, η οποία υποδηλώνει την ικανότητα πρόβλεψης ενδοετήσιων αλλαγών. Αυτές τις υπογραφές είχαν επιλέξει και οι Farmer et al. (2003) και Bai et al. (2009), παλαιότερα, για να μελετήσουν την υδρολογική συμπεριφορά 24 λεκανών απορροής στην Αγγλία.

Οι Westerberg et al. (2016) ισχυρίζονται ότι οι υδρολογικές υπογραφές περιγράφουν ένα ευρύ φάσμα της υδρολογικής πληροφορίας μιας λεκάνης απορροής και πρέπει να επιλέγονται οι κατάλληλες κάθε φορά, ανάλογα με το αν ο στόχος είναι η κατανόηση της συμπεριφοράς της λεκάνης απορροής σε ετήσια, εποχιακή, ή ημερήσια χρονική κλίμακα. Στην περίπτωση που γίνεται σύγκριση των λεκανών απορροής υπό όρους ομοιότητας, η υδρολογική υπογραφή δεν πρέπει να χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα, μιας και η αβεβαιότητα μπορεί να επηρεάσει το αποτέλεσμα.

Σε άλλες εφαρμογές επιλέγεται ένα σύνολο από υδρολογικές υπογραφές, ώστε μεταξύ τους να είναι ανεξάρτητες και μη συσχετισμένες (Yadav et al., 2007) ή επιλέγονται υδρολογικές υπογραφές που σχετίζονται με την υδρολογική λειτουργία (hydrological function) της λεκάνης απορροής, η οποία μπορεί να περιγραφεί (Sawicz et al., 2011) ή μπορεί να καθορίσει μοτίβα (Yilmaz et al., 2008).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι υδρολογικές υπογραφές που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των χρονοσειρών απορροής, μιας και είναι γνωστό ότι στις χρονοσειρές απορροής κρύβονται μοτίβα συμπεριφοράς όπως, για παράδειγμα, η παροχή αιχμής, η παροχή χαμηλής ροής, οι ημερήσιες και οι εποχιακές διαφοροποιήσεις. Η υδρολογική πληροφορία που εμπεριέχεται στα μοτίβα αναδεικνύει το πώς αντιδρά η λεκάνη απορροής στον καιρό, ή κατά πόσο και με ποια συχνότητα επηρεάζεται η απορροή. Οι υδρολογικές υπογραφές που αφορούν την απορροή επηρεάζονται από τα φυσικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, περιγράφοντας τη διαδρομή του νερού από τη στιγμή της βροχόπτωσης μέχρι την εμφάνιση της απορροής.

Επίσης, όλα αυτά τα χρόνια που χρησιμοποιούνται υδρολογικές υπογραφές, έχει γίνει προσπάθεια καταγραφής τους και ταξινόμησής τους σε ομάδες, με χαρακτηριστική τη δουλειά των Olden και Poff (2003), στην οποία καταγράφονται 171 υπογραφές να μελετώνται σε 420 λεκάνες απορροής στην Αμερική, με σκοπό αρχικά να περιοριστεί ο αριθμός των υπογραφών που χρησιμοποιούνται και αφετέρου να προτείνουν τη χρήση υδρολογικών υπογραφών,

λιγότερο εξαρτημένων μεταξύ τους, που όμως διατηρούν την ικανότητα να αναγνωρίζουν κρίσιμα χαρακτηριστικά του κυρίαρχου καθεστώτος γένεσης της απορροής.

Σημειώνεται, ότι η πιο συνηθισμένη και γνωστότερη ομαδοποίηση που έχει γίνει, είναι σε πέντε υδρολογικά σημαντικές κατηγορίες ως προς την περιγραφή των χαρακτηριστικών του υδρολογικού καθεστώτος της λεκάνης απορροής. Οι πέντε κατηγορίες σχετίζονται με: το μέγεθος (magnitude), τον χρόνο (timing), τη συχνότητα (frequency), τη διάρκεια (duration) και τον ρυθμό μεταβολής (rate of change) (Richter et al., 1997).

Στη συνέχεια, ακολουθεί η ανάλυση μερικών υδρολογικών υπογράφων που χρησιμοποιήθηκαν σε εφαρμογές κατά τη διάρκεια της διατριβής.

2.5.2 Ο συντελεστής απορροής

Ο *συντελεστής απορροής (Runoff Ratio)* ορίζεται ως ο όγκος της άμεσης απορροής προς τον όγκο της βροχόπτωσης, συμβολίζεται ως RR, και είναι δείκτης της παραγωγικότητας μιας λεκάνης σε σχέση με την απορροή. Πρόκειται για ένα πολύ γνωστό λόγο, που έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε κλασικές υδρολογικές μεθόδους για την εκτίμηση της απορροής, όπως η ορθολογική μέθοδος. Ο συντελεστής απορροής συνεκτιμά τα υδρολογικά ελλείμματα, και εξαρτάται από τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, τις τρέχουσες συνθήκες υγρασίας, τη χωροχρονική κατανομή της βροχόπτωσης, κ.ά. Εκφράζει το ποσοστό του νερού που θα απομακρυνθεί ως απορροή από το στόμιο εξόδου της λεκάνης απορροής, σε σχέση με το νερό που έφτασε στη λεκάνη ως βροχόπτωση.

Εδώ, ορίζεται ως ο λόγος της μέσης ετήσιας απορροής \bar{Q} (ως ύψος νερού), προς τη μέση ετήσια βροχόπτωση (επίσης ως ύψος νερού) \bar{P} . Αναλυτικά, δίνεται από τη σχέση:

$$RR = \frac{\bar{Q}}{\bar{P}} \quad (2.1)$$

Μια υψηλή τιμή του συντελεστή απορροής σημαίνει ότι ένα μεγάλο μέρος της βροχόπτωσης απελευθερώνεται ως απορροή, ενώ μια χαμηλότερη τιμή υποδηλώνει μια λεκάνη απορροής στην οποία κάποιες ποσότητες νερού μετατρέπονται σε κάποια άλλη συνιστώσα του υδρολογικού κύκλου (π.χ. μέσω της διήθησης, της εξατμοδιαπνοής κ.ά.).

Με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς, και, συνεπώς, την αύξηση της έντασης της βροχόπτωσης, μειώνονται τα ελλείμματα και άρα αυξάνει ο συντελεστής απορροής. Ο εν λόγω συντελεστής εκτιμάται (σύμφωνα με την ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ, 2013) ως το άθροισμα τεσσάρων επιμέρους συντελεστών που εξαρτώνται, αντίστοιχα, από: (1) το ανάγλυφο της επιφάνειας της λεκάνης, c_1 , (2) τη διηθητικότητα του εδάφους, c_2 , (3) την έκταση και την πυκνότητα της φυτοκάλυψης, c_3 και (4) την κλίση των πρανών και την αποθηκευτική ικανότητα σε χαμηλά σημεία της επιφάνειας της λεκάνης απορροής, c_4 . Οι τυπικές τιμές κατά ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ (2013) ισχύουν για περιόδους επαναφοράς 5-10 έτη. Σύμφωνα με τους κανονισμούς, ο τελικός συντελεστής απορροής προσαυξάνεται κατά 10% για $T = 25$ έτη, κατά 20% για $T = 50$ έτη, και κατά 25% για $T = 100$ έτη, παραμένοντας προφανώς μικρότερος της μονάδας.

2.5.3 Η κλίση της καμπύλης διάρκειας παροχής

Η καμπύλη διάρκειας απορροής (Flow Duration Curve ή, FDC) ορίζεται ως το διάγραμμα των τιμών απορροής του εξεταζόμενου ποταμού συναρτήσει της συχνότητας υπέρβασης, και παράγεται από την πλήρη χρονοσειρά των ημερήσιων παρατηρημένων παροχών. Η κατασκευή της καμπύλης επιβάλλει την κατάταξη των ημερήσιων παροχών σε φθίνουσα σειρά και τον υπολογισμό της εμπειρικής συχνότητας υπέρβασης για κάθε τιμή. Η καμπύλη ουσιαστικά

αποτελεί την αναδιοργάνωση του υδρογραφήματος από μια χρονοσειρά με βάση το χρόνο, σε μια σειρά δεδομένων κατά μέγεθος, ώστε να μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί το ποσοστό του χρόνου που η απορροή έχει υπερβεί κάποια συγκεκριμένη τιμή. Το διάγραμμα της καμπύλης διάρκειας απορροής κατασκευάζεται με οριζόντιο άξονα την πιθανότητα υπέρβασης (ή ποσοστό χρόνου υπέρβασης) και κατακόρυφο τις τιμές της απορροής.

Αγνοώντας την εποχικότητα, η μορφή της καμπύλης είναι εξαιρετικά πλούσια σε πληροφορίες σχετικά με το καθεστώς απορροής μιας λεκάνης απορροής. Μια απότομη κλίση (υψηλή) της καμπύλης αποκαλύπτει ένα εξαιρετικά μεταβλητό καθεστώς απορροής, ενώ μια ηπιότερη κλίση αποτελεί ένδειξη ήπιας διακύμανσης της ροής στο χρόνο. Δεδομένου ότι στο άνω και κάτω τμήμα της καμπύλης συναντώνται πάντα υψηλές κλίσεις λόγω των σπάνιων γεγονότων που αντιστοιχούν σε ακραίες τιμές απορροής, είναι φυσικό να χρησιμοποιείται η κλίση του κεντρικού τμήματος της καμπύλης όταν επιδιώκεται ο χαρακτηρισμός της μεταβλητότητας της ροής στο εύρος των συχνά εμφανιζόμενων ροών. Στο πλαίσιο της διατριβής, χρησιμοποιούμε την κλίση, σε ένα ημιλογαριθμικό διάγραμμα, μεταξύ του ποσοστού του 33% της ροής, Q_{33} , και του 66% του ορίου της ροής, Q_{66} , όπως προτάθηκε από τους Yadav et al. (2007) και χρησιμοποιήθηκε επίσης από τους Zhang et al. (2008) και Sawicz et al. (2011). Η κλίση της καμπύλης διάρκειας παροχής, SF, λαμβάνεται ως

$$SF_{FDC} = \frac{\ln Q_{66} - \ln Q_{33}}{0.66 - 0.33} \quad (2.2)$$

2.5.4 Ο δείκτης βασικής ροής

Δεδομένου ότι είναι επιθυμητό να χαρακτηριστεί μια λεκάνη απορροής σε σχέση με τον μηχανισμό παραγωγής απορροής, είναι φυσικό να αναζητηθεί ένας δείκτης ικανός να βοηθήσει στη διάκριση μεταξύ της βασικής ροής και άλλων συνιστωσών ροής που είναι ταχύτερες από τη βασική ροή. Ένας τέτοιος δείκτης θα υποδεικνύει την προτίμηση του νερού που προέρχεται από κατακρήμνιση, είτε να εμφανίζεται στην έξοδο της λεκάνης λίγο μετά την πτώση του στο έδαφος είτε να ακολουθεί πιο περίπλοκες διαδρομές μέσω διήθησης και υπόγειας ροής.

Συνήθως μελετάται η άμεση απορροή και όχι η συνολική απορροή, που είναι το άθροισμα της άμεσης και της βασικής ροής. Ο διαχωρισμός των συνιστωσών της απορροής με βάση το υδρογράφημα συνολικής απορροής οδηγεί στο γνωστό *Δείκτη Βασικής Ροής* (BFI) ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της βασικής ροής προς τη συνολική απορροή, λόγος που λαμβάνεται για μεγάλο χρονικό διάστημα (Vogel and Kroll, 1992).

Για την εκτίμηση της βασικής ροής έχουν προταθεί πολλαπλές μέθοδοι. Σε αυτή τη διατριβή υιοθετείται η μέθοδος που πρότειναν οι Arnold et al. (1995) η οποία έχει επίσης εφαρμοστεί από τους Sawicz et al. (2011). Η εξίσωση ορίζεται ως εξής:

$$BFI = \frac{\sum(Q_b/Q)}{n} \quad (2.3)$$

όπου Q_b είναι η βασική ροή, Q η συνολική ροή και το άθροισμα των λόγων τους λαμβάνεται σε όλα τα χρονικά βήματα και n το πλήθος των χρονικών βημάτων. Η βασική ροή λαμβάνεται ως η συνολική ροή μείον την άμεση ροή, η οποία εκτιμάται μέσω της μεθόδου Digital Filter Method (Arnold et al., 1995).

Η παράμετρος της βασικής ροής είναι κρίσιμη, και η αναγκαιότητα πρόγνωσης των χαμηλών ροών κατά την ξηρή περίοδο καθίσταται ιδιαίτερης σημασίας σε περιοχές με ξηρό κλίμα, ειδικά όταν η ζήτηση σε νερό είναι αυξημένη. Στις Μεσογειακές λεκάνες, που χαρακτηρίζονται από ελάχιστες βροχοπτώσεις κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, η βασική ροή είναι σημαντική

παράμετρος, πόσο μάλλον όταν η ξηρή περίοδος διαρκεί, κατά βάση, από τον Απρίλιο έως τον Οκτώβριο, ενώ παράλληλα αυτούς τους μήνες οι ανάγκες για αστική και αρδευτική χρήση είναι οι μέγιστες. Από τους Risva et al. (2017) έχει γίνει εκτεταμένη ανάλυση για 25 λεκάνες της Μεσογείου, ενώ οι Bangash et al. (2012) ερεύνησαν τη βασική ροή σε λεκάνες απορροής της Ισπανίας με περιορισμένα δεδομένα απορροής, λεκάνες με τοπογραφικές, κλιματικές και γεωλογικές συνθήκες που θεωρούνται τυπικές για την περιοχή της Μεσογείου. Παρατηρείται, επίσης, πως τα υδροκλιματικά χαρακτηριστικά των προαναφερθεισών λεκανών απορροής δεν περιορίζονται γεωγραφικά μόνο στην Μεσόγειο, καθώς στην πραγματικότητα, τα χαρακτηριστικά του μεσογειακού κλίματος εμφανίζονται και σε άλλες περιοχές στον κόσμο, όπως στην περιοχή της Καλιφόρνια, στην Δυτική και Νότια Αυστραλία, στην Νότια Αφρική και σε τμήμα της παράκτιας Χιλής (Merheb et al., 2016).

2.5.5 Η αναλογία των ημερών χιονιού

Στην Ελλάδα, το χιόνι στα ορεινά, εμφανίζεται κατά κανόνα, στη διάρκεια της περιόδου Νοεμβρίου-Απριλίου, ενώ στα μεγαλύτερα υψόμετρα χιονόπτωση σημειώνεται από τον Οκτώβριο μέχρι και το Μάιο. Οι μεγαλύτεροι αριθμοί ημερών χιονιού σημειώνονται σε μετεωρολογικούς σταθμούς με υψόμετρο άνω των 1000 m. Οι μεγαλύτερες τιμές του μέσου ετήσιου αριθμού ημερών χιονιού σημειώνονται στη δυτική Μακεδονία, όπως στη Φλώρινα (25 ημέρες), στην Κοζάνη (17 ημέρες) και στην Πτολεμαΐδα (17 ημέρες). Όσο απομακρυνόμαστε από τις ακτές, τόσο ο αριθμός των ημερών χιονιού αυξάνει. Επίσης, οι κυρίως χιονοφόροι άνεμοι είναι οι ΒΑ διεύθυνσης, με αποτέλεσμα να σημειώνονται λιγότερες ημέρες χιονιού στους σταθμούς του Ιονίου σε σχέση με τους αντίστοιχους του Αιγαίου.

Η απόκριση μιας λεκάνης απορροής στις κατακρημνίσεις εξαρτάται από τη μορφή της κατακρημνίσης που δέχεται. Η απόκριση είναι πιο αργή στην περίπτωση των χιονοπτώσεων, οι οποίες αποθηκεύουν το νερό με τη μορφή του χιονιού, ενώ είναι γρηγορότερη στην περίπτωση των βροχοπτώσεων, που η ποσότητα του νερού εμφανίζεται ως απορροή με κάποια καθυστέρηση, προφανώς μικρότερη από αυτήν της χιονόπτωσης (Woods, 2003). Για την αριθμητική έκφραση της αναλογίας ημερών χιονιού και, κατ' επέκταση, την ποσοτικοποίηση του φαινομένου της χιονόπτωσης, χρησιμοποιείται η αναλογία ημερών χιονιού, SDR, που ορίζεται ως ο μέσος αριθμός ημερών με χιόνι, N_s , διαιρούμενος με τον μέσο αριθμό ημερών βροχόπτωσης, N_p , δηλαδή:

$$SDR = \frac{N_s}{N_p} \quad (2.4)$$

Ο αριθμός των ημερών χιονιού είναι δύσκολο να εκτιμηθεί, καθώς οι βροχοπτώσεις μπορεί να εμφανιστούν με τη μορφή χιονόπτωσης σε ένα τμήμα μιας λεκάνης και ως βροχοπτώσεις στο υπόλοιπο τμήμα. Στο πλαίσιο της διατριβής, θεωρήθηκε ως ημέρα με χιόνι, κάθε ημέρα κατά την οποία η ημερήσια βροχόπτωση σε ένα σταθμό κοντά στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης εμφανίζεται ως χιόνι.

Προφανώς, μια μικρή τιμή της αναλογίας SDR συνεπάγεται την απουσία αποθήκευσης νερού υπό μορφή στρώματος χιονιού (snowpack) και την επακόλουθη διαθεσιμότητά του για τη δημιουργία άλλων διεργασιών όπως η δημιουργία απορροής, ή η διήθηση ή η εξατμησοδιαπνοή. Αντίθετα, μια υψηλή τιμή SDR συνεπάγεται "παγίδευση" νερού σε στρώμα χιονιού.

2.6 Μοντέλα βροχόπτωσης - απορροής

Τα μοντέλα βροχόπτωσης - απορροής αποτελούν ένα σύστημα εμπειρικών και μαθηματικών εξισώσεων, που μετασχηματίζουν τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα που δέχεται μία περιοχή, σε απορροή. Η υδρολογική προσομοίωση εξαρτάται από πληθώρα παραμέτρων, αφορά συγκεκριμένη χρονική περίοδο, και μέσω της προσομοίωσης των διεργασιών που συντελούνται εντός της περιοχής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως εργαλείο μεταφοράς υδρολογικής πληροφορίας στο χώρο, δηλαδή μεταξύ περιοχών που έχουν όμοια υδρολογική συμπεριφορά.

Όπως αναφέρεται από το Ναλμπάντη (2007): «Ως μοντέλο βροχόπτωσης - απορροής ορίζεται ένα σύνολο μαθηματικών σχέσεων, είτε αλγεβρικών είτε διαφορικών εξισώσεων ή λογικών σχέσεων, που συσχετίζουν την βροχόπτωση με την απορροή. Η αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών μιας λεκάνης απορροής για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο ονομάζεται υδρολογική προσομοίωση. Η προσομοίωση ορίζεται ως η τεχνική μίμησης της συμπεριφοράς ενός πραγματικού συστήματος σε ό,τι αφορά την χρονική του εξέλιξη.»

Η πληθώρα των μαθηματικών υδρολογικών μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί, έχει στόχο την αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών μιας λεκάνης απορροής. Χρησιμοποιούν κυρίως δεδομένα από επεξεργασμένες μετρήσεις πεδίου και ένα σύνολο παραμέτρων μέσω των οποίων περιγράφουν υποθέσεις σχετικά με τη μαθηματική αναπαράσταση των υδρολογικών φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα εντός μιας λεκάνης απορροής. Σκοπός τους είναι αρχικά η αναπαράσταση του ισοζυγίου μιας λεκάνης απορροής και, δευτερευόντως, να συμβάλλουν στην κατανόηση των διεργασιών που σχετίζονται με το κύκλο του νερού και του τρόπου με τον οποίο επηρεάζονται τα μοντελοποιημένα αποτελέσματα από τις αλλαγές των μετεωρολογικών δεδομένων εισόδου.

Τα βασικά δεδομένα εισόδου ενός υδρολογικού μοντέλου συνήθως είναι οι διάφορες μετεωρολογικές μεταβλητές όπως τα κατακρημνίσματα, η θερμοκρασία αέρα, η ταχύτητα ανέμου, η σχετική υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία και δεδομένα που αφορούν την τοπογραφία, τα εδάφη, τη βλάστηση και τις χρήσεις γης. Οι εξισώσεις του συστήματος απεικονίζουν τις φυσικές διεργασίες του μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε απορροή, εντός της λεκάνης απορροής, διεργασίες όπως η επιφανειακή απορροή, η διήθηση, η κατακράτηση, η εξατμισοδιαπνοή, η ενδιάμεση απορροή και η αποθήκευση στο έδαφος (Τσακίρης, 2013). Στην παρούσα διατριβή, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην προσομοίωση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών, με σκοπό την εκτίμηση του κυρίαρχου μηχανισμού ή των μηχανισμών γένεσης της απορροής.

Όπως γίνεται κατανοητό από προηγούμενες αναφορές, τα μοντέλα βροχόπτωσης - απορροής άργησαν να κάνουν την εμφάνισή τους, και μέχρι τότε εφαρμόζονταν εμπειρικές σχέσεις που είχαν προσαρμοστεί σε συγκεκριμένες περιοχές. Η αβεβαιότητα της συμπεριφοράς των μοντέλων μέχρι και σήμερα αποτελεί γνωστό πρόβλημα, που θα μπορούσε να λυθεί εν μέρει με μεγάλες χρονοσειρές μετρημένων παροχών στις διατομές των ποταμών.

Το θέμα της χωρικής και χρονικής κλίμακας στην οποία εξελίσσεται κάθε φυσική υδρολογική διαδικασία, οδήγησε την ανάπτυξη πολλών και διαφορετικών μοντέλων για την προσομοίωση επιφανειακών ή υπόγειων διεργασιών. Ως προς τη χρονική κλίμακα των μοντέλων, αυτά εκτελούν υπολογισμούς με χρονικό βήμα που συνήθως και ανάλογα με το είδος της εφαρμογής, μπορεί να είναι από δεκάλεπτο έως ετήσιο, ή βήμα κατάλληλο για κλιματικές εφαρμογές. Ως προς τη χωρική διακριτοποίηση της περιοχής μελέτης, στα αδιαμέριστα μοντέλα (lumped models), η λεκάνη απορροής θεωρείται μια ενιαία ενότητα με κοινές φορτίσεις και κοινές

παραμέτρους για όλη τη λεκάνη απορροής και άρα με ενιαία μορφομετρικά χαρακτηριστικά και υδρολογικές μεταβλητές, ενώ στα πλήρως κατανεμημένα μοντέλα (distributed models), η λεκάνη απορροής κατακερματίζεται σε πολύ μικρές ενότητες (π.χ. σε ζώνες ή σε κύτταρα με χωρικά κατανεμημένες τις διαφορετικές τιμές των υδρολογικών μεταβλητών εισόδου).

Οι δύο ενδιάμεσες περιπτώσεις μοντέλων, των δύο παραπάνω ακραίων τύπων είναι η περίπτωση των ημιαδιαμέριστων μοντέλων (semi-lumped), στα οποία αποθηκεύονται ανά χωρική ενότητα διαφορετικές φορτίσεις αλλά κοινές παράμετροι, και των ημικατανεμημένων μοντέλων (semi-distributed), στα οποία αποθηκεύονται διαφορετικές φορτίσεις και διαφορετικές παράμετροι ανά χωρική ενότητα.

Τα υδρολογικά μοντέλα, ανάλογα με τη μαθηματική δομή τους, διακρίνονται στα μοντέλα μαύρου κουτιού (black box models), στα εννοιολογικά μοντέλα (conceptual), τα οποία αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες θεωρώντας μια μαθηματική δομή που βασίζεται σε μαθηματικές σχέσεις ορισμένες με εμπειρικό τρόπο και στα μοντέλα φυσικής βάσης (physics-based) που αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες βασιζόμενα στους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού.

Τα εννοιολογικά μοντέλα, λόγω της απλότητάς τους, επιτρέπουν την αναπαράσταση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών που χαρακτηρίζονται από έντονη χωρική ανομοιογένεια, μέσω ενός μικρού σχετικά πλήθους παραμέτρων. Από την άλλη, τα μοντέλα φυσικής βάσης, λόγω του ότι η δομή τους ακολουθεί μια λεπτομερέστερη χωρική διακριτοποίηση της λεκάνης, είναι απαραίτητη η γνώση των χαρακτηριστικών της λεκάνης (δεδομένα τοπογραφικά, εδαφολογικά, γεωλογικά, κλπ.) σε λεπτομερή χωρική κλίμακα, αντίστοιχη της χωρικής διακριτοποίησης του μοντέλου.

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

Τα τελευταία χρόνια, η αλματώδης εξέλιξη των υπολογιστικών τεχνικών, με την ανάπτυξη ισχυρών και αξιόπιστων αλγορίθμων βελτιστοποίησης, επιτρέπει την αυτόματη βαθμονόμηση των υδρολογικών μοντέλων (Wang, 1991· Duan et al., 1992· Gan and Biftu, 1996· Pan and Wu, 1998· Madsen et al., 2002). Στην περίπτωση αυτή, απαιτείται: (α) ο καθορισμός ενός μέτρου καλής προσαρμογής των προσομοιωμένων σε σχέση με τις παρατηρημένες χρονοσειρές απόκρισης της λεκάνης (κατά κανόνα της απορροής στην έξοδο αυτής), το οποίο συνιστά την συνάρτηση αντικειμενικού σκοπού του μοντέλου βελτιστοποίησης, και (β) ο προσδιορισμός του επιθυμητού πεδίου τιμών των παραμέτρων, ήτοι του χώρου των εφικτών λύσεων (Κουτσογιάννης, 2004). Θα πρέπει να τονιστεί ότι η εκτίμηση των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου συνιστά ένα από τα πλέον δύσκολα προβλήματα που απαντά ένας υδρολόγος στην πράξη. Η επιτυχία της βαθμονόμησης, άρα και την προγνωστικής ικανότητας ενός μοντέλου, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως: την μαθηματική δομή του μοντέλου και το πλήθος των παραμέτρων του (Perrin et al., 2001)· την ποιότητα και επάρκεια των δεδομένων που χρησιμοποιούνται, είτε πρόκειται για δεδομένα εισόδου είτε για χρονοσειρές απόκρισης που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία αξιολόγησης των εναλλακτικών λύσεων (Paturel et al., 1995· Yapo et al., 1996· Andréassian et al., 2001)· την διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης, ήτοι της συνάρτησης αντικειμενικού σκοπού και των περιορισμών (Kuczera and Mroczkowski, 1998)· την αξιοπιστία του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, δηλαδή την ικανότητα αυτού να χειρίζεται έντονα μη γραμμικές συναρτήσεις

αντικειμενικού σκοπού με πολλαπλά ακρότατα και να εντοπίζει την ολικά βέλτιστη λύση (Duan et al., 1992). Η κύρια δυσκολία στη βαθμονόμηση ενός μοντέλου έγκειται στην ύπαρξη πληθώρας συνδυασμών τιμών των παραμέτρων, οι οποίες παράγουν ισοδύναμα καλές αποκρίσεις της λεκάνης (Κουτσογιάννης, 2004). Το γεγονός αυτό συνεπάγεται μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την προγνωστική ικανότητα των μοντέλων, που γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνει το πλήθος των παραμέτρων, άρα και η πολυπλοκότητα του μοντέλου. Παρόλο που το εν λόγω πρόβλημα απασχολεί την επιστημονική κοινότητα εδώ και τρεις δεκαετίες (Johnston and Pilgrim, 1976· Sorooshian and Gupta, 1983· Beven and Binley, 1992· Gupta et al., 1998· Boyle et al., 2000· Wagener et al., 2001), δεν έχει βρεθεί ένα κοινά αποδεκτό κριτήριο αξιολόγησης των εν λόγω συνδυασμών παραμέτρων, ώστε να επιλέγεται ο αντικειμενικά βέλτιστος. Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα έχει στραφεί προς την διαμόρφωση διανυσματικών συναρτήσεων αντικειμενικού σκοπού με χρήση πολλαπλών μέτρων καλής προσαρμογής, αναφερόμενων είτε στα διαφορετικά χαρακτηριστικά μιας μεμονωμένης απόκρισης είτε σε διαφορετικές αποκρίσεις, και ακολούθως την εφαρμογή πολυκριτηριακών τεχνικών βελτιστοποίησης (Yapo et al., 1998· Kuczera and Mroczkowski, 1998· Madsen, 2000· Vrugt et al., 2002). Επίσης, έχει προταθεί να αναζητείται η λεγόμενη πλέον συμβιβαστική (best-compromise) λύση του προβλήματος, ήτοι ένας μοναδικός συνδυασμός παραμέτρων που θεωρείται αποδεκτός ως τελική λύση του προβλήματος, με βάση την κρίση του μελετητή (Cohon, 1978).

Η χρήση των υδρολογικών μοντέλων στις μη μετρούμενες λεκάνες απορροής, γίνεται με επιπρόσθετη δυσκολία, μιας και δεν υπάρχουν ιστορικές καταγεγραμμένες χρονοσειρές δεδομένων, γεγονός που δηλώνει ότι δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση και, επομένως, η χρήση μοντέλων σε αυτή την περίπτωση είναι αδύνατη. Συνεπώς, το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει στραφεί στην ανάπτυξη άλλων μεθόδων ή στην υποκατάσταση των μετρήσεων παροχής με άλλου είδους μεταβλητές. Στόχος της δεκαετίας PUB, ήταν η αναζήτηση λύσεων και η χρήση δορυφορικών δεδομένων για την εκτίμηση των υδρολογικών μεγεθών μιας λεκάνης απορροής, άμεσα ή έμμεσα, και η εξέταση σχέσεων ομοιότητας μεταξύ λεκανών απορροής, η ταξινόμησή τους, και η κατάλληλη μεταφορά παραμέτρων από λεκάνες απορροής με μετρήσεις απορροής σε άλλες μη μετρούμενες λεκάνες απορροής.

3 Χαρακτηριστικά ομοιότητας με αξιοποίηση πληροφορίας του γήινου αναγλύφου

3.1 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά

Στόχος του τρίτου Κεφαλαίου είναι η διερεύνηση της συμβολής της πληροφορίας του γήινου αναγλύφου στον καθορισμό των μηχανισμών γένεσης της απορροής. Η αποκλειστική χρήση της πληροφορίας του γήινου αναγλύφου εξετάζεται ως μια σύγχρονη προσέγγιση αναπαράστασης της μορφής της γήινης επιφάνειας που βασίζεται κυρίως στην επεξεργασία των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (ΨΜΕ) και μπορεί να οδηγήσει στην πρόβλεψη της υδρολογικής συμπεριφοράς των περιοχών μιας λεκάνης απορροής. Για την πρόβλεψη αυτή εξετάζεται η χρήση αμιγώς τοπογραφικής πληροφορίας ως βάσης για τον υπολογισμό και την εξαγωγή των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών μιας λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου αυτής.

Ανάλογα με τις ανάγκες των εφαρμογών, η λεκάνη απορροής μελετάται είτε ως ένα ενιαίο σύνολο είτε ως σύνολο υποπεριοχών υδρολογικού ενδιαφέροντος από τις οποίες συγκροτείται η λεκάνη απορροής. Στη δεύτερη περίπτωση, οι υποπεριοχές αποτελούν τις διαφορετικές κατηγορίες τοπίου (landscape classes), και μια λεκάνη απορροής αποτελείται από διάφορες κατηγορίες τοπίου, δηλαδή περιοχές της γήινης επιφάνειας που ενδιαφέρουν υδρολογικά.

Με τον όρο τοπίο, γενικότερα, νοείται μία περιοχή της οποίας ο χαρακτήρας είναι το αποτέλεσμα της δράσης και αλληλεπίδρασης των φυσικών και/ή ανθρώπινων παραγόντων (Ευρωπαϊκή Σύμβαση, Ν. 3827/2010). Το τοπίο αποτελεί μια απτή και άμεσα αντιληπτή γεωγραφική μονάδα ανάλυσης, στην οποία για το πλαίσιο της παρούσας διατριβής ισχύει ότι (α) ως τοπίο λαμβάνεται υπόψιν ένα σύστημα σχέσεων και αλληλεπιδράσεων του συνόλου των μορφών του γήινου αναγλύφου σε συνδυασμό με τις γεωλογικές και κλιματολογικές ιδιότητες, και (β) σε αυτό εντοπίζονται και διαχωρίζονται διαφορετικοί μηχανισμοί γένεσης της απορροής.

Η επιφανειακή απορροή, μια από τις κυριότερες φυσικές διεργασίες σε μια λεκάνη απορροής, συνδέεται με τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου και είναι άμεσα επηρεαζόμενη από τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης. Η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των μορφομετρικών χαρακτηριστικών είτε της ίδιας της λεκάνης απορροής, είτε του υδρογραφικού δικτύου –που στη συνέχεια αποδίδονται στη λεκάνη απορροής– και της επιφανειακής απορροής, αποτελεί επιμέρους στόχο της διδακτορικής διατριβής. Η αξιοποίηση της πληροφορίας του γήινου αναγλύφου στον καθορισμό των μορφομετρικών χαρακτηριστικών αυτών, επίσης εξετάζεται.

Με τον όρο *γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής*, νοούνται όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά που, είτε υπό τη μορφή δεικτών είτε ως μεγέθη χωρικά κατανομημένα, περιγράφουν το ανάγλυφο και τη μορφολογία του εδάφους της λεκάνης.

Η ανάλυση των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της γήινης επιφάνειας πραγματοποιείται σε πρώτο στάδιο, κυρίως με τον προσδιορισμό των μορφομετρικών τους χαρακτηριστικών. Ο Evans (1972) με τον όρο γενική γεωμορφομετρία (general geomorphometry) αντιλαμβάνεται

ότι η γεωμορφομετρική ανάλυση επιτρέπει τη μέτρηση και την ανάλυση της μορφολογίας της επιφάνειας της γης και παρέχει τη βάση για την ποσοτική σύγκριση των ποιοτικά διαφορετικών τμημάτων της γήινης επιφάνειας.

Με βάση τη διατύπωση του Evans, τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά ποσοτικοποιούνται μέσα από τις τιμές των αντίστοιχων παραμέτρων, και αποτελούν τα περιγραφικά χαρακτηριστικά της μορφής της γήινης επιφάνειας (π.χ. το μέγεθος ή έκταση, το σχήμα, το υψόμετρο, το μήκος, η κλίση, ο προσανατολισμός κ.ά.).

Επιμέρους στόχος του κεφαλαίου είναι η περιγραφή των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών που μπορούν να υπολογιστούν από αμιγώς τοπογραφική πληροφορία και των οποίων η χρήση επιτρέπει να εντοπίζονται γεωμορφολογικές ιδιότητες αλλά και υδρολογικού χαρακτήρα ιδιότητες της γήινης επιφάνειας. Η χρήση των παραπάνω ιδιοτήτων ως κριτηρίων για την κατάταξη των λεκανών απορροής σε ομάδες με παρόμοια υδρολογική απόκριση σε μετεωρολογικά φαινόμενα, μπορεί να είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις πρόγνωσης όπως η μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας στις μη μετρούμενες λεκάνες απορροής.

Τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά αποτελούν δείκτες της φυσικής συμπεριφοράς των λεκανών απορροής και του υδρογραφικού δικτύου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια για τον εντοπισμό του αποτυπώματος της επιφανειακής απορροής στη γήινη επιφάνεια. Κατά την ταξινόμηση, χρησιμοποιείται επιπλέον χωρική πληροφορία, όπως για παράδειγμα, πληροφορίες που αφορούν τον τύπο των εδαφών, δεδομένα για την κατηγορία φυτοκάλυψης και για τις χρήσεις γης της λεκάνης. Παρά το γεγονός ότι στις ταξινομήσεις που πραγματοποιήθηκαν (Κεφάλαιο 9, Μέρος II), χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που αφορούν τις χρήσεις γης και τις κατηγορίες κάλυψης του εδάφους, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που ακολουθείται από το Corine Land Cover (ή CLC; European Union, 2018), στο παρόν κεφάλαιο δεν θα αναλυθούν περαιτέρω τα δεδομένα αυτά.

Τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά, σύμφωνα με τον Μαμάση (2012), μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες: (1) τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά, που έχουν σχέση με την γεωμετρία, τα υψόμετρα, το υδρογραφικό δίκτυο και (2) τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά – φυτοκάλυψη, που σχετίζονται με την υδατοπερατότητα των εδαφών, τις κατηγορίες κάλυψης, και τις κατηγορίες χλωρίδας. Σκοπός του Κεφαλαίου είναι η ανάλυση των χαρακτηριστικών της πρώτης κατηγορίας τα οποία απαιτούν, για τον υπολογισμό τους, τη χρήση τοπογραφικής κυρίως πληροφορίας.

Να σημειωθεί ότι σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία για τις πλημμύρες, το ενδιαφέρον στρέφεται στην ανάδειξη της δυνατότητας να ταξινομηθούν οι λεκάνες απορροής χρησιμοποιώντας, ως κριτήρια, κλιματικές και γεωμορφολογικές μεταβλητές. Η ευρεία διαθεσιμότητα των δεδομένων βροχόπτωσης και των ΨΜΕ στρέφει το ερευνητικό ενδιαφέρον στην χρήση τους.

Στο παρόν Κεφάλαιο, παρουσιάζονται και αναλύονται τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου, είτε υπό μορφή δεικτών είτε χωρικά καταναμημένων μεταβλητών.

Μελετώνται οι δύο μορφές μορφομετρικών χαρακτηριστικών: (α) δείκτες, που η τιμή τους αναφέρεται σε ολόκληρη την λεκάνη απορροής ή σε ολόκληρο το υδρογραφικό δίκτυο και (β) χωρικά καταναμημένες μεταβλητές των οποίων χρησιμοποιούνται συνήθως συγκεκριμένες στατιστικές τιμές, που βοηθούν στην έκφραση της χωρικής κατανομής της μεταβλητής.

Η λεκάνη απορροής μελετάται είτε ως ένα συγκεκριμένο σημείο στο χώρο, όπου εκεί αποδίδονται δείκτες και χωρικά καταναμημένες μεταβλητές, είτε ως ένα σύνολο

εδαφομηφίδων (φατνίων) ή κατηγοριών τοπίου, όπου κάθε χωρική οντότητα περιγράφεται από τον δείκτη ή την τιμή της χωρικά κατανεμημένης μεταβλητής. Κατά την εφαρμογή της κατανεμημένης ταξινόμησης (Κεφάλαιο 9, Μέρος II) η λεκάνη απορροής μελετάται ως ένα σύνολο φατνίων από τα οποία προκύπτουν οι κατηγορίες τοπίου.

Στη συνέχεια του Κεφαλαίου περιγράφονται τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά υδρολογικού χαρακτήρα της λεκάνης απορροής, δηλαδή χωρικά κατανεμημένες μεταβλητές από τις οποίες αντλείται χρήσιμη υδρολογική πληροφορία, όπως ο δείκτης HAND, ο Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας, η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, και η απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο, κατά τη διεύθυνση της μέγιστης κλίσης του εδάφους.

Το Κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την ανάδειξη της συμβολής της τοπογραφίας, γενικότερα, τόσο στη βέλτιστη μοντελοποίηση των υδρολογικών διεργασιών εντός μιας λεκάνης απορροής, όσο και στην ανάδειξη του επικρατέστερου μηχανισμού γένεσης της απορροής, που είναι ο στόχος της διατριβής. Ακολουθεί η σύντομη περιγραφή των παραγόντων που επηρεάζουν την απορροή, όπως κλιματικοί, τοπογραφικοί, εδαφολογικοί – χρήσεων γης και γεωλογικοί και το παρόν κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την αναφορά στην πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, μεταβλητή που χρησιμοποιήθηκε σε επόμενες εφαρμογές (βλ. Κεφάλαιο 8).

Τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου, υπολογίζονται αποκλειστικά από το ΨΜΕ και η ακρίβεια της εκτίμησής τους είναι ανάλογη αυτής του ΨΜΕ, ενώ ο υπολογισμός τους γίνεται κυρίως με τη βοήθεια των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΓΣΠ, GIS) και σε λίγες των περιπτώσεων με χρήση του μαθηματικού πακέτου MatLab.

Στην Υδρολογία, η λεκάνη απορροής αποτελεί τη θεμελιώδη χωρική μονάδα. Η λεκάνη απορροής, ως σύστημα μετασχηματισμού των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σε απορροή, παρουσιάζει ορισμένα ειδικά μορφομετρικά χαρακτηριστικά (φυσιογραφικά γνωρίσματα) που επηρεάζουν σημαντικά, τόσο τη διαδικασία του μετασχηματισμού όσο και το τελικό της αποτέλεσμα, δηλαδή το υδρογράφημα της απορροής (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Από τους ορισμούς που υπάρχουν στη βιβλιογραφία για την λεκάνη απορροής, επιλέγεται παρακάτω εκείνος που στην παρούσα διατριβή, παρουσιάζει τη λεκάνη απορροής με τον τρόπο με τον οποίο μελετήθηκε. Λεκάνη απορροής, ενός ποταμού, ορίζεται η ανάντη συμβάλλουσα έκταση που από τα κατακρημνίσματα που δέχεται τροφοδοτεί με νερό τον ποταμό, σύμφωνα με το τοπογραφικό ανάγλυφο.

Η λεκάνη απορροής αποτελεί ένα μέρος (στοιχείο) του αναγλύφου που ενσωματώνει όλες τις πτυχές της επίγειας φάσης του υδρολογικού κύκλου και, μέσω αυτής, δίνεται η δυνατότητα να μελετηθεί, να αναπαραχθεί μέσω εξισώσεων και να ποσοτικοποιηθεί κάθε συνιστώσα του υδρολογικού κύκλου που σχετίζεται με τη διαδρομή του νερού στο σύστημα αυτό (Wagener et al., 2004).

Το όριο της επιφανειακής λεκάνης απορροής καλείται υδροκρίτης και ορίζεται με βάση το ανάγλυφο του εδάφους και το υδρογραφικό δίκτυο. Σε μια υδρολογική μελέτη, η πρώτη ενέργεια είναι ο εντοπισμός της λεκάνης απορροής μέσω της χάραξης του υδροκρίτη και ο υπολογισμός μερικών παραμέτρων μέσω των οποίων περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της λεκάνης απορροής, όπως, για παράδειγμα, το μέγεθος (ή έκταση), το μέγιστο και το ελάχιστο υψόμετρο της λεκάνης, το μήκος του κύριου υδατορεύματος κ.ά.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η λεκάνη απορροής είναι το σύστημα μετασχηματισμού των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σε απορροή και οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται αυτός ο μετασχηματισμός είναι. πολλοί Το ανάγλυφο του εδάφους, για παράδειγμα, που αποδίδεται μέσω της τοπογραφικής πληροφορίας, περιγράφει τη λεκάνη απορροής, σχετίζεται με το κλίμα, τη γεωλογία, το έδαφος, τις χρήσεις γης και παίζει σημαντικό ρόλο στις υδρολογικές διεργασίες που συμβαίνουν εντός της λεκάνης. Η τοπογραφική πληροφορία μπορεί να ενταχθεί στην προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών, είτε ως καθαρά περιγραφική πληροφορία για το ανάγλυφο του εδάφους, είτε ως μεμονωμένες τιμές των διάφορων μορφομετρικών χαρακτηριστικών που αφορούν τη λεκάνη απορροής και το υδρογραφικό δίκτυο και συνήθως χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση. Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό, ότι, ακόμα και αν δεν χρησιμοποιηθεί η τοπογραφική πληροφορία ως μέσο αναπαράστασης του αναγλύφου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί έμμεσα, «κρυμμένη» υπό τη μορφή παραμέτρων.

Για τον υπολογισμό των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών, ως αρχικά δεδομένα συνήθως χρησιμοποιούνται τοπογραφικοί χάρτες ή ΨΜΕ, που αμφότερα αποτελούν το μέσο για την αναπαράσταση του αναγλύφου του εδάφους.

Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής επηρεάζουν σημαντικά τη διαδικασία του μετασχηματισμού, γεγονός που γίνεται αντιληπτό στο υδρογράφημα της απορροής. Τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και κυρίως η έκτασή της, διαμορφώνουν το σχήμα του υδρογραφήματος και συγκεκριμένα, το μέγεθος και το χρόνο αιχμής (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999). Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης σχετίζονται με τη μορφή και το ανάγλυφο αυτής και σε συνδυασμό με τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά, την βλάστηση, και το υδρογραφικό δίκτυο, αποτελούν χωρικά κατανομημένη πληροφορία, και συμβάλλουν στην κατανόηση των υδρολογικών διεργασιών που εκτελούνται εντός της λεκάνης απορροής.

Τα φυσικά χαρακτηριστικά των διάφορων μορφών του αναγλύφου της γήινης επιφάνειας και, κατ' επέκταση, και της επιφάνειας της λεκάνης απορροής, μέσω της χρήσης της πληροφορίας για το ανάγλυφο του εδάφους, γίνεται προσπάθεια να καταγραφούν και να εξεταστεί η συμβολή τους στον εντοπισμό και την ποσοτικοποίηση των διεργασιών που παρατηρούνται σε μια λεκάνη απορροής. Οι φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα, όπως η απορροή, η διάβρωση του εδάφους, η στερεομεταφορά των υδατορευμάτων, οι γεωλισθήσεις, με την πάροδο του χρόνου τροποποιούν την επιφάνεια του αναγλύφου, επομένως, διαφοροποιήσεις κατά τη διάρκεια των χρόνων είναι προφανές ότι υπάρχουν.

Αντικείμενο λοιπόν της διδακτορικής διατριβής είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων αποκλειστικής χρήσης μορφομετρικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής για την κατάταξή τους σε κατηγορίες υδρολογικά όμοιων λεκανών και, ως εκ τούτου, η χρήση δεδομένων που σχετίζονται με την πληροφορία του γήινου αναγλύφου είναι απαραίτητη. Επίσης, μελετάται η ανάδειξη της συμβολής της τοπογραφίας στη μοντελοποίηση των υδρολογικών διεργασιών.

Τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά μιας λεκάνης απορροής αποτελούν χωρικά κατανομημένη πληροφορία (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999) και, επομένως, μεταβάλλονται από θέση σε θέση εντός της λεκάνης. Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται, αποτελούν μια συμπυκνωμένη περιγραφή τους και βοηθούν στη σύγκριση και στην κατάταξη λεκανών απορροής. Η ανάλυση των μορφομετρικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής εξυπηρετεί την εις βάθος κατανόηση και ποσοτικοποίηση διεργασιών και μεγεθών για μια ολοκληρωμένη διαχείριση

υδατικών πόρων. Η ποσοτική περιγραφή των μορφομετρικών χαρακτηριστικών μιας λεκάνης απορροής απαιτεί την περιγραφή γραμμικών και επιφανειακών χαρακτηριστικών.

Μερικά λοιπόν από τα βασικά μορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, που έχουν ουσιαστική επίδραση στην απορροής της λεκάνης είναι: το μέγεθος και το σχήμα της λεκάνης απορροής, η κατανομή και η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, η κλίση του εδάφους της λεκάνης απορροής, το μήκος και η κλίση του κύριου υδατορεύματος και το ανάγλυφο του εδάφους (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999). Το σχήμα του υδροκρίτη, το μέγεθος ή η έκταση, το ανάγλυφο, οι κλίσεις του εδάφους, καθώς επίσης η γεωγραφική θέση της λεκάνης αποτελούν σημαντική ποιοτική περιγραφή, και χρησιμοποιούνται στη μελέτη της υδρολογικής συμπεριφοράς της. Επίσης, οι παράμετροι του Horton: λόγος διχασμού (Bifurcation Ratio R_B (Horton, 1945), λόγος μηκών Length Ratio R_L (Horton, 1945) και λόγος εμβαδών Area Ratio R_A (Schumm, 1956) είναι αδιάστατες παράμετροι που περιγράφουν τη γεωμορφολογία της λεκάνης.

3.1.1 Το μέγεθος της λεκάνης απορροής

Το μέγεθος της λεκάνης απορροής, και συγκεκριμένα η επιφάνεια που περικλείεται από τον υδροκρίτη, έχει σημασία, καθώς επηρεάζει τη συνολική απορροή στην έξοδο, όσο και το χρόνο συγκέντρωσης της απορροής και, κατά συνέπεια, και το σχήμα του υδρογραφήματος. Η παραπάνω σχέση, μεταξύ του μεγέθους και της υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης, δεν μπορεί να είναι γραμμική, καθώς τα κλιματολογικά, τα γεωλογικά, τα εδαφικά και άλλα χαρακτηριστικά της, κατά κανόνα, διαφέρουν στο χώρο και στο χρόνο. Επιπλέον, είναι γνωστό ότι το μέγεθος της λεκάνης απορροής επηρεάζει και άλλα χαρακτηριστικά αυτής, όπως την κλίση. Η τελευταία αυξάνει όσο μειώνεται το μέγεθος της λεκάνης απορροής και η ειδική παροχή ($m^3/s/km^2$). Η σχέση μεταξύ του μεγέθους της λεκάνης απορροής και της απορροής, δεν είναι πλήρως γνωστή και μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες εκτιμήσεις. Να σημειωθεί πως οι μη μετρούμενες ορεινές λεκάνες απορροής του ελλαδικού χώρου είναι κυρίως μικρού μεγέθους. Το εμβαδόν της λεκάνης απορροής ορίζεται ως η προβολή της επιφάνειας που περικλείεται από τον υδροκρίτη.

3.1.2 Το ανάγλυφο της λεκάνης απορροής

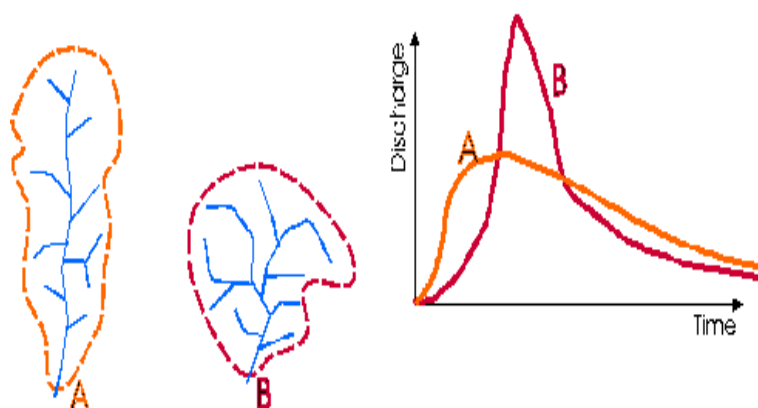
Το ανάγλυφο της λεκάνης απορροής μπορεί να εκφραστεί ποσοτικά με τη εκτίμηση της μέγιστης, της ελάχιστης, και της μέσης τιμής των υψομέτρων της λεκάνης, ή με την υψομετρική καμπύλη, ή με την παρατήρηση των κλίσεων του εδάφους, που δίνουν μια ποιοτική περιγραφή, σημαντική για την μετέπειτα μελέτη της υδρολογικής συμπεριφοράς.

Με την υψομετρική καμπύλη, αποδίδεται το ποσοστό της επιφάνειας που συνεισφέρει κάθε φορά με την απορροή της στο κύριο υδατόρευμα, για κάθε υψόμετρο της λεκάνης. Η μορφή της καμπύλης αποτελεί περιγραφικό χαρακτηριστικό για το ανάγλυφο της λεκάνης και με τη βοήθεια της μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

Το υψόμετρο της λεκάνης απορροής έχει άμεση σχέση με τις κλιματολογικές παραμέτρους εντός της λεκάνης. Η σχέση αυτή περιγράφεται από τη βροχοβαθμίδα και την θερμοβαθμίδα, την μεταβολή δηλαδή της βροχόπτωσης και της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, αντίστοιχα, σε σχέση με το υψόμετρο και μέχρι κάποιο ορισμένο ανώτατο υψόμετρο.

Να σημειωθεί ότι η έκταση της λεκάνης απορροής και το υψόμετρο χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης, από διάφορες εμπειρικές εξισώσεις και σύμφωνα με τους περιορισμούς που είναι απαραίτητοι.

Η επίδραση στο σχήμα του υδρογραφήματος άμεσης απορροής, του μεγέθους της λεκάνης απορροής, δηλαδή της έκτασής της, αφορά τη χρονική διάρκεια του υδρογραφήματος. Έτσι, για ένα συγκεκριμένο γεγονός βροχόπτωσης, μια μεγάλη λεκάνη θα δώσει υδρογράφημα μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας, ενώ η απορροή ανά μονάδα επιφάνειας θα είναι μικρότερη κατά την περίοδο της αιχμής. Όσο για το σχήμα της λεκάνης, αυτό επηρεάζεται από τον ρυθμό με τον οποίο γίνεται η επιφανειακή απορροή, και συγκεκριμένα το ρυθμό με τον οποίο φτάνει το νερό στο κύριο υδατόρευμα. Για παράδειγμα, αν το σχήμα της λεκάνης είναι κυκλικό ή ριπιδοειδές και περιγράφει ρέματα μικρού μήκους που συγκλίνουν όλα στην έξοδο, τότε η καμπύλη ανόδου του υδρογραφήματος που παράγουν είναι πιο απότομη και η αιχμή είναι μεγαλύτερη σε μέγεθος (Σχήμα 3-1, B), από ό,τι όταν ένα μεγάλο μέρος της λεκάνης είναι απομακρυσμένο από την έξοδο, μιας και το σχήμα της λεκάνης είναι επίμηκες. Όταν το σχήμα είναι επίμηκες, η αιχμή έχει μικρότερο μέγεθος, ενώ το υδρογράφημα είναι μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-1, περίπτωση A.



Σχήμα 3-1: Η επίδραση του σχήματος, στο υδρογράφημα απορροής.

Μετά την οριστικοποίηση του υδροκρίτη της λεκάνης απορροής επί των τοπογραφικών χαρτών, είναι δυνατός ο υπολογισμός των μορφομετρικών χαρακτηριστικών, απευθείας ή μέσω δεικτών. Ως τοπογραφικό υπόβαθρο στην παρούσα διατριβή έχει χρησιμοποιηθεί ΨΜΕ, ενώ απαραίτητη προϋπόθεση για τον καθορισμό των μορφομετρικών χαρακτηριστικών, είναι όλα τα κύτταρα του ΨΜΕ να δίνουν απορροή στην έξοδο της λεκάνης ή σε δεδομένη διατομή που έχει οριστεί επί του υδρογραφικού δικτύου (Εδάφιο 7.3.1).

Ως προς την περιγραφή του αναγλύφου της λεκάνης απορροής, ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι παρακάτω παράμετροι-ποσότητες:

- το μέγιστο τοπικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής (R_h ή H_{max}), που είναι η διαφορά μεταξύ του υψηλότερου (στον υδροκρίτη) και χαμηλότερου σημείου (στόμιο) της λεκάνης κατά μήκος της μεγαλύτερης διάστασης της και η οποία είναι παράλληλη προς το κύριο υδρογραφικό ρέμα,
- το μέσο υψόμετρο (H_{mean}) και η μέση κλίση της λεκάνης (S_{mean}).

Λόγος αναγλύφου (relief ratio) (R_h) είναι ο λόγος του τοπικού αναγλύφου της λεκάνης (H) δια του μεγαλύτερου μετρούμενου μήκους της λεκάνης (L_{Bmax}), όπως αυτό μετράται στο χάρτη παράλληλα προς το κύριο υδατόρευμα:

$$R_h = \frac{H}{L_h} \quad (3.1)$$

όπου, το L_h μετράται στον τοπογραφικό χάρτη και είναι η προβολή του L_{Bmax} στο οριζόντιο επίπεδο. Ο λόγος αναγλύφου είναι αδιάστατο μέγεθος και είναι ίσος με την εφαπτόμενη της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ δυο τεμνόμενων επιπέδων στο στόμιο της λεκάνης, του πρώτου επιπέδου που διέρχεται από το υψηλότερο σημείο της λεκάνης και του οριζόντιου επιπέδου. Το R_h αποδίδει το συνολικό βαθμό κλίσης της λεκάνης απορροής και είναι δείκτης της έντασης των διεργασιών διάβρωσης που λαμβάνουν χώρα στις κλιτύες (πλαγιές) της λεκάνης απορροής.

3.1.3 Το σχήμα της λεκάνης απορροής

Θεωρείται το εμβαδόν της λεκάνης απορροής (A), ως η προβολή της επιφάνειας του περικλείεται από τον υδροκρίτη, και η περίμετρος (P_A), που ορίζεται ως το μήκος του υδροκρίτη που περιβάλλει τη λεκάνη απορροής, και μιας και το σχήμα μιας λεκάνης απορροής είναι συνήθως πολύπλοκο, για να το κωδικοποιήσουν, έχουν προταθεί διάφοροι δείκτες που εντάσσονται στα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής.

Μορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής που συνδέονται με τη γεωμετρία της και άρα το σχήμα της, είναι ο δείκτης κυκλικότητας R_C , ο δείκτης επιμήκυνσης E_L , ο δείκτης συμπαγούς E_C , ο δείκτης σχήματος λεκάνης S_B και ο λόγος Schumm E_R . Δείκτες που κυρίως χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το ανάγλυφο είναι η μέγιστη, η ελάχιστη, και η μέση τιμή του υψομέτρου της λεκάνης απορροής και της κλίσης του εδάφους.

Αναλυτικότερα, ο δείκτης κυκλικότητας, circularity ratio (R_C) (Cox, 1927) ορίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας της λεκάνης προς την επιφάνεια κύκλου με περίμετρο ίδια με αυτή της λεκάνης (P_A) και αναφέρεται στη μορφή και στο σχήμα της λεκάνης:

$$R_C = \frac{A}{\frac{P_A^2}{4\pi}} \quad (3.2)$$

όπου, A η έκταση της λεκάνης απορροής σε συγκεκριμένη διατομή, και P_A το μήκος της περιμέτρου ενός κύκλου με επιφάνεια ίδια με την επιφάνεια της λεκάνης. Η κυκλικότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια ποσοτική παράμετρος για να κατηγοριοποιηθούν οι λεκάνες απορροής. Το πεδίο των τιμών του δείκτη είναι από 0 έως 1, κοντά στο μηδέν όταν είναι επιμήκεις λεκάνες απορροής με προσανατολισμένη διεύθυνση ροής, και μονάδα όταν είναι απολύτως κυκλικές λεκάνες.

Λόγος επιμήκυνσης της λεκάνης (elongation ratio) (E_r) ορίζεται ως ο λόγος της διαμέτρου του κύκλου (d) που έχει εμβαδόν ίσο με το εμβαδόν της λεκάνης απορροής, A , προς τη μέγιστη διάσταση της λεκάνης (L_{Bmax}) δηλαδή το μήκος της λεκάνης, παράλληλα με το κύριο υδατόρευμα με μήκος L , και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$E_r = \frac{d}{L_{Bmax}} = \frac{2 \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}}}{L} \quad (3.3)$$

Ο δείκτης συμπαγούς, E_C (compactness) ή δείκτης συγκέντρωσης ή Clavelius, εισάγεται από τον Clavelius (Horton, 1932) για να εκφράσει το σχήμα της λεκάνης, και ορίζεται ως ο λόγος της περιμέτρου της λεκάνης, P_A , με επιφάνεια A , προς την περίμετρο ενός κύκλου με την ίδια επιφάνεια με αυτή της λεκάνης

$$E_C = \frac{P_A}{\sqrt{4\pi A}} = \frac{1}{\sqrt{R_C}} \quad (3.4)$$

όπου A η έκταση της λεκάνης απορροής. Επομένως, όταν το σχήμα της λεκάνης είναι κυκλικό, τότε ο δείκτης συμπαγούς ισούται με τη μονάδα ($E_C=1$). Ο δείκτης σχήματος S_B της λεκάνης δίνεται από τη σχέση:

$$S_B = \frac{L_j}{\sqrt{A}} \quad (3.5)$$

Όπου L_j είναι το μήκος του κύριου υδατορεύματος. Ο λόγος Schumm E_R , που ορίζεται ως ο λόγος της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου προς το μήκος του κύριου υδατορεύματος και δίνεται από τη σχέση:

$$E_R = \frac{D_d}{L_j} \quad (3.6)$$

Ο δείκτης μορφής, F (form factor) χρησιμοποιήθηκε αργότερα ως ο λόγος μήκους προς πλάτος της λεκάνης και ισούται:

$$F = \frac{A}{L^2} \quad (3.7)$$

όπου A η έκταση της λεκάνης απορροής και L το μήκος της λεκάνης. Επίσης, αξίζει να αναφερθούν οι παρακάτω συσχετίσεις:

- της μέσης απόστασης από τον υδροκρίτη μέχρι το υδατόρευμα με την υδρολογική απόκριση και τη φυσιογραφική εικόνα της λεκάνης.
- της κλίσης του κύριου υδατορεύματος S_j και του μήκους του κύριου υδατορεύματος L_j με το μοναδιαίο υδρογράφημα.
- της επιφάνειας και άλλων μεταβλητών (τάξη, κλίση, μήκος) με την ετήσια απορροή μιας λεκάνης.
- του δείκτη σχήματος S_B , της λεκάνης απορροής και του μοναδιαίου υδρογραφήματος (U.S. Army Corps of Engineers)
- της κλίσης του κύριου υδατορεύματος (S_j) και του μεγέθους διάβρωσης ανά μονάδα επιφάνειας (Schumm)

Εκτός από τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν προηγούμενα, μπορούν να εξαχθούν με γρήγορους υπολογισμούς και οι παρακάτω μορφομετρικές παράμετροι του υδρογραφικού δικτύου. Το αποτέλεσμα των υπολογισμών μπορεί να είναι μια τιμή ή μια χωρικά κατανομημένη μεταβλητή, όπως, για παράδειγμα, στην περίπτωση της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου.

3.1.4 Πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου λεκάνης

Πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής (D_d) είναι ο λόγος του συνολικού μήκους των κλάδων όλων των τάξεων σε μια λεκάνη απορροής δια του εμβαδού της λεκάνης απορροής και αποδίδεται στη λεκάνη απορροής:

$$D_d = \frac{\sum L_w}{A_w} \quad (3.8)$$

Ο Horton (1932, 1945) πρότεινε ότι, εκτός από την έκταση, η κλίση του υδατορεύματος και η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου θα πρέπει να συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με τη μέγιστη παροχή της πλημμύρας. Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, που ορίζεται ως το μήκος των υδατορευμάτων ανά μονάδα επιφάνειας, εξαρτάται από πολλές μεταβλητές, συμπεριλαμβανομένων του αναγλύφου, της βροχόπτωσης, της διείδυσης του εδάφους και της αντίστασης του εδάφους στη διάβρωση (Horton, 1945).

Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου έχει συσχετιστεί με το ανάγλυφο και τον λόγο αναγλύφου (Schumm, 1956· Hadley and Schumm, 1961), τον δείκτη αποτελεσματικότητας κατακρήμισης κατά Thornthwaite και την ένταση απορροής (Melton, 1957), την ένταση της κατακρήμισης (Chorley, 1957), και την ικανότητα διείσδυσης (Hadley and Schumm, 1961· Trainer, 1969).

3.1.5 Ο βαθμός τραχύτητας

Ο βαθμός τραχύτητας (ruggedness number), R_n , ορίζεται ως το γινόμενο της υδρογραφικής πυκνότητας (D_d) και του μέγιστου αναγλύφου (H_{Bmax}) της λεκάνης απορροής, εκφραζόμενων και των δύο με τις ίδιες διαστάσεις, και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση

$$R_n = D_d * \frac{H_{Bmax}}{1000} \quad (3.9)$$

Υψηλές τιμές του R_n εμφανίζονται σε περιοχές όπου και οι δύο μορφομετρικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του δείκτη, H_{Bmax} και D_d , είναι μεγάλες δηλαδή όταν οι κλιτύες της λεκάνης είναι απότομες και έχουν ταυτόχρονα μεγάλο μήκος.

Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν προηγούμενα, οι διεργασίες που παρατηρούνται σε μία λεκάνη απορροής επηρεάζουν και τα χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου. Το υδρογραφικό δίκτυο, ως αποτύπωμα της επιφανειακής απορροής μιας λεκάνης, παρά τη δυναμική συμπεριφορά του, μπορεί να περιγράψει με δείκτες. Οι δείκτες περιγράφουν την ποιοτική πληροφορία του υδρογραφικού δικτύου και, συνήθως, αποδίδονται στην λεκάνη απορροής.

Οι λόγοι του Horton, που βασίζονται στην τάξη των υδατορευμάτων, αποτελούσαν βασικό κριτήριο ταξινόμησης του υδρογραφικού δικτύου και της λεκάνης απορροής. Η εξαγωγή των λόγων αυτών, προϋποθέτει, για κάθε λεκάνη απορροής χωριστά, την εύρεση του πλήθους των υδατορευμάτων κάθε τάξης (λόγος διακλαδώσεων), το εμβαδόν των υπολεκανών κάθε τάξης (λόγος εμβαδών) και τα μήκη των υδατορευμάτων για κάθε τάξη (λόγος μηκών). Οι εξισώσεις των λόγων του Horton δίνονται στο εδάφιο 3.1.6.

Από τους βασικότερους δείκτες που χρησιμοποιούνται σε συνήθεις υδρολογικές μελέτες είναι: (1) το μήκος του κύριου υδατορεύματος (L_1) ή το μήκος κύριας μισγάγγειας, που αποτελεί ένα από τα βασικότερα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και συσχετίζεται εμπειρικά με το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης, (2) η κλίση του κύριου υδατορεύματος (S_1), (3) η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, και (4) οι τάξεις των υδατορευμάτων κατά Horton, όπου η διαίρεση σε τάξεις βασίζεται στη διαφορά μεγέθους μεταξύ των κλάδων όσο και στη θέση κάθε κλάδου ως προς τους υπόλοιπους. Οι ανάντη κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου είναι πρώτης τάξης και δεν δέχονται νερό από άλλους, ενώ οι κλάδοι στους οποίους αυτοί συνενώνονται είναι δεύτερης τάξης κ.ο.κ.

Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου συνδέεται άμεσα με τις διεργασίες που παρατηρούνται σε αυτήν, καθώς λεκάνες με πυκνό υδρογραφικό δίκτυο δημιουργούν υψηλές πλημμυρικές αιχμές στο σημείο εξόδου και επίσης μεταφέρουν σημαντικές ποσότητες φερτών υλικών.

3.1.6 Οι λόγοι του Horton του υδρογραφικού δικτύου

Ο λόγος διακλαδώσεων (proportionality coefficient ή bifurcation coefficient) είναι ο λόγος του αριθμού των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου τάξης N_{w-1} προς τον αριθμό των κλάδων τάξης N_w , και δίνεται από τη σχέση:

$$R_I = \frac{N_{w-1}}{N_w} \quad (3.10)$$

Ως προς τη χρησιμότητα του παραπάνω δείκτη και τη σχέση του με την απορροή της λεκάνης, βιβλιογραφικά (Snell and Sivapalan, 1994) αναφέρεται ότι υπάρχει σχέση του λόγου διακλαδώσεων R_B και της υδρολογικής απόκρισης. Ο αριθμός των υδατορευμάτων μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της τάξης τους.

Ο λόγος των μηκών (proportionality coefficient) ως ο λόγος του μήκους των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου τάξης, L_w , προς το μήκος των κλάδων τάξης L_{w-1} , που δίνεται από τη σχέση:

$$R_L = \frac{L_w}{L_{w-1}} \quad (3.11)$$

Να σημειωθεί ότι σε περιοχές με μεγάλη κλίση εδάφους και λεπτότερη υφή αυτού (finer textures), το δίκτυο των υδατορευμάτων χαρακτηρίζεται από σχετικά μικρότερα μήκη (L_w).

Ο λόγος εμβαδών (proportionality coefficient) ως ο λόγος του εμβαδού των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου τάξης A_w προς το εμβαδό των κλάδων τάξης A_{w-1} , που δίνεται από τη σχέση:

$$R_A = \frac{A_w}{A_{w-1}} \quad (3.12)$$

Ο λόγος της κλίσης ως ο λόγος της κλίσης των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου τάξης S_w προς την κλίση των κλάδων τάξης S_{w-1} , που δίνεται από τη σχέση:

$$R_S = \frac{S_w}{S_{w-1}} \quad (3.13)$$

Ποιοτικά μιλώντας, η κλίση των υδατορευμάτων είναι μεγαλύτερη όταν αυτά βρίσκονται κοντά τις κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου και γίνεται ηπιότερη όσο κινούμαστε κατάντη προς την έξοδο της λεκάνης, γεγονός που αποδεικνύεται από την εκθετική μείωση της κλίσης σε σχέση με την τάξη.

3.1.7 Άλλα χρήσιμα μεγέθη του υδρογραφικού δικτύου

Οι Horton (1932, 1945), Strahler (1952, 1957) και Shreve (1966) πρωτοστάτησαν στην ποσοτική περιγραφή του υδρογραφικού δικτύου. Τα βασικά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου είναι η τάξη, το μήκος και η κλίση του κάθε υδατορεύματος, η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, ενώ οι δείκτες που συμβάλλουν στην ποσοτική περιγραφή είναι οι λόγοι του Horton: ο λόγος διακλαδώσεων, ο λόγος μηκών, ο λόγος εμβαδών και άλλοι που θα αναφερθούν παρακάτω. Οι τάξεις του Horton και Strahler χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατηγοριοποίηση του υδρογραφικού δικτύου με βάση τους λόγους που μόλις αναφέρθηκαν και οι οποίοι, για διαδοχικές τάξεις, παραμένουν σταθεροί.

Σημαντικό ρόλο στην κατανόηση των δεικτών παίζει η θεώρηση των Leopold and Miller (1956) οι οποίοι επεκτείνοντας την ιδέα του Horton, σημειώνουν ότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της τάξης και του λογαρίθμου πολλών υδραυλικών μεταβλητών. Η βασική ιδέα αυτής της σχέσης είναι ότι πολλές ποσοτικές μεταβλητές εξαρτώνται από το μέγεθος της λεκάνης απορροής (την έκτασή της).

Όπως αποδείχθηκε στην παρούσα διατριβή, η εκτίμηση του υδρογραφικού δικτύου από δεδομένα που αφορούν το γήινο ανάγλυφο, και κυρίως από ΨΜΕ, είναι πιο κρίσιμη υπολογιστική διαδικασία από τον υπολογισμό των μορφομετρικών χαρακτηριστικών του υδρογραφικού δικτύου. Ο προσδιορισμός του υδρογραφικού δικτύου δεν αποτελεί στοιχείο που συνήθως περιγράφεται από τους υδρολόγους, και πολύ συχνά θεωρείται ως αυτονόητο επιμέρους βήμα μιας γενικότερης υδρολογικής μελέτης. Στο παρόν εδάφιο, γίνεται αναφορά

σε ορισμένα μεγέθη του υδρογραφικού δικτύου που σχετίζονται με την απορροή και τον σχεδιασμό των υδραυλικών έργων.

Κατόπιν των παραπάνω, η επιλογή της ΑΣΕ ως κρίσιμου στοιχείου για τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου είναι αναπόφευκτο βήμα κατά τη διαδικασία εξαγωγής δικτύου από δεδομένα ΨΜΕ. Η επιλογή μίας σταθερής τιμής της ΑΣΕ, ανεξάρτητης τόσο χωρικά (σε σχέση με την περιοχή μελέτης) όσο και χρονικά (σχετικά με την περίοδο μελέτης), συνηθίζεται τα τελευταία χρόνια σε πληθώρα εργασιών. Η επιφανειακή απορροή, μια από τις κυριότερες φυσικές διεργασίες σε μια λεκάνη απορροής, συνδέεται με τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου και είναι άμεσα επηρεαζόμενη από τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά του δικτύου. Κατ' επέκταση, η διερεύνηση της παραπάνω σχέσης αναμένεται να συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση, μελέτη και πρόβλεψη υδρολογικών γεγονότων.

Ως κλασικά μορφομετρικά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου περιγράφονται οι παρακάτω παράμετροι που μπορούν να μετρηθούν με σχετικά εύκολο τρόπο και να περιγράψουν τη μορφή, την ανάπτυξη, και την τάξη του υδρογραφικού δικτύου:

- Η τάξη (order) του κλάδου (w) είναι η ιεράρχηση των κλάδων του δικτύου με κάποια από τις γνωστές μεθόδους ιεράρχησης των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου. Έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι ταξινόμησης από τους επιστήμονες. Οι γνωστότεροι και συνήθως χρησιμοποιούμενοι είναι των Horton (1945), Strahler (1952), ο Scheidegger (1965) και Shreve (1966).
- Το πλήθος των κλάδων ανά τάξη N_w
- Συνολικό μήκος κλάδων εντός λεκάνης τάξεως w , (ΣL_w) είναι το άθροισμα των μηκών όλων των κλάδων εντός λεκάνης τάξεως w .
- Το μέγιστο μήκος της λεκάνης απορροής (L_{Bmax}) η προβολή του μήκους του κυρίου κλάδου της κοίτης προεκτεινόμενο μέχρι τον υδροκρίτη L_h .

Από τις παραπάνω παραμέτρους, εύκολα μπορούν να υπολογιστούν δείκτες που περιγράφουν τη μορφή του δικτύου και σχετίζονται με την απορροή της λεκάνης, όπως αυτοί που περιγράφονται παρακάτω.

Εκτός των παραπάνω, χρήσιμα μεγέθη για τον χαρακτηρισμό του υδρογραφικού δικτύου είναι η μέση απόσταση από τον υδροκρίτη μέχρι το υδατόρευμα που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$X_A = \frac{1}{2D_A} \quad (3.14)$$

όπου D_A η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου.

- η συχνότητα του υδρογραφικού δικτύου που εκφράζεται ως

$$F_S = \frac{\Sigma N}{A} \quad (3.15)$$

όπου ΣN το πλήθος των κλάδων.

- το μήκος και η κλίση του κύριου υδατορεύματος L_j , S_j .
- το μέγιστο μήκος ροής ή το μήκος του κύριου υδατορεύματος ορίζεται ως το μήκος υπολογισμένο κατά τη διεύθυνση ροής, μεταξύ της πιο απομακρυσμένης κεφαλής του υδρογραφικού δικτύου και της εξόδου της λεκάνης.

Εντός προγραμμάτων GIS, δίνεται από τη συνάρτηση flow length, αρκεί να οριστεί αν θα υπολογιστεί το ανάντη ή το κατόντη μήκος από το εξεταζόμενο αρχικό κελί που ορίζεται. Στην Υδρολογία το μήκος ροής ενός ποταμού ορίζεται ως η απόσταση από οποιοδήποτε σημείο

εντός της λεκάνης ως το σημείο εξόδου αυτής. Η απόσταση αυτή μετρείται κατά μήκος διεύθυνσης ροής και όχι σε ευθεία γραμμή. Στο λογισμικό GIS ο ορισμός του μήκους ροής σε ένα αυθαίρετο φατνίο αλλάζει και υπολογίζεται ως άθροισμα των στοιχειωδών αποστάσεων από το κέντρο προς το κέντρο του κάθε φατνίου, κατά μήκος της διεύθυνσης ροής, από το επιλεγμένο φατνίο ως το φατνίο εξόδου της λεκάνης. Όταν βρέχει, μια σταγόνα βροχής σε μια περιοχή της λεκάνης απορροής ταξιδεύει μια απόσταση προτού φτάσει στην έξοδο της λεκάνης και, συνεπώς, το φατνίο με τη μεγαλύτερη απόσταση ροής είναι και το πιο υδρολογικά απομακρυσμένο φατνίο. Αν διαιρεθεί το μήκος ροής με την ταχύτητα ροής προκύπτει ο χρόνος απορροής της λεκάνης. Ο χρόνος απορροής είναι ο χρόνος που απαιτείται για την επιφανειακή ροή μέσω των υδατορευμάτων από το πιο μακρινό υδρολογικό σημείο μέχρι την έξοδό της και είναι μια αντιπροσωπευτική κλίμακα του μεγέθους της λεκάνης.

- Το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου TSL (*km*) είναι το άθροισμα όλων των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου.
- Η κλίση του κύριου ρέματος S_{1085} σε m/km (Main channel slope) είναι η υψομετρική διαφορά μεταξύ του 85% και του 10% του μήκους του κύριου ρέματος διαιρεμένη προς το 75% του μήκους αυτού.

$$S_{1085} = \frac{Z_{85} - Z_{10}}{0.75L} \quad (3.16)$$

3.2 Χωρικά κατανεμημένα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά

3.2.1 Η κλίση του εδάφους

Η κλίση του εδάφους της λεκάνης απορροής είναι μια χωρικά κατανεμημένη μεταβλητή, που αποτελεί γεωμορφολογικό χαρακτηριστικό της λεκάνης, καθώς είναι υπεύθυνη για την επιφανειακή ροή των υδάτων (Burrough and McDonell, 1998). Αυτή ορίζεται ως ο ρυθμός μεταβολής του υψομέτρου του εδάφους, κατά μήκος της οριζόντιας απόστασης και δίνεται από τον παρακάτω εξίσωση για κάθε κελί της λεκάνης απορροής:

$$\text{Slope } (^{\circ}) = \tan^{-1} \left(\sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} \right) * 57.29578 \quad (3.17)$$

Η κλίση σύμφωνα με την Εξίσωση 3.17, υπολογίζεται σε μοίρες, όπου $\frac{dz}{dx}$ και $\frac{dz}{dy}$ είναι ο ρυθμός μεταβολής του υψομέτρου κατά τη διεύθυνση του άξονα *x* και άξονα *y*, αντίστοιχα. Η κλίση του εδάφους αποτελεί χαρακτηριστικό ιδιαίτερης σημασίας, τόσο στην γεωμορφολογία, όσο και στην υδρολογία, μιας και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ροή του νερού και άλλων υλικών στο έδαφος, σύμφωνα με το νόμο της βαρύτητας. Επιπλέον, επηρεάζει την ταχύτητα της επιφανειακής και υπεδάφιας ροής, τον ρυθμό απορροής και, κατά συνέπεια, τον κορεσμό του εδάφους σε νερό και τα επίπεδα διάβρωσης.

Στο παρελθόν, έχει αποδειχθεί εμπειρικά ότι η κλίση του εδάφους σχετίζεται με την επιφάνεια της λεκάνης μέσω της εμπειρικής σχέσης:

$$S = C A^{-\theta} \quad (3.18)$$

Όπου θ μια παράμετρος με εύρος τιμών από 0.37 μέχρι 0.83, με μέση τιμή ίση με 0.6 (Flint, 1974· Wolman, 1955· Leopold and Maddock, 1953· Leopold and Miller, 1956· Leopold, et al., 1964).

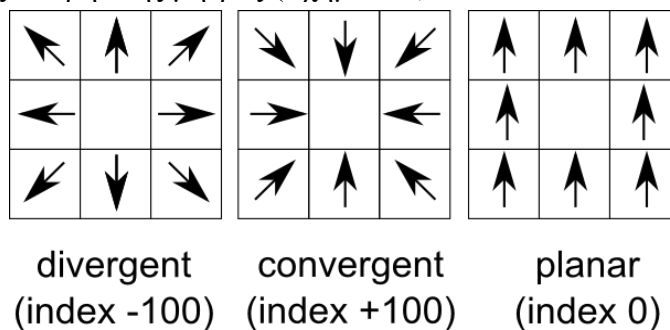
Στο πλαίσιο της διατριβής υπολογίστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα στατιστικά χαρακτηριστικά της κλίσης του εδάφους: η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της κλίσης του

εδάφους της λεκάνης απορροής, η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της τετραγωνικής ρίζας της κλίσης του εδάφους και το διατεταρτημορικό εύρος (διαφορά μεταξύ των ποσοστιαίων σημείων 25% και του 75% της κατανομής των κλίσεων του εδάφους).

Εντός του προγράμματος GIS, ο υπολογισμός της κλίσης κάθε κελιού υπολογίζεται ως ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής του υψομέτρου του κελιού και των οκτώ γειτονικών κελιών του και προσδιορίζεται ως η πιο απότομη κλίση (Burrough and McDonell, 1998).

3.2.2 Ο δείκτης σύγκλισης

Ο δείκτης σύγκλισης (convergence index, CI) είναι μια αδιάστατη παράμετρος του εδάφους που περιγράφει το ανάγλυφο ως ένα σύνολο περιοχών που συγκλίνουν όπως οι μισγάγγειες (πιθανές θέσεις σχηματισμού του υδρογραφικού δικτύου) και ένα σύνολο περιοχών που αποκλίνουν (αποκλίνουσες περιοχές) όπως οι κλιτύες και οι ράχες. Ο δείκτης σύγκλισης αντιπροσωπεύει τη συμφωνία ως προς τον προσανατολισμό (aspect) των κοντινών κελιών (ευρύτερα κελιά, όχι μόνο τα γειτονικά), όταν ο προσανατολισμός αυτός συγκρίνεται με τον προσανατολισμό της θεωρητικής μήτρας (Σχήμα 3-2).

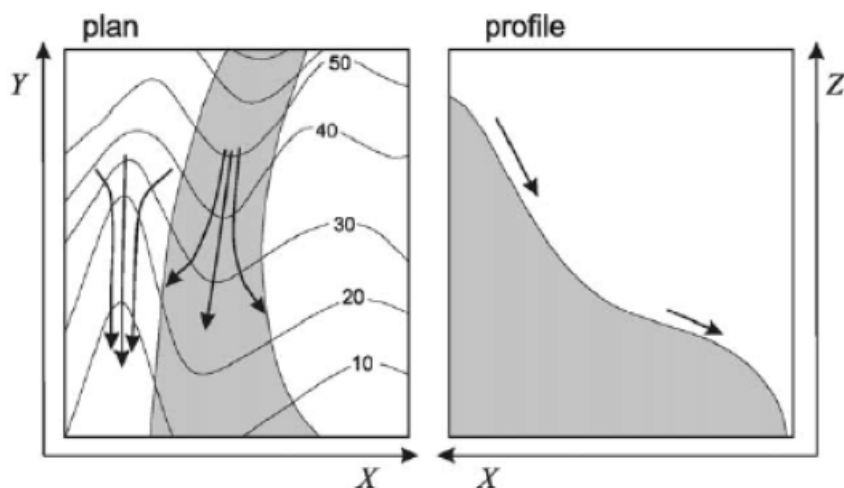


Σχήμα 3-2: Μήτρα υπολογισμού δείκτη σύγκλισης.

Ο δείκτης σύγκλισης είναι η μέση τιμή (ή, ο σταθμισμένος μέσος όρος εάν χρησιμοποιούνται βάρη) της διαφοράς του προσανατολισμού μεταξύ της πραγματικής όψης (περιοχή αναγλύφου) και της θεωρητικής μήτρας (δηλ., ενός πίνακα αποκλίνουσας κατεύθυνσης που αντιπροσωπεύει την ιδανική κορυφή), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-2 μείον 90 μοίρες (degrees). Έτσι, εάν υπάρχει μέγιστη συμφωνία με τον πίνακα που παρουσιάζει το αποκλίνον ανάγλυφο, ο δείκτης σύγκλισης είναι $(0 - 90) * 10/9 = -100$, εάν υπάρχει μέγιστη ιδανική σύγκλιση, ο δείκτης σύγκλισης είναι $(180 - 90) * 10/9 = 100$. Η κλίση και ο προσανατολισμός υπολογίζονται εσωτερικά. Ο δείκτης σύγκλισης είναι πολύ χρήσιμος για την ανάλυση γραμμικών σχηματισμών που αναπαριστούν, για παράδειγμα, κορυφογραμμές ή συστήματα καναλιών (μισγάγγειες) αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως εργαλείο αναγνώρισης κοιλάδων.

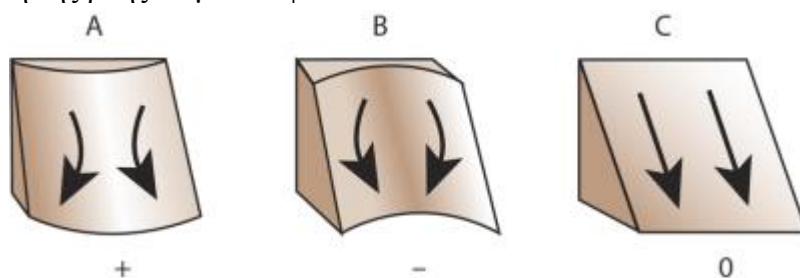
3.2.3 Η καμπυλότητα

Η καμπυλότητα είναι η πρώτη παράγωγος της κλίσης και είναι το μέτρο της κυρτότητας ή της κοιλότητας της επιφάνειας του εδάφους. Στο Σχήμα 3-3 παρουσιάζονται οι δυο βασικές ορθογώνιες συνιστώσες, όπου plan curvature είναι, η καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης και profile curvature, η καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης του πρανούς.



Σχήμα 3-3: Ορθογώνιες συνιστώσες της καμπυλότητας.

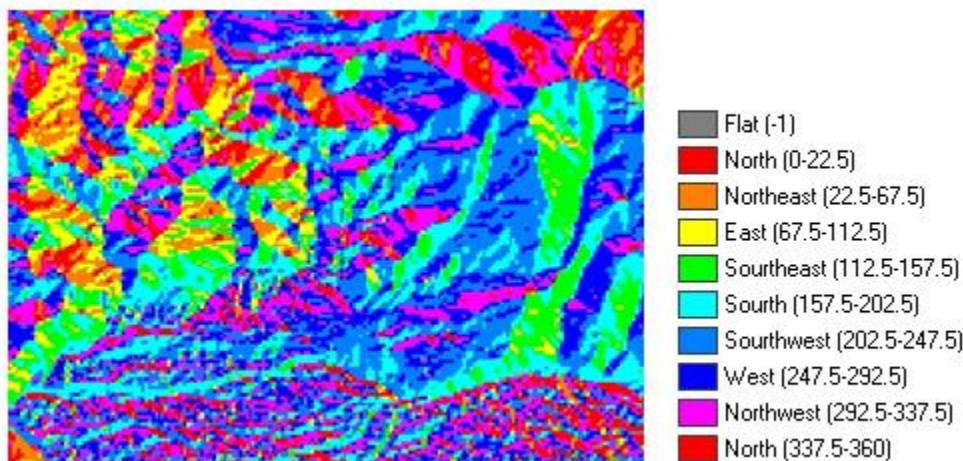
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-4, μια θετική τιμή της καμπυλότητας (περίπτωση A) υποδεικνύει ότι η επιφάνεια είναι πλευρικά κυρτή ως προς το εξεταζόμενο κελί, μια αρνητική τιμή (περίπτωση B) δείχνει ότι η επιφάνεια είναι πλάγια κοίλη στο εξεταζόμενο κελί, ενώ όταν η τιμή της καμπυλότητας είναι μηδέν, υποδεικνύει ότι η επιφάνεια είναι επίπεδη (περίπτωση C). Η καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης του πρανούς σχετίζεται με τη σύγκλιση και την απόκλιση της ροής σε μια επιφάνεια.



Σχήμα 3-4: Η καμπυλότητα.

3.2.4 Ο προσανατολισμός της επιφάνειας (Aspect)

Ο προσανατολισμός της επιφάνειας (Aspect), ορίζεται ως η διεύθυνση προς την οποία είναι στραμμένο/«βλέπει» κάθε κελί ενός ΨΜΕ ή μια επιφάνεια του αναγλύφου. Η γωνία μετρείται από το Βορρά με τη φορά των δεικτών του ρολογιού σε μοίρες και το εύρος των τιμών του προσανατολισμού είναι από 0° έως 360° (Σχήμα 3-5).



Σχήμα 3-5: Τμήμα περιοχής, για το οποίο είναι υπολογισμένος ο κανάβος του προσανατολισμού.

Ο μέσος προσανατολισμός (average aspect σε μοίρες) υπολογίζεται από τον μέσο όρο των τιμών των κελιών μιας ευρύτερης έκτασης ή της λεκάνης απορροής.

3.2.5 Ο δείκτης HAND, Height Above the Nearest Drainage

Ο δείκτης HAND, Height Above the Nearest Drainage, υπολογίζεται ως η υψομετρική διαφορά μεταξύ κάθε κελιού της λεκάνης απορροής με το πλησιέστερο σε αυτό κελί που χαρακτηρίζεται ως υδρογραφικό δίκτυο, κατά μήκος της διεύθυνσης απορροής. Αποτελεί ουσιαστικά μια σύνδεση μεταξύ της τοπογραφίας του γήινου αναγλύφου και του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής.

Ο δείκτης HAND εισήχθη από τους Renno et al. (2008) και θεωρείται βασικό κριτήριο για την ταξινόμηση του γήινου τοπίου σε κατηγορίες υδρολογικού ενδιαφέροντος, καθώς ομαλοποιεί το ανάγλυφο μιας λεκάνης σύμφωνα με τα σχετικά υψόμετρα που υπολογίζονται κατά μήκος του δικτύου αποστράγγισης και, άρα, αποδίδει την τοπογραφία του αναγλύφου ως προς τη θέση του τοπικού δυναμικού δικτύου αποστράγγισης. Η χρήση του επιτρέπει τη διάκριση των τριών κατηγοριών τοπίου: παρόχθιες περιοχές, πλαγιές και οροπέδια ή plateau, καθώς διαπιστώνεται ότι είναι ισχυρότερο ως κριτήριο στη διάκριση του τοπίου από τα απλά υψόμετρα ενός ΨΜΕ.

Το εύρος τιμών του δείκτη HAND για κάθε κατηγορία τοπίου αποτελεί μια αρχική εκτίμηση για την ποσότητα του εδαφικού νερού, καθώς ερευνά την συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων που αναφέρονται στην τοπογραφία της λεκάνης, και του τοπικού υδρογραφικού δικτύου. Αποτελεί πολλά υποσχόμενο δείκτη για την επίλυση δύσκολων υδρολογικών προβλημάτων. Ουσιαστικά το ψηφιακό μοντέλο HAND επιτρέπει την πραγματοποίηση υπολογισμών για την περιγραφή, την κατανόηση και την πρόβλεψη της αποθηκευτικότητας του νερού και των κινήσεων αυτού στην επιφάνεια του εδάφους (Moore et al., 1991). Ο δείκτης HAND αποτελεί επίσης ένα ισχυρό εργαλείο στα χέρια των υδρολόγων για την εφαρμογή υδρολογικού ενδιαφέροντος ταξινόμησης (Παπαγεωργάκη, 2012· Papageorgaki and Nalbantis, 2013· Savenije, 2010· Gharari et al., 2011).

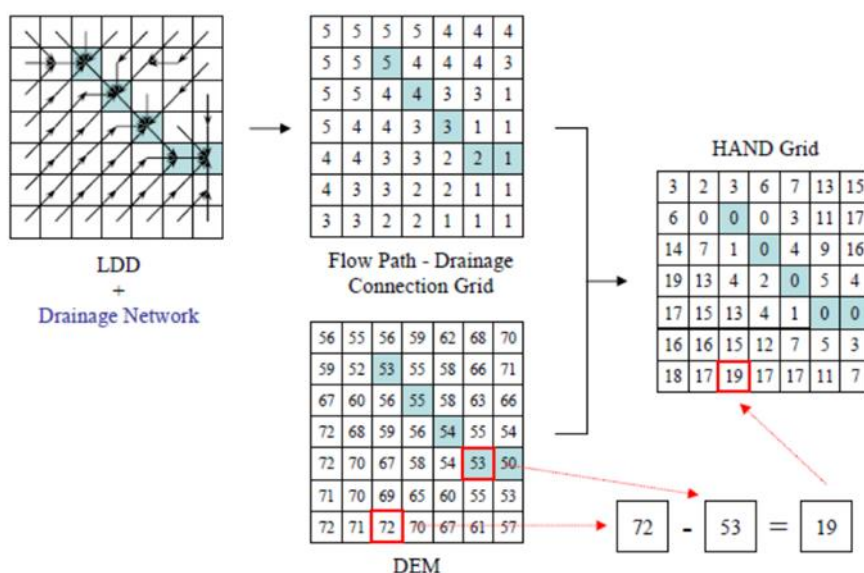
Ο υπολογισμός του δείκτη HAND (Σχήμα 3-6) γίνεται μέσα από την αριθμητική έκφραση των υψομέτρων και των κλίσεων του εδάφους, τον προσδιορισμό του υδρογραφικού δικτύου, της συσχέτισης κάθε κελιού της λεκάνης με το υδρογραφικό δίκτυο, υπολογίζοντας την «υδρολογική» απόσταση κατά τη διεύθυνση της μέγιστης κλίσης της ροής από το πλησιέστερο κελί που χαρακτηρίζεται ως υδρογραφικό δίκτυο. Το αποτέλεσμα του κανάβου του δείκτη HAND, ομαλοποιεί την τοπογραφία, ως προς το υδρογραφικό δίκτυο, επομένως γίνεται

αντιληπτό πως το αρχικό τοπογραφικό ΨΜΕ και η χωρική κατανομή του υδρογραφικού δικτύου είναι βαρύνουσας σημασίας.

Κατά τον υπολογισμό του δείκτη HAND, το αρχικό ΨΜΕ που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό, πρέπει να είναι υδρολογικά ορθό, σύμφωνα με τη διαδικασία που προτείνεται από τους Gharari et al. (2011), καθώς ο δείκτης είναι ευαίσθητος στα υψόμετρα και στο υδρογραφικό δίκτυο. Επομένως, ο τρόπος με τον οποίον εξάγεται το υδρογραφικό δίκτυο από το ΨΜΕ, συμβάλλει καθοριστικά στο τελικό αποτέλεσμα του υπολογισμού.

Συνηθίζεται, το υδρογραφικό δίκτυο που εξάγεται από το υδρολογικά ορθό ΨΜΕ να ανταποκρίνεται στο υπάρχον υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής, όπως αυτό εμφανίζεται στους τοπογραφικούς χάρτες που καλύπτουν την περιοχή. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με την εφαρμογή ενός κατωφλίου, που αφορά την ανάντη έκταση που με τα νερά της συμβάλλει στη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου.

Μιας και ο δείκτης είναι άμεσα εξαρτώμενος από το υδρογραφικό δίκτυο, προτείνεται από τους Parageorgaki and Nalbantis (2018) η χρήση της διάμεσης τιμής της ΑΣΕ (βλ. 4.2.2) για τον καθορισμό του κρίσιμου κατωφλίου, το οποίο είναι απαραίτητο για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από δεδομένα ΨΜΕ στο περιβάλλον του προγράμματος GIS (βλ. Κεφάλαιο 4).



Σχήμα 3-6: Υπολογισμός δείκτη HAND (Renno et al., 2008).

Το δεύτερο και ουσιαστικό βήμα της διαδικασίας για τον τελικό υπολογισμό του δείκτη HAND χρησιμοποιεί δεδομένα που αφορούν την τοπική διεύθυνση ροής και τη θέση του υδρογραφικού δικτύου. Ο κλίμακος διεύθυνσης ροής είναι αυτός που τελικά θα καθοδηγήσει χωρικά τον αλγόριθμο υπολογισμού του δείκτη HAND, στην παραγωγή του κανονικοποιημένου ψηφιακού μοντέλου HAND. Επομένως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι μονής ή πολλαπλής διεύθυνσης ροής (Single Flow Direction ή Multiple Flow Direction).

Η ακρίβεια της υψομετρικής πληροφορίας είναι υπεύθυνη για την ακρίβεια υπολογισμού του δείκτη HAND και, επομένως, είναι αναγκαία η προσεκτική επιλογή των αρχικών δεδομένων. Τα ΨΜΕ που προέρχονται από δεδομένα δορυφορικών αποστολών συχνά εμφανίζουν υψομετρικές ανωμαλίες (βυθίσματα και εξάρσεις) στην αναπαράσταση του γήινου αναγλύφου, με αποτέλεσμα τα τοπικά σφάλματα αυτά να μεταφέρονται στον υπολογισμό του δείκτη

HAND. Σε περιπτώσεις δε όπου ο δείκτης HAND χρησιμοποιείται ως κριτήριο σε κατανεμημένη ταξινόμηση των κελιών της λεκάνης απορροής τα σφάλματα παραμένουν ως σφάλματα στο τελικό αποτέλεσμα, την κλάση, δηλαδή, των ταξινομημένων περιοχών, π.χ. σε περιπτώσεις ταξινόμησης τοπίου. Επομένως, κελιά τα οποία αποτελούν αμελητέες από υδρολογική άποψη τοπικές εξάρσεις του αναγλύφου όπως περιοχές απότομης αλλαγής κλίσεων, ταξινομούνται λανθασμένα.

Για τη μείωση της επίδρασης των σφαλμάτων του παραπάνω προβλήματος χρησιμοποιούνται φίλτρα εξομάλυνσης. Η επιλογή κάθε φορά της συνάρτησης με την οποία θα πραγματοποιηθεί η εξομάλυνση εξαρτάται από το είδος των δεδομένων. Τα δεδομένα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: σε αυτά που περιγράφουν φαινόμενα που εξελίσσονται παράλληλα με το χρόνο και παρουσιάζονται υπό μορφή χρονοσειρών και στα στατικά, όπως οι εικόνες και τα ΨΜΕ.

Η εξομάλυνση δεδομένων της δεύτερης κατηγορίας, γίνεται με φίλτρα, από τα οποία τα συνηθέστερα είναι αυτά που ακολουθούν την κατανομή Gauss. Σε αυτή την περίπτωση, εφαρμόζεται ένα κινούμενο χωρικό παράθυρο εξομάλυνσης, διαφοροποιούμενου μεγέθους ανάλογα με την περίπτωση, με μέση τιμή ίση με μηδέν και τυπική απόκλιση ανάλογη της ακρίβειας των δεδομένων, επιτρέποντας την ομαλοποίηση των τοπικών εξάρσεων του αναγλύφου, διατηρώντας την υψηλή ανάλυση (Gharari et al., 2011) και αποδίδοντας σε κάθε κελί τη σταθμισμένη τιμή του υψομέτρου των γειτονικών κελιών του παραθύρου που χρησιμοποιήθηκε. Να σημειωθεί πως η χρήση ενός παραθύρου εξομάλυνσης είναι συνηθέστερα απαραίτητη σε ΨΜΕ με υψηλή χωρική ανάλυση, ενώ, για ΨΜΕ με χαμηλή ανάλυση (με μέγεθος κελιού 100 m ή 250 m), δεν είναι απαραίτητη η εφαρμογή.

Η ταξινόμηση των κελιών και, κατ' επέκταση, του συνόλου της επιφάνειας της λεκάνης απορροής με βάση το δείκτη HAND, τις κλίσεις και την υδρολογική απόσταση έχει ως αποτελέσματα τη δημιουργία κλάσεων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (Παπαγεωργάκη, 2012). Πλήθος μελετών χρησιμοποιούν το δείκτη HAND σε εφαρμογές, με την χρήση του να αποδεικνύεται συμβάλλουσα στην επίτευξη μιας επιτυχούς ταξινόμησης (Παπαγεωργάκη, 2012· Parageorgaki and Nalbantis, 2013· Savenije, 2010· Gharari et al., 2011).

Μιας και το υδρογραφικό δίκτυο αποτελεί παράγοντα από τον οποίο επηρεάζεται ο δείκτης HAND, είναι σημαντικό να αναφερθούν αλγόριθμοι, που αναφέρονται στη βιβλιογραφία και χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου στηριζόμενοι σε διάφορα θεωρητικά υπόβαθρα. Η παρουσίαση αυτών των αλγορίθμων γίνεται στο Εδάφιο 4.3.1, που αφορά τις τεχνικές που εφαρμόζονται για την επιλογή της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης, ως εκείνου του κατωφλίου που επιτρέπει την εμφάνιση του υδρογραφικού δικτύου.

3.2.6 Απόσταση από τον εγγύτερο κλάδο του Υδρογραφικού δικτύου (Hydrological Distance)

Η Απόσταση από τον εγγύτερο κλάδο του Υδρογραφικού δικτύου (Hydrological Distance) δηλαδή η απόσταση κάθε σημείου της λεκάνης από τον εγγύτερο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου κατά τη διεύθυνση της ροής του νερού, χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την κατανεμημένη ταξινόμηση του τοπίου σε κατηγορίες τοπίου όμοιας υδρολογικής απόκρισης. Πληθώρα μελετών στη βιβλιογραφία έχουν χρησιμοποιήσει την «υδρολογική» Απόσταση κατά την έννοια που περιγράφηκε στα άρθρα των Gharari et al. (2011) και Parageorgaki and Nalbantis (2013), μιας και είναι ένα ακόμα υδρολογικό χαρακτήρα γεωμορφολογικό χαρακτηριστικό που χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την ταξινόμηση της λεκάνης απορροής σε κατηγορίες τοπίου.

Ο υπολογισμός της Απόστασης κάθε σημείου της λεκάνης από τον κοντινότερο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου, γίνεται με παρόμοιο τρόπο με αυτόν με τον οποίο υπολογίζεται ο δείκτης HAND, εφαρμόζοντας τη διεύθυνση της μέγιστης κλίσης της διαδρομής του νερού, σύμφωνα με τους Burrough and McDonnell (1998).

Η «υδρολογική» Απόσταση αποτελεί κριτήριο που σχετίζεται με την εγγύτητα των κελιών από το υδρογραφικό δίκτυο, με αποτέλεσμα να μπορεί να διαχωρίσει τα κελιά της λεκάνης απορροής σε κατηγορίες σε σχέση με τη σχετική τους θέση ως προς το υδρογραφικό δίκτυο. Ενδεικτικά δίνεται το παράδειγμα των παρόχθιων περιοχών εντός της λεκάνης απορροής, οι οποίες αναμένεται να εντοπιστούν σε μικρή Απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο. Η χρήση της «υδρολογικής» Απόστασης, σε συνδυασμό με την κλίση του εδάφους, μπορεί εύκολα να διαχωρίσει ορεινές μεγάλης κλίσης παρόχθιες περιοχές από πεδινές παρόχθιες περιοχές κοντά στην έξοδο της λεκάνης απορροής.

3.2.7 Ο Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας - Topographic Wetness Index

Ο Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας - Topographic Wetness Index (TWI) χρησιμοποιείται ευρέως για να περιγράψει την επίδραση της τοπογραφίας στις υδρολογικές διεργασίες και την έκταση των ζωνών κορεσμού του εδάφους που δημιουργούνται λόγω της απορροής. Ο δείκτης TWI αποτελεί έναν συνδυασμό της τοπικής ανάντη συμβάλλουσας έκτασης και της κλίσης του εδάφους, και αποτελεί ένα μέσο ποσοτικοποίησης του τοπογραφικού ελέγχου στις υδρολογικές διεργασίες.

Ο δείκτης αυτός εισήχθη πρώτη φορά από τους Beven και Kirkby (1979), ενώ, αργότερα, χρησιμοποιήθηκε στο υδρολογικό μοντέλο TOPMODEL (Beven et al., 1995· Beven, 2012) και ουσιαστικά αποτελεί μια ένδειξη της χωρικής κατανομής της υγρασίας. Είναι αδιάστατο μέγεθος και υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.19, χρησιμοποιώντας ως αρχικά δεδομένα την πληροφορία από ένα ΨΜΕ:

$$TWI = \ln\left(\frac{\alpha}{\tan\beta}\right) \quad (3.19)$$

όπου α είναι η ανάντη συμβάλλουσα περιοχή που αποστραγγίζεται στο συγκεκριμένο κελί, ανά μονάδα μήκους (m^2/m), και β , η παράμετρος που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της υδραυλικής κλίσης (τοπικό δυναμικό αποστράγγισης), δηλαδή, η τιμή της κλίσης σε ακτίνια, στο ίδιο κελί του ορθού υδρολογικά ΨΜΕ.

Η τιμή του δείκτη TWI υποδηλώνει την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό εξαιτίας του κορεσμού της γήινης επιφάνειας ή την δυνατότητα του κελιού να παράξει απορροή, καθώς περιοχές με υψηλό δείκτη υγρασίας είναι πιο επιρρεπείς στον κορεσμό. Επομένως, η χωρική κατανομή των τιμών του δείκτη υποδεικνύει το χωρικό πρότυπο της υγρασίας του εδάφους. Όπως ο Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας, έτσι και ο δείκτης ροής ενέργειας (stream power index) και ο συντελεστής αναγλύφου (Length-Slope factor), χρησιμοποιούν πρωτογενή τοπογραφική πληροφορία και συμβάλλουν στην εκτίμηση της διάβρωσης και της στερεομεταφοράς που λαμβάνει χώρα στο υδρογραφικό δίκτυο ή στην επιφάνεια του εδάφους, και, εν τέλει, στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας λεκάνης απορροής στις φυσικές και υδρολογικές διεργασίες.

3.3 Πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου

Σε μεγάλο βαθμό η δομή του αναγλύφου μιας λεκάνης απορροής, σχετίζεται με την αλληλεπίδραση μεταξύ των φυσικών διεργασιών που συμβαίνουν στις κλιτύες (πλαγιές) και

στο υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης. Η αλληλεπίδραση των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στις κλιτύες και στο υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης, αποτυπώνονται στην πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, καθώς η τελευταία είναι η παράμετρος που επιτρέπει την ανίχνευση της επίδρασης της ετερογένειας του αναγλύφου, στην απορροή.

Ο βαθμός με τον οποίο ένα τοπίο (landscape) διατρέχεται/ τέμνεται από το υδρογραφικό δίκτυο, αποτελεί θεμελιώδη ιδιότητα του φυσικού γήινου αναγλύφου. Ο Horton (1945), ανέφερε ως πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης, το λόγο του συνολικού μήκους ΣL του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής, προς την έκταση A που καταλαμβάνει η λεκάνη και υπολογίζεται από την σχέση:

$$D_d = \frac{\Sigma L}{A} \quad (3.20)$$

όπου το ΣL εκφράζεται σε km και το A σε km².

Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, αποτελεί ένα μέτρο της μέσης απόστασης που πρέπει να διανύσει το νερό στην επιφάνεια του εδάφους από ένα οποιοδήποτε σημείο μιας λεκάνης απορροής μέχρι να συναντήσει κάποιο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου. Αυτή είναι ένα χωρικά κατανεμημένο μέγεθος και υπολογίζεται για κάθε κελί της λεκάνης απορροής. Εκφράζεται με μονάδα μέτρησης αντίστροφη του μήκους και συνδέεται στενά με πολλά μεγέθη που αποτελούν χαρακτηριστικά γνωρίσματα του γήινου αναγλύφου μιας λεκάνης απορροής, όπως την ανάντη έκταση στις κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου (channel-head source area) (Montgomery and Dietrich, 1989).

Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου D_d δηλώνει το μήκος υδρογραφικού δικτύου (υδατορευμάτων) σε km που διατηρείται από επιφάνεια αποστράγγισης ίση με 1 km² και υπολογίζεται από την αναλυτικότερη σχέση:

$$D_d = \frac{1}{2 * L_{hill}} \quad (3.21)$$

όπου L_{hill} είναι το μήκος επί πλαγιάς που πρέπει να διανύσει μια σταγόνα νερό μέχρι να φτάσει στο κοντινότερο υδατόρευμα. Η πυκνότητα μαζί με την υδρογραφική συχνότητα συνθέτουν την υδρογραφική υφή μιας υδρολογικής λεκάνης. Γενικότερα, λεκάνες με πυκνό υδρογραφικό δίκτυο, δημιουργούν υψηλές πλημμυρικές αιχμές στο σημείο εξόδου, ενώ παράλληλα δημιουργούνται συνθήκες που ενισχύουν την διάβρωση του εδάφους και την απόσπασή του από τα μητρικά πετρώματα, την μεταφορά καθώς και την εναπόθεση των φερτών υλικών. Επίσης, υψηλές τιμές υδρογραφικής πυκνότητας είναι ένδειξη λεπτής υδρογραφικής υφής, ενώ από την άλλη χαμηλές τιμές υδρογραφικής πυκνότητας χαρακτηρίζουν λεκάνες με τραχεία υδρογραφική υφή. Η υφή των λεκανών απορροής εξαρτάται από το κλίμα, τις φυσικές ιδιότητες του πετρώματος, του εδαφικού καλύμματος, της βλάστησης και του αναγλύφου.

Ως προς την κατανομή και την πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής, παρατηρείται ότι, όσο πιο πυκνό και πιο ομοιόμορφα κατανεμημένο είναι το υδρογραφικό δίκτυο, τόσο μικρότερες είναι οι διαδρομές που ακολουθεί το νερό πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, επί της πλαγιάς και, επομένως, τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος ροής του νερού μέχρι την έξοδο της λεκάνης. Το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση της λεκάνης με αραιό υδρογραφικό δίκτυο. Επομένως, στην τελευταία περίπτωση, αναμένεται ο ανοδικός κλάδος του υδρογραφήματος να είναι ηπιότερης κλίσης, το μέγεθος της αιχμής μικρότερο, και, γενικά, η άμεση απορροή μικρότερη, μιας και ο χρόνος που χρειάζεται για τη διαδρομή του νερού στο έδαφος είναι μεγαλύτερος και, κατά συνέπεια, μεγαλύτερες ποσότητες νερού διηθούνται σε αυτό.

Η χωρικά κατανεμημένη μεταβλητή της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου, υπολογίζεται για κάθε κελί του ΨΜΕ από την Εξίσωση 3.21.

Γενικά, μια λεκάνη απορροής θεωρείται ότι έχει μικρή πυκνότητα και, επομένως, ανάλογη αποστράγγιση αν $D_d \leq 0.5$, ενώ, αυτή θεωρείται ότι έχει μεγάλη πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου και, άρα, καλή αποστράγγιση αν $D_d \geq 3$.

Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου ποικίλει ανάλογα το κλίμα και τη βλάστηση (Chorley, 1957· Chorley and Morgan, 1962· Melton, 1958· Gregory and Gardiner, 1975· Moglen et al., 1998), το έδαφος, τις ιδιότητες του εδάφους (Smith, 1958· Carlston, 1963· Cotton, 1964· Wilson, 1971· Madduma Bandara, 1974· Kelson and Wells, 1989), το ανάγλυφο (Schumm, 1956· Montgomery και Dietrich, 1988· Oguchi, 1997· Tucker et al., 2001) και την ηλικία του τοπίου. Η σχέση μεταξύ της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου και της διάβρωσης στο ανάγλυφο μιας λεκάνης απορροής μετά από ένα γεγονός βροχόπτωσης, αποτελεί απόδειξη των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στο ανάγλυφο του εδάφους και επηρεάζουν το τοπίο στο πέρασμα του χρόνου.

Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου και η δομή του τοπίου ελέγχονται, σε διαφορετικό βαθμό ανάλογα με την παράμετρο, από κατώφλια, όπως για παράδειγμα το κατώφλι που χρησιμοποιείται και αφορά τη γένεση της απορροής (Kirkby, 1980· Ijjász-Vásquez et al., 1992· Dietrich et al., 1993) ή από κατώφλια που αφορούν το ανάγλυφο, το κλίμα και την γεωλογία (Tucker, 1996).

Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής αναγνωρίστηκε ως χαρακτηριστικό με μεγάλη σπουδαιότητα, αφού συνδέεται άμεσα με τις διεργασίες που παρατηρούνται σε αυτήν. Αναλυτικότερα, λεκάνες απορροής με πυκνό υδρογραφικό δίκτυο δημιουργούν υψηλές πλημμυρικές αιχμές στη διατομή εξόδου, ενώ ταυτόχρονα μεταφέρουν σημαντικές ποσότητες φερτών υλών (Gregory and Walling, 1968· Dunne and Leopold, 1978). Επιπλέον η μεγάλη πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, συνδέεται με λεκάνες με επιφάνειες μεγάλων κλίσεων (Τσακίρης, 1995). Έχουν προταθεί πολλές σχέσεις για την ποσοτικοποίηση του μεγέθους της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου. Ενδεικτικά αναφέρονται: ίσως η πιο αποδεκτή, εκείνη που εκφράζει το μήκος των υδατορευμάτων ανά μονάδα επιφάνειας της λεκάνης και η σχέση κατά Horton όπου η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου ορίζεται ως η συχνότητα υδατορευμάτων της λεκάνης, δηλαδή, ο αριθμός τμημάτων υδατορευμάτων του δικτύου προς τη συνολική επιφάνεια της λεκάνης.

3.4 Η συμβολή της τοπογραφίας και η χρήση γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών

Η συμβολή της τοπογραφικής πληροφορίας ή της τοπογραφίας, γενικότερα, στη βέλτιστη μοντελοποίηση των υδρολογικών διεργασιών που συντελούνται εντός μιας λεκάνης απορροής είναι γνωστή στους υδρολόγους, αν και πολύ συχνά, εντός των υδρολογικών μοντέλων, η αξιοποίηση αυτής της πληροφορίας δεν γίνεται στο βαθμό που κανείς θα περίμενε. Η θεώρηση της κλίμακας μελέτης σε αυτή τη διερεύνηση, αποτελεί κρίσιμη απόφαση.

Από την παγκόσμια κλίμακα μέχρι την κλίμακα της λεκάνης απορροής, η μελέτη για την θεώρηση εξισώσεων πρόβλεψης της απόκρισης προϋποθέτει την ένταξη, εντός των εξισώσεων, της ετερογένειας και των μοτίβων που εμφανίζονται, ενώ αυτά τα μοτίβα σε άλλη κλίμακα παραλείπονται υπολογιστικά. Στην κλίμακα της λεκάνης απορροής η μοντελοποίηση των διεργασιών και των μηχανισμών γένεσης της απορροής επιβάλλει την οργάνωση της

τοπογραφικής πληροφορίας ή των κατηγοριών του τοπίου σε «υδρολογικές μονάδες» ελεγχόμενες από τοπογραφικούς παράγοντες.

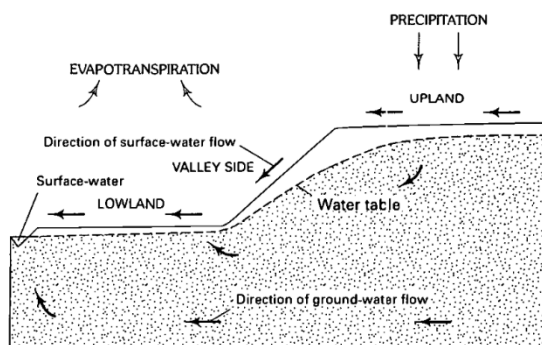
Για παράδειγμα, το μέγεθος της λεκάνης απορροής είναι μια παράμετρος που υποδηλώνει την κλίμακα και παίζει σημαντικό ρόλο κατά τη χρήση των υδρολογικών μοντέλων, καθώς η απόκριση στην βροχόπτωση των μικρών σε έκταση λεκανών απορροής είναι πιθανό να είναι διαφορετική και πιο μεταβλητή (ασταθής) από αυτή των μεγάλων σε έκταση λεκανών απορροής (Pilgrim et al., 1982). Οι μικρής έκτασης λεκάνες απορροής πρέπει να μελετώνται εντός των υδρολογικών μοντέλων, με εφαρμογή ανάλυσης μικρότερου χρονικού βήματος (Blöschl and Sivapalan, 1995· Bronstert, 2003· Vormoor and Skaugen, 2013).

Από τη μελέτη της βιβλιογραφίας προκύπτει ότι πληθώρα υδρολογικών μοντέλων χρησιμοποιούν ως υπόβαθρο την τοπογραφική πληροφορία για την μοντελοποίηση των διεργασιών που συμβαίνουν εντός της λεκάνης απορροής (TOPMODEL, FLEX-Toro, SHE, Xinanjiang model κ.ά.), καθώς επίσης πολλοί είναι οι δείκτες που μπορούν να υπολογιστούν από τοπογραφικά δεδομένα που περιγράφουν το γήινο ανάγλυφο και η ανάλυσή τους μπορεί να βοηθήσει να εξαχθούν υδρολογικού χαρακτήρα συμπεράσματα

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο TWI χρησιμοποιεί τοπογραφική πληροφορία και αναδεικνύει την πιθανότητα κορεσμού κάθε σημείου μιας λεκάνης απορροής, ουσιαστικά αποτελεί μια ένδειξη χωρικής κατανομής της πιθανότητας εμφάνισης κορεσμένης επιφανειακής απορροής. Ο δείκτης υποθέτει ότι ο υπόγειος κορεσμός που πυροδοτεί την επίγεια ροή λόγω κορεσμού (Saturation excess Overland Flow ή SOF) συμβαίνει λόγω της υποδερμικής ροής (sub-surface flow) στις κλιτύες, υπόθεση που δεν είναι καθολικά σωστή.

Επίσης, ο δείκτης HAND, προκύπτει από υπολογισμούς που βασίζονται στην πληροφορία του γήινου αναγλύφου και ουσιαστικά αποτελεί μια ομαλοποιημένη εκδοχή του αναγλύφου μιας λεκάνης απορροής. Τα ομαλοποιημένα σχετικά υψόμετρα που υπολογίζονται κατά μήκος του δικτύου αποστράγγισης (υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής) αποδίδουν την τοπογραφία του αναγλύφου ως προς τη θέση του τοπικού δυναμικού του δικτύου αποστράγγισης.

Τα δύο παραπάνω παραδείγματα βοηθούν στην κατανόηση της θεώρησης του Savenije (2010), σύμφωνα με την οποία η τοπογραφία είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την υδρολογική συμπεριφορά μιας λεκάνης απορροής.



Σχήμα 3-7:Θεμελιώδης υδρολογική μονάδα τοπίου (Fundamental Hydrologic Landscape Unit, FHLU) κατά Winter (2001).

Παρόλη την ετερογένεια του ανάγλυφου που αποτυπώνεται μέσω της τοπογραφίας, των εδαφών και της βροχόπτωσης, ο Winter (2001) ισχυρίζεται ότι στην κλίμακα της λεκάνης απορροής, εντοπίζονται μοτίβα με εντυπωσιακά απλή συμπεριφορά, και επομένως χρησιμοποιώντας τοπογραφικά κριτήρια μπορεί να γίνει υδρολογική διάκριση των κατηγοριών

τοπίου. Ο ίδιος πρότεινε τον ορισμό της θεμελιώδους υδρολογικής μονάδας τοπίου (Fundamental Hydrologic Landscape Unit, FHLU), ως τη χωρική αλληλουχία όπου αποτελείται από ένα plateau που διαχωρίζεται από μια περιοχή χαμηλού υψομέτρου με μια ενδιάμεση έντονης κλίσης πλαγιά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-7.

Η χρήση της παραπάνω θεώρησης στα υδρολογικά μοντέλα (Savenije, 2010), και η αξιοποίηση της τοπογραφικής πληροφορίας για την κατηγοριοποίηση του τοπίου της λεκάνης απορροής σε περιοχές παρόμοιας υδρολογικής συμπεριφοράς, αποτελεί κρίσιμο και αποτελεσματικό εργαλείο μοντελοποίησης στα χέρια των επιστημόνων. Βέβαια, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η σύνδεση μεταξύ κάθε κατηγορίας τοπίου της λεκάνης απορροής με ένα κυρίαρχο καθεστώς απορροής είναι αυτό που πραγματικά απασχολεί, βρίσκεται στην αιχμή της έρευνας, και αποτελεί αντικείμενο στον πυρήνα της θεωρητικής υδρολογίας. Οι μηχανισμοί γένεσης της απορροής αναλύονται στο Κεφάλαιο 2.

Το μοντέλο Xinanjiang (Zhao, 1992) αξιοποιεί την επίδραση της τοπογραφίας στη συνάρτηση της εδαφικής υγρασίας του μοντέλου, με αποτέλεσμα η καμπύλη της κατανομής της χωρητικότητας νερού, να μπορεί να ερμηνευθεί ως ένα είδος τοπογραφικής ετερογένειας.

Επίσης, σε πολλές περιπτώσεις μοντέλων ή υδρολογικών υπολογισμών, η τοπογραφική πληροφορία κρύβεται μέσα σε απλοποιημένες αποφάσεις κρίσιμου υδρολογικού χαρακτήρα που λαμβάνονται από υδρολόγους. Μια τέτοια απόφαση είναι η παράμετρος της συμβάλλουσας έκτασης (variable contributing area, VCA), για την οποία, παρά το γεγονός ότι υπάρχει σε πολλά μοντέλα, έρευνες έχουν δείξει ότι η υποκειμενική υπόθεση της τιμής της δεν συμφωνεί με την πραγματικότητα (Spence and Woo, 2003· Tromp-van Meerveld and McDonnell, 2006).

Τα χωρικά κατανεμημένα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, τα οποία υπολογίζονται από το ΨΜΕ, χρησιμοποιούνται υπό τη μορφή επιθεμάτων (layers). Η πληροφορία η οποία είναι αποθηκευμένη σε κάθε layer μπορεί να εξαχθεί είτε ως σημειακή πληροφορία, είτε ως στατιστική τιμή των χωρικά κατανεμημένων τιμών του χαρακτηριστικού. Και οι δύο παραπάνω μορφές της πληροφορίας είναι χρήσιμες σε διαφορετικού τύπου εφαρμογές.

4 Εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου από Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους - Η Ανάντη Συμβάλλουσα Έκταση

Από τη δεκαετία του 1970 μέχρι και σήμερα, λόγω της ευρείας διαθεσιμότητας της τοπογραφικής πληροφορίας σε ψηφιακή μορφή, η εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου που αποτελεί σημαντικό γεωμορφολογικό στοιχείο για τις υδρολογικές μελέτες, πραγματοποιείται με την επιλογή και εφαρμογή αυτόματων τεχνικών, ανάλογα με τις ανάγκες της μελέτης, με βάση μια πληθώρα μεθοδολογιών που διατίθενται στη βιβλιογραφία και εύκολα εφαρμόζονται με χρήση ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information System, ή GIS). Μέχρι και τα μέσα της δεκαετίας του 1980, παρά το γεγονός ότι το ανάγλυφο του εδάφους ήταν διαθέσιμο υπό τη μορφή των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (ΨΜΕ, Digital Elevation Models, ή DEM), και οι επιστημονικοί κλάδοι της γεωμορφολογίας και της υδρολογίας ευνοήθηκαν λόγω της χρήσης των δεδομένων αυτών, λιγότερες είναι οι δημοσιεύσεις εργασιών που αντιμετωπίζουν το υδρολογικά κρίσιμο πρόβλημα της εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου από ψηφιακά δεδομένα.

Στις μέρες μας, είναι γνωστό ότι η εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου και ο προσδιορισμός του υδροκρίτη μιας λεκάνης απορροής, είναι διαδικασίες που εκτελούνται εύκολα και αυτόματα σε ένα GIS. Παρά την απλότητα των διαδικασιών εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου, η εκτίμηση της χωρικής κατανομής του υδρογραφικού δικτύου αποτελεί κρίσιμη και σπουδαίας σημασίας «υδρολογική» απόφαση (Montgomery and Dietrich, 1989· Montgomery and Dietrich, 1992· Moore et al., 1991· Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993· Garbrecht and Martz, 2000· Wilson, 2012· Papageorgaki and Nalbantis, 2018), η οποία απαιτεί εμπειρία και προσοχή, καθώς η χωρική κατανομή του υδρογραφικού δικτύου επηρεάζει την προσομοίωση της υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης απορροής, αλλά και την αναπαράσταση της γεωμορφολογικής δομής του εδάφους. Η επιφανειακή απορροή μιας λεκάνης απορροής συνδέεται με τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου και είναι άμεσα επηρεαζόμενη από τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά του δικτύου και της λεκάνης απορροής. Τα χαρακτηριστικά του υδρογραφήματος μιας πλημμύρας είναι συσχετισμένα με τα χαρακτηριστικά της περιοχής στην οποία αυτό συμβαίνει. Από μελέτες υπάρχει η κοινή θεώρηση ότι η γένεση της επιφανειακής απορροής και ο συντελεστής απορροής ελέγχονται, όχι μόνο από τον όγκο της βροχόπτωσης, αλλά μεταξύ άλλων, και από τη συνέχεια του υδρογραφικού δικτύου (stream network connectivity) (Jencso et al., 2009· Jencso and McGlynn, 2011· Phillips et al., 2011· Hrachowitz et al., 2013).

Μελετώντας τη βιβλιογραφία, συναντάται η άποψη ότι το υδρογραφικό δίκτυο μπορεί να εξαχθεί αυθαίρετα από ένα ΨΜΕ, αλλά για να είναι κατάλληλο για τις υδρολογικές μελέτες, πρέπει η χωρική του κατανομή και το ανάπτυγμά του να ελεγχθούν. Για την κατανόηση των διαδικασιών που εκτελούνται για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου, είναι αναγκαίος ο ορισμός των στοιχείων από τα οποία αποτελείται ένα υδρογραφικό δίκτυο. Ξεκινώντας από τα υψηλά υψόμετρα, δηλαδή τις πλέον ανάντη περιοχές της λεκάνης απορροής, το υδρογραφικό δίκτυο σχηματίζεται για πρώτη φορά στις κεφαλές, στις θέσεις εκείνες, δηλαδή, στις οποίες συγκεντρώνεται κατάλληλη ποσότητα νερού ώστε να εμφανιστεί επιφανειακή απορροή. Με

τον όρο επιφανειακή απορροή, επομένως, νοείται η ροή του νερού μέσα στο υδατόρευμα ακολουθώντας τη βαρύτητα. Στη συνέχεια, το υδρογραφικό δίκτυο συνεχίζει μέσα από τις μισγάγγειες να κατευθύνεται προς τις πεδινές περιοχές ακολουθώντας τη ροή του νερού μέσα στην κοίτη και, τελικά, καταλήγει στο στόμιο εξόδου της λεκάνης απορροής ή στη θάλασσα, η οποία είναι ο τελικός αποδέκτης των επιφανειακών υδάτων. Σύμφωνα με τη διαδικασία της μοντελοποίησης που ακολουθείται υπολογιστικά σε ένα GIS, οι κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου είναι τα σημεία εκείνα στα οποία μια ελάχιστη ανάντη έκταση συμβάλλει στο σχηματισμό επιφανειακής απορροής με το νερό που αυτή δέχεται μετά από ένα επεισόδιο βροχής. Στη φύση, στις κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου, η ροή του νερού που συμβαίνει επί των κλιτύων μιας λεκάνης απορροής μετατρέπεται σε ροή νερού εντός υδρογραφικού δικτύου, καθώς πληρούνται οι συνθήκες που συμβάλλουν στο σχηματισμό επιφανειακής απορροής. Να σημειωθεί ότι η ελάχιστη ανάντη έκταση, η οποία χρησιμοποιείται ως κριτήριο εντός του GIS, αντιστοιχεί στην έκταση του τμήματος της πλαγιάς ανάντη της θέσης της κεφαλής.

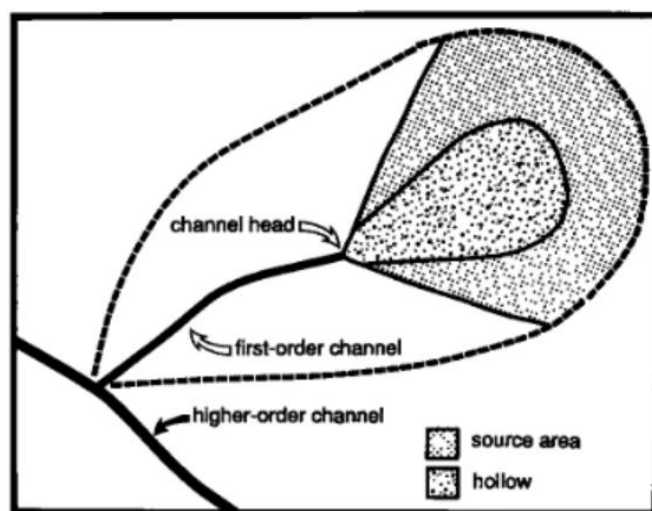
Μορφολογικά, οι κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου βρίσκονται πάνω στις *μισγάγγειες*, δηλαδή, στο γεωμετρικό τόπο της τομής δύο διαδοχικών κλιτύων (πλαγιών). Οι κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου αποτελούν ουσιαστικά τα πλέον ανάντη σημεία (σημεία έναρξης) των κλάδων πρώτης τάξης του υδρογραφικού δικτύου. Οι κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου σε ένα σύστημα GIS αποτελούν τους κόμβους έναρξης του μοντελοποιημένου υδρογραφικού δικτύου. Καθώς το υδρογραφικό δίκτυο αναπτύσσεται κατάντη, όταν δύο κλάδοι πρώτης τάξης συναντηθούν, τότε το σημείο συνάντησης και ένωσης αυτών ονομάζεται *συμβολή* του υδρογραφικού δικτύου, ή *κόμβος* του μοντελοποιημένου υδρογραφικού δικτύου. Μετά τη συμβολή των δύο ανάντη κλάδων, ο κλάδος που σχηματίζεται συγκεντρώνει τα νερά και των δύο. Σε ένα GIS, γίνεται επομένως κατανοητό ότι η μοντελοποίηση του υδρογραφικού δικτύου ακολουθεί την παραδοχή ότι κάθε κλάδος έχει δύο κόμβους, έναν αρχής και έναν τέλους, ενώ, ως υδρογραφικό δίκτυο μιας λεκάνης απορροής θεωρείται το σύνολο των κόμβων και των κλάδων. Σε μία λεκάνη απορροής, το σύνολο των κλάδων των υδατορευμάτων συμβάλλει, με τα νερά του, στην έξοδο (ή στόμιο εξόδου) της λεκάνης απορροής, δηλαδή, τον πλέον κατάντη κόμβο του υδρογραφικού δικτύου. Η έξοδος, επομένως, της λεκάνης απορροής αποτελεί τον πλέον κατάντη κόμβο του κύριου υδατορευματος και επομένως και του μοντελοποιημένου δικτύου. Όπως στην φύση, έτσι και σε ένα περιβάλλον GIS, κάθε κλάδος και κάθε κόμβος του δικτύου χαρακτηρίζεται και μπορεί να περιγραφεί από ορισμένες ιδιότητες, οι οποίες αποθηκεύονται και χρησιμοποιούνται σε υπολογισμούς.

Τα συνήθη περιγραφικά χαρακτηριστικά των κόμβων είναι: (1) το υψόμετρο του εδάφους, (2) η ανάντη έκταση που συμβάλλει με τα νερά της στον κόμβο, (3) η τοπική κλίση του εδάφους, (4) η συνολική έκταση που συμβάλλει με τα νερά της στον κόμβο και υπολογίζεται ως άθροισμα της ανάντη έκτασης του κόμβου και της έκτασης της οποίας τα νερά απορρέουν μέσω του ανάντη κλάδου στον υπό εξέταση κόμβο, και άλλα γεωμορφολογικά ή άλλου τύπου δεδομένα τα οποία μπορούν να αποδοθούν στη θέση κάθε κόμβου.

Τα συνήθη περιγραφικά χαρακτηριστικά των κλάδων είναι το μήκος, τα υψόμετρα των κόμβων αρχής και τέλους, το όνομα του κλάδου και η κλίση. Μερικά από τα περιγραφικά χαρακτηριστικά των κόμβων ενός κλάδου μεταφέρονται και αποδίδονται ως περιγραφικά χαρακτηριστικά του κλάδου ώστε να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό άλλων περιγραφικών χαρακτηριστικών του κλάδου, όπως, για παράδειγμα, η μεταφορά του υψομέτρου κάθε κόμβου η οποία επιτρέπει τον υπολογισμό της κλίσης του κλάδου.

Ως προς την αναπαράσταση του υδρογραφικού δικτύου στους τοπογραφικούς χάρτες και ως προς τις θέσεις των κεφαλών, να σημειωθεί ότι, συχνά, το υδρογραφικό δίκτυο παρουσιάζεται να ξεκινά από θέση στην οποία βρίσκεται πηγή από την οποία αναβλύζει νερό. Οι κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου δεν ταυτίζονται πάντα με τις πηγές, αλλά είναι πιθανό μια πηγή να είναι ταυτόχρονα και κεφαλή του υδρογραφικού δικτύου, σύμφωνα με τις τοπικές συνθήκες. Η παραπάνω παρατήρηση, επί των τοπογραφικών χαρτών, δημιουργεί αμφιβολία για τον τρόπο και τα κριτήρια τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου και, κατά συνέπεια, οδηγεί σε διερεύνηση των κριτηρίων που επιλέγονται για τον καθορισμό του υδρογραφικού δικτύου.

Μέσω της χρήσης των GIS, πληθώρα αλγορίθμων είναι διαθέσιμοι και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξαγάγουν το υδρογραφικό δίκτυο των λεκανών απορροής, εφαρμόζοντας διαφορετικές θεωρητικές μεθοδολογίες, ενώ χρησιμοποιούν ως αρχικό δεδομένο το ΨΜΕ. Στόχος των μεθοδολογιών είναι η διάκριση των κελιών εκείνων ενός ΨΜΕ, που αποτελούν το υδρογραφικό δίκτυο, εφαρμόζοντας χωρικά ή μαθηματικά κριτήρια. Η επιλογή και η εφαρμογή του κριτηρίου είναι μεγάλης σπουδαιότητας διαδικασία που επηρεάζει τα αποτελέσματα της υδρολογικής μελέτης μιας λεκάνης απορροής. Οι Montgomery and Dietrich (1989) τόνισαν τη σπουδαιότητα του εντοπισμού των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου. Οι κεφαλές αποτελούν τα κρίσιμα εκείνα σημεία, τα οποία ελέγχουν την πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, τη μορφή του τοπίου (landscape) και ορίζουν την ανάντη έκταση που συμβάλλει, με το νερό που δέχεται, στη δημιουργία της επιφανειακής απορροής. Στο Σχήμα 4-1 παρουσιάζεται η χωρική σχέση μεταξύ της κεφαλής του υδρογραφικού δικτύου, που ουσιαστικά αποτελεί το πλέον ανάντη σημείο του υδρογραφικού δικτύου πρώτης τάξης μιας λεκάνης απορροής, και της ανάντη έκτασης (σκιασμένη επιφάνεια), της οποίας τα νερά που δέχεται συμβάλλουν στη δημιουργία της επιφανειακής απορροής. Με τον όρο ανάντη έκταση, νοείται η κρίσιμη έκταση που επιλέγεται για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου, και ορίζεται ως η συνολική ανάντη έκταση που συμβάλλει, με το νερό της, στην κεφαλή του υδρογραφικού δικτύου.



Σχήμα 4-1: Η κεφαλή του υδρογραφικού δικτύου (πηγή: Montgomery and Dietrich, 1989).

Επίσης, έχουν προταθεί πολλοί αλγόριθμοι για τη εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου και τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της ακρίβειας της διαδικασίας εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου. Εντοπίζονται πολλές αναφορές σε αλγόριθμους, οι οποίοι βασίζονται στην αναγνώριση των μορφολογικών στοιχείων του εδάφους, όπως π.χ. στην αναγνώριση των κοιλάδων των ποταμών και των μισγαγγειών από τα τοπογραφικά και γεωμορφολογικά

χαρακτηριστικά του εδάφους (Yoeli, 1984· Band, 1986· Tribe, 1992· Passalacqua et al., 2010· Rulli, 2010· Matsuura and Aniya, 2012· Pelletier, 2013). Μια άλλη προσέγγιση αποτελούν οι αλγόριθμοι που βασίζονται στην προσομοίωση των διαδρομών που ακολουθεί το νερό και στις οποίες εμφανίζεται επιφανειακή απορροή, σύμφωνα με την οποία επιλέγεται από κάθε κύτταρο μια ή περισσότερες διευθύνσεις ροής προς το κατάντη κύτταρο ή τα κατάντη κύτταρα αντίστοιχα. Οι διαδρομές του νερού υπολογίζονται με βάση συγκεκριμένους αλγορίθμους υπολογισμού της διεύθυνσης ροής των κελιών ενός ΨΜΕ (O'Callaghan and Mark, 1984· Jenson and Domingue, 1988· Tarboton, 1997· Martz and Garbrecht, 1999· Turcotte et al., 2001· Nobre et al., 2011). Η προσέγγιση στην οποία χρησιμοποιούνται μέθοδοι υπολογισμού της διεύθυνσης ροής έχει υιοθετηθεί ευρέως σε πακέτα λογισμικών GIS (Moore et al., 1992· Yang et al., 2005· Metz et al., 2011).

Εκτός από την επιλογή του κατάλληλου αλγόριθμου, είναι αναγκαία και η επιλογή της κατάλληλης παραμέτρου που θα χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο στη διαδικασία της εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου. Οι παράμετροι οι οποίες χρησιμοποιούνται ως κριτήρια για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου ποικίλουν και μπορεί να αφορούν, για παράδειγμα, την ανάντη έκταση, το γινόμενο της έκτασης επί την κλίση του εδάφους, ή άλλες παραμέτρους όπως η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου και οι (γεωμορφολογικές ή υδρολογικές) τοπικές συνθήκες στην περιοχή αναζήτησης κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου. Το κριτήριο που επιλέγεται κάθε φορά, χρησιμοποιείται για τη διάκριση των κελιών που αποτελούν το υδρογραφικό δίκτυο από τα υπόλοιπα κελιά της λεκάνης απορροής ενός ΨΜΕ. Συνολικά, από την πληθώρα των αλγορίθμων οι οποίοι εντοπίζουν το υδρογραφικό δίκτυο στηριζόμενοι σε διαφορετικά θεωρητικά υπόβαθρα και χρησιμοποιώντας αρχικά δεδομένα από ΨΜΕ σε συνδυασμό με τα επιλεγμένα κάθε φορά κριτήρια, αξίζει να αναφερθεί ότι κατά τους Soille et al. (2003), αυτοί χωρίζονται σε δύο γενικότερες κατηγορίες. Σύμφωνα με τους Soille et al. (2003), οι αλγόριθμοι στηρίζονται είτε στα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, είτε στα υδρολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Το θέμα, επομένως, της επιλογής του κριτηρίου στο οποίο θα στηριχθεί η δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου, αλλά και ο ορισμός του ορίου, από το οποίο θα πρέπει να διακριθεί κάποιο κελί ως υδρογραφικό δίκτυο, απασχόλει τους υδρολόγους.

Τα τελευταία χρόνια, ως βασικό τοπογραφικό υπόβαθρο χρησιμοποιούνται τα ΨΜΕ, από τα οποία αντλείται η απαραίτητη πληροφορία και επομένως κρίθηκε απαραίτητο να γίνει μια σύντομη περιγραφή του τρόπου με τον οποίο είναι αποθηκευμένη η τοπογραφική πληροφορία στα ΨΜΕ, ενώ, παράλληλα, γίνεται σύντομη περιγραφή των βασικών διαδικασιών που απαιτούνται για την προετοιμασία ενός ΨΜΕ, ώστε αυτό να είναι υδρολογικά κατάλληλο για να γίνει εφαρμογή των επιλεγμένων κριτηρίων. Η προετοιμασία αυτή παράγει, ως τελικό προϊόν, ένα υδρολογικά ορθό ΨΜΕ, το οποίο χρησιμοποιείται για την εφαρμογή των κριτηρίων και την τελική εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου.

Βασικός σκοπός του Κεφαλαίου είναι ο ορισμός και η ανάλυση της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης (ΑΣΕ), ως του κρίσιμου εκείνου κριτηρίου για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από ΨΜΕ. Επομένως, αρχικά γίνεται αναφορά στο ΨΜΕ και στον τρόπο με τον οποίο αυτό συμβάλλει στον εντοπισμό του υδρογραφικού δικτύου, καθώς αποτελεί τη βασική πηγή τοπογραφικής και, κυρίως, υψομετρικής πληροφορίας. Στη συνέχεια, ακολουθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση και αναλύονται τα κριτήρια τα οποία χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό των κελιών ενός ΨΜΕ σε κελιά τα οποία θεωρούνται υδρογραφικό δίκτυο, και στα υπόλοιπα κελιά της λεκάνης απορροής. Ακολουθεί περιγραφή της προταθείσας μεθόδου για την εκτίμηση της ΑΣΕ και περιγράφονται οι λόγοι για τους οποίους προτείνεται και η συνεισφορά της μεθόδου στην αντιμετώπιση ενός κρίσιμου υδρολογικού θέματος. Το

Κεφάλαιο ολοκληρώνεται με περιγραφή της μεθόδου της Ανάλυσης Παλινδρόμησης, η οποία χρησιμοποιήθηκε με στόχο τη διερεύνηση της συσχέτισης της ΑΣΕ και ορισμένων μορφομετρικών χαρακτηριστικών του εδάφους. Επιλέγεται η περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε, κατά την Ανάλυση Παλινδρόμησης, να γίνει στο Κεφάλαιο 5, για λόγους συνεκτικότητας της παρουσίασης της μεθοδολογίας, ενώ τα αριθμητικά αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου σε λεκάνες της ελληνικής επικράτειας παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7 (Μέρος II της διατριβής).

4.1 Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους ως αναγκαίο τοπογραφικό υπόβαθρο

Λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας και της ευρείας διάθεσης των ΨΜΕ, πολλές υδρολογικές διαδικασίες, οι οποίες στο παρελθόν χρησιμοποιούσαν τοπογραφικούς χάρτες ως υπόβαθρο, εκτελούνται σήμερα με ημιαυτόματο τρόπο και μέσω της χρήσης ενός GIS, όπως, π.χ., η εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου και ο προσδιορισμός του υδροκρίτη της λεκάνης απορροής. Παρότι τα ΨΜΕ εμφανίστηκαν ήδη από τη δεκαετία του 1950 (Miller and Laflamme, 1958), η ανάπτυξη της επιστήμης της πληροφορικής, καθώς και η ανάπτυξη μεθόδων ανάλυσης γεωγραφικών πληροφοριών, αναβάθμισε το ρόλο τους και τα κατέστησε ιδιαίτερα χρήσιμα. Έτσι, αυτά θεωρούνται απαραίτητο στοιχείο σε εφαρμογές πολλών επιστημονικών πεδίων οι οποίες απαιτούν χωρική ανάλυση δεδομένων.

Είναι γνωστό ότι ο προσδιορισμός του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής ο οποίος βασίζεται σε δεδομένα ΨΜΕ είναι πρωταρχικής γεωμορφολογικής και υδρολογικής σημασίας (Montgomery and Dietrich, 1989· Montgomery και Fournelle-Georgiou, 1993· Parageorgaki and Nalbantis, 2018). Για παράδειγμα, το ανάπτυγμα του υδρογραφικού δικτύου επηρεάζει άμεσα την απόκριση μιας λεκάνης απορροής, όπως αυτή προσομοιώνεται υδρολογικά εντός των μοντέλων, επειδή το ανάπτυγμα καθορίζει τα μήκη διαδρομής επί πλαγιάς και τα μήκη διαδρομής εντός του υδρογραφικού δικτύου, καθορίζοντας έτσι και τις λειτουργίες υδρολογικής απόκρισης (hydrologic response functions) μιας λεκάνης απορροής στη βροχόπτωση (Gupta et al., 1980).

Το ΨΜΕ μιας περιοχής μελέτης αποτελεί το εναρκτήριο απαραίτητο δεδομένο για την προσέγγιση ζητημάτων που σχετίζονται με την τοπογραφία και επιτρέπει την ανάλυση, επεξεργασία και παρουσίαση χωρικών πληροφοριών που σχετίζονται με το φυσικό περιβάλλον. Στις υδρολογικές εφαρμογές, ως τοπογραφικό υπόβαθρο χρησιμοποιείται συνήθως ένα ΨΜΕ το οποίο αποτελεί το αρχικό δεδομένο σύμφωνα με το οποίο υπολογίζονται όλα τα απαραίτητα τοπογραφικά, χωρικά και μορφομετρικά στοιχεία. Το ΨΜΕ είναι ουσιαστικά μια ψηφιακή αναπαράσταση τμήματος της φυσικής γήινης επιφάνειας και ορίζεται ως το σύνολο των σημείων σε ένα τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς (X, Y, Z), το οποίο περιγράφει με ακρίβεια την πραγματική επιφάνεια του εδάφους (Kraus, 2003· Kraus, 2007), ενώ αντίστοιχος είναι ο ορισμός που δίνουν οι υδρολόγοι O'Callaghan and Mark (1984) λέγοντας ότι το ΨΜΕ αποτελεί την αριθμητική ή ψηφιακή αναπαράσταση των υψομέτρων του εδάφους ενός τμήματος της γήινης επιφάνειας.

Οι τρόποι με τους οποίους συλλέγεται η τοπογραφική πληροφορία μπορεί να είναι πολλοί. Άμεσος τρόπος συλλογής δεδομένων για τη δημιουργία ενός ΨΜΕ θεωρείται η απευθείας συλλογή τοπογραφικών δεδομένων υψομέτρου της γήινης επιφάνειας, π.χ., από μετρήσεις πεδίου. Ο παραπάνω τρόπος δεν επιλέγεται συχνά λόγω της μεγάλης προσπάθειας που πρέπει να καταβληθεί για την κάλυψη μιας περιοχής μελέτης και του ασύμφου του χρόνου. Από την άλλη, προτιμώνται τηλεσκοπικές μέθοδοι συλλογής δεδομένων, η επεξεργασία των οποίων

οδηγεί στη δημιουργία ενός ΨΜΕ, όπως, π.χ., μέσω της φωτογραμμετρικής ανάλυσης αεροφωτογραφιών σε στερεοζεύγη, ή μέσω της ανάλυσης δεδομένων δορυφορικών αποστολών (π.χ. Synthetic Aperture Radar, SAR, ή Light Detection And Ranging, LiDAR).

Αναλυτικότερα, το ΨΜΕ αποτελεί ένα μέσο αναπαράστασης του γήινου αναγλύφου στο οποίο η πληροφορία του αναγλύφου αποθηκεύεται σε δομές χωρικών δεδομένων. Η πιο συνηθισμένη δομή αποθήκευσης χωρικής πληροφορίας είναι η μορφή ενός συνεχούς κανονικοποιημένου κανάβου (raster structure). Αν και η πλέον συχνά χρησιμοποιούμενη δομή ενός ΨΜΕ είναι ο κανονικοποιημένος κανάβος (grid), σε κάθε τετραγωνικό φατνίο (cell) του οποίου αποθηκεύεται η αντίστοιχη τιμή του υψομέτρου εδάφους, γνωστή είναι η δομή ενός δικτύου ακανόνιστων τριγώνων (Triangular Irregular Network, TIN).

Να σημειωθεί εδώ ότι η δομή στην οποία αποθηκεύεται η υψομετρική πληροφορία δεν παρέχει πληροφορία για το είδος της αρχικής πληροφορίας που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία της δομής και, επομένως, πρέπει να δίνεται προσοχή στην ποιότητα, την ακρίβεια και την αξιοπιστία των αρχικών δεδομένων. Η ακρίβεια ενός ΨΜΕ εξαρτάται από την ποιότητα, την πυκνότητα και την κατανομή των αρχικών δεδομένων, τη χωρική διακύμανση των δεδομένων, το μοντέλο παρεμβολής και τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται, και την ανάλυση του μεγέθους του φατνίου (κελιού, αφορά τα ΨΜΕ με δομή κανάβου) (Τσούλος, 2004· Τσούλος κ.α. 2016α, 2016β). Παλαιότερα, στις υδρολογικές εφαρμογές, για παράδειγμα, χρησιμοποιούνταν ΨΜΕ σε δομή raster, τα οποία είχαν δημιουργηθεί από την επεξεργασία χωρικών δεδομένων τοπογραφικών χαρτών, π.χ., υψομετρικών σημείων, και ισοϋψών καμπυλών, τα γνωστά contour-based ΨΜΕ.

Στην περίπτωση της δομής του κανονικοποιημένου κανάβου, τα υψόμετρα εδάφους αποδίδονται στα κέντρα των κελιών του κανάβου και είναι αποθηκευμένα υπό μορφή πίνακα στον οποίον η τιμή του κέντρου κάθε κελιού αντιστοιχεί στο υψόμετρο της επιφάνειας του εδάφους, και η θέση του κελιού στον πίνακα αντιστοιχεί στη γεωγραφική θέση του κελιού στο χώρο. Στην περίπτωση χρήσης ΨΜΕ με δομή δικτύου ακανόνιστων τριγώνων (TIN), το μοντέλο των ακανόνιστων τριγώνων αναπαριστά το ανάγλυφο του εδάφους με ένα σύνολο ακανόνιστων επίπεδων επιφανειών των οποίων οι τρεις κορυφές που τις ορίζουν ταυτίζονται με τις θέσεις των σημείων των αρχικών δεδομένων που εμπεριέχουν πρωτογενή υψομετρική πληροφορία. Η υψομετρική πληροφορία κατανέμεται στα σημεία, τα οποία δεν παρουσιάζουν ομοιόμορφη κατανομή στο χώρο και, δεδομένου ότι η κατανομή των σημείων του TIN στο χώρο δεν είναι κανονική, το μοντέλο TIN ενδέχεται να έχει υψηλότερη πυκνότητα σε περιοχές όπου το ανάγλυφο του εδάφους μεταβάλλεται έντονα και, άρα, τα πρωτογενή δεδομένα είναι πιο λεπτομερή, και χαμηλότερη πυκνότητα σε περιοχές όπου τα αρχικά δεδομένα είναι αραιά.

Η χρήση των TINs, στην Υδρολογία συνοδεύεται από πλεονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι ότι το υδρογραφικό δίκτυο αναπαρίσταται άμεσα από τα επίπεδα που σχηματίζονται στο ακανόνιστο δίκτυο των τριγώνων και άρα φέρει την ακρίβεια των πρωτογενών δεδομένων. Για το λόγο αυτό, κατά τα μέσα της δεκαετίας του 1980 αναπτύχθηκαν τεχνικές για την υδρολογική επεξεργασία των TINs (Palacios-Velez and Cuevas-Renaud, 1986). Από την άλλη, το υδρογραφικό δίκτυο στην περίπτωση των raster ΨΜΕ δεν αναπαρίσταται άμεσα από τα κελιά του ΨΜΕ και άρα, για να εξαχθεί, είναι απαραίτητες διαδικασίες παρεμβολής, οι οποίες προσθέτουν, στο τελικό εξαχθέν δίκτυο, επιπλέον σφάλματα παρεμβολής. Τα contour-based ΨΜΕ τα οποία έχουν προκύψει από την ανάλυση ισοϋψών καμπυλών, έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε υδρολογικές εφαρμογές (Moore et al., 1988b), καθώς αυτά παρουσιάζουν πλεονέκτημα ως προς το διαχωρισμό της λεκάνης απορροής σε διαφορετικών υψομέτρων

εκτάσεις - φυσικές μονάδες – οι οποίες σχετίζονται με την ροή του νερού στην επιφάνεια του εδάφους.

Ένα ΨΜΕ έχοντας αποθηκευμένες τις τιμές του υψομέτρου εδάφους, επιτρέπει τον άμεσο και εύκολο υπολογισμό πληθώρας άλλων χρήσιμων παραμέτρων όπως η κλίση του εδάφους, χρήσιμες αποστάσεις, ο δείκτης HAND, ο προσανατολισμός (aspect), οι κλίσεις διεύθυνσης ροής και συγκεντρωτικής ροής, το υδρογραφικό δίκτυο, η λεκάνη απορροής, η καμπυλότητα (curvature), ο τοπογραφικός δείκτης (topographic index) κ.ά. Η τοπογραφική γήινη επιφάνεια, όπως αυτή αναπαρίσταται μέσω ενός ΨΜΕ, δεν εντάσσεται στις 3D (τριδιάστατες) γεω-επιφάνειες, αλλά θεωρείται 2.5D επιφάνεια ή single-valued επιφάνεια, γιατί σε κάθε ζεύγος συντεταγμένων (X, Y) αντιστοιχεί μόνο μια τιμή της παραμέτρου της τρίτης διάστασης (Z), π.χ. του υψομέτρου και όχι περισσότερες, όπως ισχύει στις 3D επιφάνειες. Το γεγονός αυτό καθιστά πιο εύκολη την χρήση και την μοντελοποίηση των ΨΜΕ σε αντίθεση με τις 3D ή multi-valued επιφάνειες, όπως π.χ. μια 3D επιφάνεια που αποτελεί το όριο ενός ακανόνιστου στερεού κοιτάσματος ορυκτού.

Η διαθεσιμότητα των ΨΜΕ και το γεγονός ότι, σήμερα, αυτά καλύπτουν το σύνολο της γήινης επιφάνειας του πλανήτη, σε συνδυασμό με τη χρήση των GIS, τα οποία επιτρέπουν την χωρική ανάλυση των δεδομένων αλλά και την επεξεργασία των περιγραφικών χαρακτηριστικών τους, επιτρέπει τη γρήγορη και με ακρίβεια επεξεργασία των ΨΜΕ για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου των λεκανών απορροής, απαλλάσσοντας τον μελετητή από χρονοβόρες παλαιότερες διαδικασίες όπως, π.χ., η ψηφιοποίηση πληροφοριών και δεδομένων τα οποία απεικονίζονται σε τοπογραφικούς χάρτες. Η εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου είναι συνήθως υδρολογική διαδικασία και η μεθοδολογία η οποία επιλέγεται να ακολουθηθεί, εφαρμόζεται στα αρχικά δεδομένα ή στο υδρολογικά ορθό ΨΜΕ.

Μιας και τελικός στόχος της επεξεργασίας των τοπογραφικών δεδομένων είναι η απόκτηση του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής, παρακάτω αναλύονται οι διαφορετικές μεθοδολογίες που μπορούν να ακολουθηθούν για την επίτευξη του στόχου αυτού, ανάλογα με την προέλευση των αρχικών δεδομένων. Συχνά, η μεθοδολογία εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από τα αρχικά δεδομένα που είναι διαθέσιμα. Επομένως, παρουσιάζονται, εν συντομία, οι συνδυασμοί των αρχικών δεδομένων και της μεθοδολογίας η οποία εφαρμόζεται για την εξαγωγή της δομής του υδρογραφικού δικτύου. Αν υπάρχουν αναλογικοί ή ψηφιακοί τοπογραφικοί χάρτες, το υδρογραφικό δίκτυο ψηφιοποιείται πάνω στους χάρτες, επομένως το σύνολο των ψηφιοποιημένων κλάδων δημιουργούν ένα δίκτυο. Αν υπάρχουν δορυφορικές εικόνες, συνήθως, ψηφιοποιείται ο βασικός άξονας του υδρογραφικού δικτύου και αν είναι ορατές και οι όχθες εκατέρωθεν του άξονα αποδίδονται με όμοιο τρόπο και εκείνες. Επομένως, το υδρογραφικό δίκτυο αποδίδεται είτε ως ένα γραμμικό στοιχείο, σύμφωνα με τον άξονά του, είτε ως επιφανειακό στοιχείο, του οποίου το όριο περιγράφεται από τις ψηφιοποιημένες όχθες. Στην προηγούμενη περίπτωση, η παραδοχή που εφαρμόζεται αφορά το αν λαμβάνεται υπόψη ή όχι το πλάτος της κοίτης των κλάδων από όχθη σε όχθη. Στην περίπτωση των δορυφορικών εικόνων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες τεχνικές, με τις οποίες οι περιοχές οι οποίες καλύπτονται από νερό απομονώνονται με χρήση φίλτρων και, επομένως, το υδρογραφικό δίκτυο εξάγεται σε δεύτερη φάση. Επίσης, αν υπάρχουν αεροφωτογραφίες που καλύπτουν την περιοχή μελέτης, μετά από κατάλληλη φωτογραμμετρική επεξεργασία, μπορεί να ψηφιοποιηθεί ο άξονας ή οι όχθες του υδρογραφικού δικτύου. Επίσης, το υδρογραφικό δίκτυο διανέμεται δωρεάν σε διανυσματική μορφή μέσα από ελεύθερα δεδομένα που έχουν προκύψει είτε από τεχνικές crowd sourcing είτε από επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή, το υδρογραφικό δίκτυο προκύπτει απευθείας ως γραμμικό στοιχείο. Κλείνοντας, αναφέρεται η περίπτωση εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου με ημιαυτόματες

διαδικασίες από δεδομένα ΨΜΕ και η παράλληλη χρήση ενός συστήματος GIS στο οποίο λαμβάνει χώρα η επεξεργασία του ΨΜΕ.

Συνοπτικά, να αναφερθεί εδώ, ότι, για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου, είναι αναγκαία η παραγωγή ενός υδρολογικά ορθού ΨΜΕ, στο οποίο το σύνολο των κελιών της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής απορρέει στην έξοδο της λεκάνης. Όσον αφορά στη δημιουργία ενός υδρολογικά ορθού ΨΜΕ, για τις υδρολογικές μελέτες στις οποίες χρησιμοποιούνται ΨΜΕ, είναι απαραίτητος ο έλεγχος και η διόρθωση των βυθισμάτων και των επίπεδων περιοχών στις οποίες γίνεται αποθήκευση νερού. Ως βύθισμα χαρακτηρίζεται ένα ή περισσότερα κελιά, τα οποία έχουν σημαντικό μικρότερο υψόμετρο σε σχέση με τα γειτονικά κύτταρα, που προφανώς έχουν μεγαλύτερο υψόμετρο. Αποτέλεσμα της ύπαρξης βυθισμάτων σε ένα ΨΜΕ είναι το γεγονός ότι δεν μπορεί να υπολογιστεί η διεύθυνση ροής των κελιών τα οποία ανήκουν σε βυθίσματα και των γειτονικών σε αυτά κελιών. Κατά τη δημιουργία του ΨΜΕ από τα αρχικά δεδομένα, ενδέχεται να προκύψουν ψευδή βυθίσματα στην αναπαράσταση του αναγλύφου στο ΨΜΕ, λόγω σφαλμάτων των αρχικών δεδομένων. Τα βυθίσματα αυτά πρέπει να διορθωθούν ώστε να μην συμβάλλουν στην αποκοπή τμημάτων της λεκάνης απορροής από το σύνολο αυτής, ούτε να συγκρατούν ποσότητες νερού. Ο αριθμός των κελιών που χαρακτηρίζονται ως βυθίσματα συνήθως αυξάνεται σε ΨΜΕ χαμηλής ανάλυσης και στην περίπτωση στην οποία η καταγραφή του υψόμετρου των κελιών γίνεται με ακέραιους αριθμούς.

Λόγω των σφαλμάτων τα οποία εμφανίζονται στα ΨΜΕ, η ανάλυση που γίνεται εντός GIS για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου απαιτεί διόρθωση των κελιών που αναπαριστούν κοιλότητες και βυθίσματα, τον υπολογισμό του κανάβου διεύθυνσης ροής (flow direction), τον υπολογισμό του κανάβου συγκεντρωτικής ροής (flow accumulation) και, τέλος, την επιλογή ενός κατωφλίου έκτασης πάνω από το οποίο θεωρείται ότι σχηματίζεται επιφανειακή απορροή.

Επομένως, είναι αναγκαίες οι δύο ενδιάμεσες διαδικασίες υπολογισμού του κανάβου διεύθυνσης ροής και του κανάβου συγκεντρωτικής ροής. Τελικά, ο κανάβος συγκεντρωτικής ροής θα χρησιμοποιηθεί για να προκύψει το τελικό υδρογραφικό δίκτυο. Σε αυτό, συνήθως, εφαρμόζεται ένα κριτήριο έκτασης, ως κατώφλι για τον εντοπισμό των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου. Η επιλογή του κατωφλίου είναι κρίσιμη (Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993), καθώς, από κάποια τιμή και πάνω, το κατώφλι προκαλεί διαφορά στην ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου. Συνεπώς, μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές του κατωφλίου παράγουν μεγαλύτερης ή μικρότερης ιεράρχησης υδρογραφικό δίκτυο αντίστοιχα. Για τον λόγο αυτό, γίνεται κατανοητό ότι η επιλογή συγκεκριμένης τιμής κατωφλίου για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου είναι βαρύνουσα σημασίας διαδικασία.

Το κατώφλι επιλέγεται συνήθως να αφορά την ανάντη έκταση και ορίζεται ως το πλήθος των κελιών του ΨΜΕ, το οποίο κρίνει ποια κελιά από το σύνολο των κελιών της λεκάνης (του ΨΜΕ) θα χαρακτηριστούν ή θα αντιπροσωπεύουν τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου (Li and Wong, 2010) και ποια θα αντιπροσωπεύουν το υπόλοιπο της λεκάνης απορροής. Το κατώφλι επιφανείας, που ουσιαστικά αποτελεί μια τιμή του κανάβου της συγκεντρωτικής ροής της λεκάνης, είναι γνωστό ότι επηρεάζεται από την πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου και το μέγεθος της λεκάνης απορροής (Tarboton et al., 1992). Συνήθως, η επιλογή μια αυθαίρετης σταθερής στο χρόνο και στο χώρο τιμής του κανάβου της συγκεντρωτικής ροής είναι αυτή η οποία συμβάλλει στο σχηματισμό του υδρογραφικού δικτύου.

Για την εκτίμηση του αναπτύγματος του υδρογραφικού δικτύου, στη βιβλιογραφία συναντώνται πολλά και διαφορετικής σκοπιάς κριτήρια Παρακάτω, γίνεται προσπάθεια αυτά να κατηγοριοποιηθούν σε γενικότερες κατηγορίες και να αναλυθούν. Οι κατηγορίες των κριτηρίων αφορούν: την ελάχιστη συμβάλλουσα έκταση (minimum drainage area), η οποία

εκφράζεται τόσο χωρικά όσο και χρονικά μέσω ενός σταθερού κατωφλίου ανάντη έκτασης, ένα κατώφλι ορισμένο επί της τοπικής κλίσης του εδάφους, ένα κατώφλι ορισμένο επί του γινομένου της ανάντη έκτασης και της τοπικής κλίσης και την πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου. Οι Smith et al. (1990) παρουσιάζουν μια ποικιλία μαθηματικών διαδικασιών για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από ΨΜΕ, οι οποίες είναι αποτελεσματικές όταν το υδρογραφικό δίκτυο είναι καλά καθορισμένο από τις τοπικές ιδιότητες της επιφάνειας του εδάφους, και, επομένως όταν αυτές απεικονίζονται (αντιπροσωπεύονται ικανοποιητικά) στο ΨΜΕ.

Η πιο απλή μέθοδος για εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου που προτείνεται βιβλιογραφικά είναι η εφαρμογή μιας σταθερής τιμής του ορίου της έκτασης (κατωφλίου ή threshold) των O'Callaghan και Mark (1984). Ωστόσο, σημαντική σε αυτή την προσέγγιση είναι η κατανόηση ότι η τιμή του ορίου διαφοροποιείται ανάλογα με την κλίμακα ή, πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με την έκταση της λεκάνης απορροής (Hopp and McDonnell, 2009· Michaelides and Chappell, 2009· Zehe and Sivapalan, 2009· Sivapalan, 2009).

Επιπλέον, όπως είναι γνωστό, οι περισσότερες λεκάνες απορροής παγκοσμίως είναι μη μετρούμενες ή με ελλιπείς (μη συνεχείς) μετρήσεις απορροής. Συνεπώς, οι λεκάνες αυτές καθιστούν εξαιρετικά αβέβαιη την πρόβλεψη της απορροής τους. Γίνεται, επομένως, κατανοητό ότι δεν υπάρχουν καταγεγραμμένα στοιχεία ως προς την υδρολογική τους συμπεριφορά και η μόνη διαθέσιμη πληροφορία που μπορεί να ληφθεί είναι τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά από τα διαθέσιμα ΨΜΕ. Η Διεθνής Ένωση Υδρολογικών Επιστημών (IAHS) πρότεινε τη χρήση ενός γενικευμένου συστήματος υδρολογικής πρόβλεψης που θα αναπαριστά τις διεργασίες που συμβαίνουν στις μονάδες τοπίου (landscape), ενώ ταυτόχρονα θα μπορούν να δεχτούν μετεωρολογικά δεδομένα εισόδου που εκκινούν τη διαδικασία απόκρισης της λεκάνης (Sivapalan et al., 2003). Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και, επιπλέον, το πόσο κρίσιμο είναι το υδρογραφικό δίκτυο για την προσομοίωση της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης απορροής, γίνεται κατανοητό ότι η ακριβής εκτίμηση των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου είναι σημαντική για την ακριβή πρόβλεψη της απορροής. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι θέσεις των κεφαλών αποτελούν κρίσιμη πληροφορία για την υδρολογική προσομοίωση και την μετέπειτα πρόβλεψη, παραμένει το πρόβλημα ότι στα υδρολογικά μοντέλα, το υδρογραφικό δίκτυο δεν αναπαρίσταται με αξιοπιστία, καθώς, δεν εκτείνεται χωρικά τόσο όσο στην πραγματικότητα.

Στην περίπτωση της χρήσης μιας τιμής κατωφλίου επιφάνειας, ως εκείνου του ορίου έκτασης το οποίο θα κρίνει την τελική εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου, είναι γνωστό ότι το μήκος του υδρογραφικού δικτύου είναι αντιστρόφως ανάλογο της τιμής του κατωφλίου. Το κατώφλι αντιπροσωπεύει το όριο επιφάνειας πάνω από το οποίο θεωρείται ότι σχηματίζεται απορροή, και, άρα, είναι προφανές ότι τα χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου επηρεάζονται από τη χρήση του κατωφλίου.

Οι O'Callaghan και Mark, το 1984, πρότειναν τον τρόπο με τον οποίο επιλέγονται τα κελιά που αποτελούν το υδρογραφικό δίκτυο από ένα ΨΜΕ. Σύμφωνα με τους ίδιους, τα κελιά που αποτελούν το υδρογραφικό δίκτυο είναι όλα εκείνα τα κελιά της λεκάνης απορροής, τα οποία έχουν μεγαλύτερη τιμή συγκεντρωτικής ροής από κάποιο σταθερά καθορισμένο κατώφλι. Κατά συνέπεια ο κানাβος διεύθυνσης ροής και ο κানাβος συγκεντρωτικής ροής της λεκάνης πρέπει οπωσδήποτε να υπολογιστούν. Ο κানাβος διεύθυνσης ροής αποτελεί έναν κানাβο διευθύνσεων ή ένα σύνολο από μονοπάτια/ διαδρομές, τα οποία δείχνουν τη διεύθυνση προς την οποία το νερό ρέει από ένα ανάντη κελί προς τα επόμενα κατάντη γειτονικά κελιά κάθε φορά π.χ. κατά τη μέγιστη κλίση. Ο καναβος συγκεντρωτικής ροής αποτελεί έναν καναβο στον

οποίο, για κάθε κελί του ΨΜΕ, αποθηκεύεται μια τιμή η οποία περιγράφει το πλήθος των ανάντη κελιών που συμβάλλουν, με το νερό τους, στο συγκεκριμένο κελί. Ο κánaβος συγκεντρωτικής ροής υπολογίζεται από τον κánaβο διεύθυνσης ροής σε συνδυασμό με έναν κánaβο βαρών ίδιων ακριβώς διαστάσεων με τους δύο προηγούμενους κánaβους. Αν το βάρος, για κάθε κελί, έχει επιλεχθεί να ισούται με τη μονάδα, τότε ο κánaβος της συγκεντρωτικής ροής αφορά το πλήθος των κελιών και, ουσιαστικά, αναπαριστά την ανάντη έκταση η οποία συμβάλλει σε ένα κελί, ως άθροισμα των ανάντη κελιών του ΨΜΕ.

Στο πλαίσιο της διατριβής, το κατώφλι που επιλέγεται για εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου, ορίζεται ως η συνολική ανάντη έκταση που συμβάλλει με το νερό της στην κεφαλή του υδρογραφικού δικτύου (σε ένα κελί), εκφρασμένη σε κελιά. Η συνολική ανάντη έκταση, που χρησιμοποιείται ως κατώφλι, εδώ θα αναφέρεται ως *Ανάντη Συμβάλλουσα Έκταση* (ΑΣΕ, και στην αγγλική γλώσσα *Critical Support Area, CSA*) και είναι η κρίσιμη ποσότητα που επιτρέπει την εξαγωγή, από ένα ΨΜΕ, χρήσιμων υδρολογικών πληροφοριών, όπως το υδρογραφικό δίκτυο (Parageorgaki and Nalbantis, 2017).

Πρακτικά, στις υδρολογικές εφαρμογές η τιμή της ΑΣΕ συχνά επιλέγεται με βάση την οπτική ομοιότητα και τον οπτικό έλεγχο μεταξύ του υδρογραφικού δικτύου που εξάγεται από το ΨΜΕ και των *μπλε γραμμών* που απεικονίζουν το υδρογραφικό δίκτυο στους τοπογραφικούς χάρτες, έτσι ώστε το παραχθέν υδρογραφικό δίκτυο από το ΨΜΕ να είναι παρόμοιο, ως προς το ανάπτυγμά του, με αυτό που συνηθίζεται να θεωρείται ως το υδρογραφικό δίκτυο αναφοράς, αυτό δηλαδή των τοπογραφικών χαρτών. Στους τοπογραφικούς χάρτες το υδρογραφικό δίκτυο κατηγοριοποιείται ανάλογα με τη ροή του, σε *μόνιμο* (perennial streams) και εποχιακό ή *εφήμερο* υδρογραφικό δίκτυο (intermittent tributaries). Κατ' επέκταση αυτού, έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικά είδη γραμμών, ως σύμβολα, για την αναπαράσταση των κλάδων. Συνήθως, οι μόνιμοι κλάδοι αποδίδονται με συνεχή μπλε γραμμή και οι εφήμεροι κλάδοι, γνωστοί και ως *ρέματα*, αποδίδονται με διακεκομμένη μπλε γραμμή. Επιπλέον, να σημειωθεί ότι, από υδρολογικής άποψης, στο μεσογειακό κλίμα ενδιαφέρουν περισσότερο οι μόνιμοι κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου. Για το λόγο αυτό, οι υδρομετρικοί σταθμοί μέτρησης της απορροής, κυρίως, έχουν εγκατασταθεί σε θέσεις επί του μόνιμου υδρογραφικού δικτύου, ώστε να μετράνε την απορροή των μόνιμων κλάδων των μεσαίας έκτασης λεκανών απορροής, ενώ τα περισσότερα από τα εφήμερα τμήματα των κλάδων παραμένουν χωρίς μετρημένες απορροές (μη μετρούμενα). Να σημειωθεί, στο σημείο αυτό, ότι στους χάρτες που χρησιμοποιούνται ως πληροφορία αναφοράς, στον ελλαδικό χώρο, τουλάχιστον, το ανάπτυγμα του υδρογραφικού δικτύου δεν αντιστοιχεί στο πραγματικό ανάπτυγμα (μήκος) του υδρογραφικού δικτύου, παρά το γεγονός ότι γίνεται διαχωρισμός των κλάδων σε κλάδους μόνιμης ροής και εφήμερους/εποχιακούς κλάδους.

Από νωρίς, οι υδρολογικές μελέτες που συναντώνται στη βιβλιογραφία, αναγνώρισαν ότι το μήκος και η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, δεν είναι στατικά μεγέθη (Blyth and Rodda, 1973· Gregory and Walling, 1968· Godsey and Kirchner, 2014· Jensen et al., 2017). Στην πραγματικότητα, ένα υδρογραφικό δίκτυο αποτελείται από μόνιμους κλάδους και εποχιακά, ή εφήμερα ρεύματα. Τα τελευταία επεκτείνονται και συρρικνώνονται εποχιακά, με ανάλογη ανταπόκριση στην εμφάνιση των βροχοπτώσεων. Οι εφήμεροι κλάδοι των ποταμών και τα εποχιακά ρέματα μπορεί να καταλαμβάνουν περισσότερο από το 50% του συνολικού μήκους των παγκόσμιων ποταμών (Datry et al., 2014). Στην περιοχή της Μεσογείου, και λόγω της γεωμορφολογίας, τα εφήμερα ρέματα είναι κυρίαρχα ως καθεστώς και είναι λιγότερο μελετημένα (Skoulikidis et al., 2016). Το γεγονός ότι το μήκος του υδρογραφικού δικτύου δεν είναι στατικό (Blyth and Rodda, 1973) προκαλεί μια δυναμική στην απόκριση της λεκάνης

απορροής, η οποία δρα διαδοχικά στη συνεισφορά της σε σχέση με άλλους παράγοντες (π.χ. βροχοπτώσεις).

Επίσης, η δυναμική φύση του υδρογραφικού δικτύου επηρεάζει την ταξινόμηση της λεκάνης απορροής και πιθανά μπορεί να κατατάξει τη λεκάνη απορροής σε διαφορετική κατηγορία, λόγω ενός εποχιακά συρρικνωμένου υδρογραφικού δικτύου, από αυτή που πιθανά θα εντασσόταν αν το υδρογραφικό δίκτυο ακολουθούσε την πλήρως εκτεταμένη χωρική κατανομή των τοπογραφικών χαρτών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι αβέβαιος και ο χαρακτηρισμός της απόκρισης της λεκάνης απορροής, λόγω διαφοροποίησης της κατάταξης. Το υδρογραφικό δίκτυο αποτελεί κρίσιμο στοιχείο στην ταξινόμηση των λεκανών απορροής σε ομάδες υδρολογικά όμοιων λεκανών και επηρεάζει τη μετέπειτα διαδικασία της μεταφοράς υδρολογικών πληροφοριών στο χώρο (Papageorgaki and Nalbantis, 2022). Στην ταξινόμηση των λεκανών απορροής, η δυναμική αυτή του υδρογραφικού δικτύου εξετάζεται έμμεσα μέσω της χρήσης των μορφομετρικών χαρακτηριστικών της λεκάνης που χρησιμοποιούνται επιπρόσθετα στις μετεωρολογικές μεταβλητές και συμβάλλουν στην ταξινόμηση. Με τη χρήση του όρου *έμμεσα*, εννοείται ότι η συσχέτιση μεταξύ των φυσικών μορφομετρικών χαρακτηριστικών του αναγλύφου, και των υδρολογικών διεργασιών που εκτελούνται εντός μιας λεκάνης απορροής, κρύβει μέσα της τη χωρική ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου, καθώς, μέσω των μορφομετρικών χαρακτηριστικών, η δομή του αναγλύφου αποδίδεται εμπεριέχοντας την κρυμμένη χωρική πληροφορία που αφορά το υδρογραφικό δίκτυο.

Στόχος, λοιπόν, της διατριβής είναι ο έλεγχος της συσχέτισης μεταξύ των φυσικών μορφομετρικών χαρακτηριστικών του αναγλύφου και των υδρολογικών διεργασιών που εκτελούνται εντός μιας λεκάνης απορροής και του τρόπου με τον οποίον συνδέονται οι κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου με τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά, καθώς και ο έλεγχος της δυνατότητας να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση αυτή τόσο σε ερευνητικό και μελετητικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο πρόγνωσης των υδρολογικών παραμέτρων σε εφαρμογές που σχετίζονται με την Υδρολογία.

Η διερεύνηση της επίδρασης της ΑΣΕ στο ανάπτυγμα του υδρογραφικού δικτύου και μετέπειτα σε υδρολογικούς δείκτες που σχετίζονται με την εκτίμηση της απορροής, μπορεί να αποτελέσει μια πολλά υποσχόμενη ερευνητική οδό προς την καλύτερη γνώση των υδρολογικών διεργασιών. Αν και ο κύριος στόχος είναι η πρόβλεψη της θέσης των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιώντας γεωμορφολογικές μεταβλητές, τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν άμεσα, καθώς η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί στην εξαγωγή ενός αξιόπιστου υδρογραφικού δικτύου, και επομένως στον υπολογισμό δεικτών που εξαρτώνται από τη χωρική κατανομή του υδρογραφικού δικτύου π.χ. ο δείκτης HAND, οι δείκτες μεταφοράς ιζημάτων κ.ά., στην καλύτερη εκτίμηση των παραμέτρων που αφορούν στην εκτίμηση των υδρογραφημάτων κ.ά. Η εφαρμογή της προταθείσας μεθοδολογίας εισάγει για πρώτη φορά την έννοια της χρονικής κλίμακας στον προσδιορισμό της ΑΣΕ (βλ. Υποκεφάλαιο 7.2), λαμβάνοντας υπόψιν ένα μη στατικό υδρογραφικό δίκτυο και, στη συνέχεια, ερευνάται η ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ της ΑΣΕ και των μορφομετρικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής (βλ. 5.3.3).

4.2 Κριτήρια για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου

Η ανάλυση της πληροφορίας των χωρικών δεδομένων μέσω της χρήσης GIS, για υδρολογικούς σκοπούς, είναι πλέον δεδομένη συνθήκη για τους υδρολόγους, δίνοντάς τους τη δυνατότητα της ανάλυσης της γεωμορφολογίας της λεκάνης απορροής και της μελέτης του υδρογραφικού δικτύου. Στην παράγραφο αυτή αναλύονται τα κριτήρια τα οποία επιλέγονται για την εξαγωγή

του υδρογραφικού δικτύου και συχνά αυτά βασίζονται στην γεωμορφολογία της λεκάνης απορροής.

Οι O'Callaghan and Mark (1984) και Mark (1988) βασίζονται στη σήμανση των εικονοστοιχείων που πρόκειται να χαρακτηριστούν ως υδρογραφικό δίκτυο, αρχικά σε ένα πρώτο χαμηλό επίπεδο ανάλυσης, χρησιμοποιώντας έναν τοπικό τελεστή, και στη συνέχεια πετυχαίνουν την τελική απομόνωση των εικονοστοιχείων σύμφωνα με τοπικά κριτήρια. Στις μέρες μας, η τεχνική των O'Callaghan and Mark (1984) χρησιμοποιείται ως ο πιο συνηθισμένος τρόπος εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου από ένα ΨΜΕ, κατά τον οποίο εφαρμόζεται μια πρώτη διαδικασία, η παραγωγή ενός υδρολογικά ορθού ΨΜΕ (βλ. παρ. 4.1), και, στη συνέχεια, το υδρογραφικό δίκτυο προκύπτει ως αποτέλεσμα εφαρμογής ενός κριτηρίου επί του υδρολογικά ορθού ΨΜΕ. Αναλυτικότερα, η διαδικασία που προτάθηκε περιγράφεται από τα εξής τρία βασικά βήματα: (1) τη διόρθωση των κοιλοτήτων και τον υπολογισμό του κανάβου διεύθυνσης ροής, (2) τον υπολογισμό του κανάβου συγκεντρωτικής ροής και (3) τον εντοπισμό των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου ως των κελιών εκείνων, η τιμή των οποίων υπερβαίνει την τιμή ενός κριτηρίου ελάχιστης συμβάλλουσας έκτασης (accumulated area). Το τρίτο βήμα της διαδικασίας που προτάθηκε, το οποίο είναι το πιο κρίσιμο από υδρολογικής άποψης, δηλαδή, η επιλογή και εφαρμογή ενός κριτηρίου, αναλύεται στην παράγραφο αυτή και παρουσιάζονται οι διαφορετικές προσεγγίσεις που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία. Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά την παράμετρο που επιλέγεται κάθε φορά ως κριτήριο με το οποίο κρίνεται ποιες περιοχές της λεκάνης απορροής χαρακτηρίζονται ως υδρογραφικό δίκτυο και ποιες όχι.

Να σημειωθεί ότι, αν και τέτοιες προσεγγίσεις όπως αυτή των O'Callaghan and Mark (1984) παράγουν μια ικανοποιητική προσέγγιση των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής, έχει διαπιστωθεί ότι δεν παρέχουν μια συνολικά εύλογη εκπροσώπηση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής, καθώς εμφανίζονται ασυνέχειες σε κλάδους, και συχνά κλάδοι ενώνονται λανθασμένα με άλλους κλάδους.

Γενικότερα, ο εντοπισμός των κελιών που χαρακτηρίζονται ως υδρογραφικό δίκτυο, υλοποιείται με εφαρμογή ενός κατωφλίου, βάσει του οποίου ένα κελί κρίνεται αν ανήκει στο υδρογραφικό δίκτυο ή στο υπόλοιπο τμήμα της λεκάνης απορροής. Σύμφωνα με την τιμή του κατωφλίου, το υδρογραφικό δίκτυο, άρα και η επιφανειακή απορροή εμφανίζεται όταν οι τιμές των κελιών για το κριτήριο που επιλέγεται υπερβαίνουν την τιμή του κατωφλίου. Σε ό,τι αφορά την κλίμακα μελέτης στην οποία εφαρμόζεται η παραπάνω συνθήκη, φαίνεται ότι η κατανόηση των διεργασιών μικρής κλίμακας (τοπικές διεργασίες) είναι επαρκής για την ποσοτικοποίηση των διεργασιών μεγάλης κλίμακας (κλίμακα λεκάνης απορροής), εφόσον μπορούν να προσδιοριστούν «ισοδύναμες» σχέσεις ή «αντιπροσωπευτικές» τιμές των παραμέτρων που εξαρτώνται από την κλίμακα (Troch et al., 2009). Αναπτύχθηκε, έτσι, η υδρολογική γνώση/άποψη σύμφωνα με την οποία τα κατώφλια τα οποία ενεργοποιούν την απόκριση των διεργασιών πλαγιάς (τοπική κλίμακα) ή/και τα κατώφλια τα οποία ενεργοποιούν την απόκριση των διεργασιών σε επίπεδο λεκάνης απορροής (κλίμακα λεκάνης απορροής) είναι η μαθηματική αντανάκλαση της ποσότητας του νερού που απαιτείται για τη εμφάνιση ενός συγκεκριμένου πλήθους εφήμερων κλάδων και επομένως και των αντίστοιχων διεργασιών για την εμφάνισή τους. Κάθε κλάδος χαρακτηρίζεται από μια διακριτή τιμή ενός κατωφλίου το οποίο ευθύνεται για την έναρξη συγκεκριμένων υδρολογικών διεργασιών και για τη συνέχεια του υδρογραφικού δικτύου σε όλη τη λεκάνη απορροής (Troch et al., 2009· Zehe and Sivapalan, 2009· McMillan, 2012· Ali et al., 2013). Η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο κατωφλίων τα οποία επιλέγονται στις δύο κλίμακες, είναι στενά συνδεδεμένη με την προβλεψιμότητα του συστήματος. Καθώς η εφαρμογή των κατωφλίων μεταφράζεται ως η κρίσιμη απόφαση του

πότε θα ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός γένεσης της επιφανειακής απορροής, ταυτόχρονα η ίδια απόφαση εισάγει αβεβαιότητα στις αρχικές συνθήκες που επικρατούν ως προς τη γένεση της απορροής, με αποτέλεσμα η αβεβαιότητα να οδηγεί, εν τέλει, σε σημαντικά σφάλματα πρόβλεψης (Hrachowitz et al., 2013). Το γεγονός αυτό οδηγεί στο ότι μικρές διαφορές της ποσότητας του διαθέσιμου νερού καθορίζουν πότε το σύστημα θα φτάσει σε κρίσιμο σημείο (tipping point), ή στο κατώφλι που ενεργοποιεί την απόκριση, στο οποίο συμβαίνει σχεδόν στιγμιαία η αλλαγή από ένα υδρολογικό καθεστώς σε άλλο (Zehe and Blöschl, 2004). Έτσι, όσο μικρότερη είναι η κλίμακα μελέτης, τόσο πιο κοντά σε συγκεκριμένο κατώφλι είναι το υδρολογικό σύστημα και, επομένως, τόσο πιο μικρή είναι η ικανότητα πρόβλεψης (Zehe et al., 2005).

Την επίδραση των κατωφλίων που χρησιμοποιούνται μελέτησαν οι Jencso et al. (2009), οι οποίοι έδειξαν ότι η σύνδεση μεταξύ της πλαγιάς, των παρόχθιων περιοχών και του υδατορεύματος μέσω του δικτύου που αναπτύσσεται μπορεί να είναι μια συνάρτηση της ανάντη έκτασης, και άρα, η επιλογή μεγαλύτερης τιμής ανάντη έκτασης προκαλεί συνεχή σύνδεση μεταξύ της διάταξης των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου, ενώ μια μικρότερη τιμή ανάντη έκτασης μπορεί να οδηγήσει σε ασυνέχειες μεταξύ των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου. Η παραπάνω προσέγγιση επιβεβαιώνεται μέσω και των αποτελεσμάτων της εργασίας των Western et al. (2001), οι οποίοι διαπίστωσαν ότι η σύνδεση αυτή μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια του έτους ως συνέπεια μεταβολής της υγρασίας του εδάφους λόγω εποχικότητας.

Από τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι, στην Υδρολογία, η κατανόηση των μηχανισμών γένεσης της απορροής, όπως περιεγράφηκαν στο Κεφάλαιο , και η κατανόηση του μηχανισμού με τον οποίο εμφανίζεται η επιφανειακή απορροή, μετά την εφαρμογή κατωφλίων, είναι πεδία στα οποία ο αυξανόμενος κατά τα τελευταία έτη αριθμός ερευνητικών εργασιών δείχνει την ανάγκη για επιπλέον και εις βάθος κατανόηση. Το δε υδρογραφικό δίκτυο, και πιο συγκεκριμένα, οι θέσεις των κεφαλών αυτού αποτελούν τα κρίσιμα σημεία εναλλαγής του υδρολογικού καθεστώτος, γεγονός που καταδεικνύει την ανάγκη ενδελεχούς μελέτης του αναπτύγματος του υδρογραφικού δικτύου σε κλίμακα λεκάνης απορροής. Στο πλαίσιο αυτό γίνεται προσπάθεια να εκτιμηθεί η κατάλληλη έκταση της ανάντη επιφάνειας στην οποία, εκτός από την χωρική κλίμακα που ήδη εμπεριέχει, να λαμβάνει υπόψη και την εποχικότητα των υδρολογικών φαινομένων. Να σημειωθεί ότι όσο η ανάντη επιφάνεια λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές, τόσο συρρικνώνεται το υδρογραφικό δίκτυο, επομένως, σύμφωνα με τη χωροχρονική μελέτη της ανάντη επιφάνειας. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, προτείνεται διαφορετική τιμή ανάντη επιφάνειας ανάλογα την εποχή του έτους (βλ. Υποκεφάλαιο 5.3). Μιας και η σημασία της εποχικότητας, στην Υδρολογία είναι σημαντική στη μοντελοποίηση των διεργασιών, και, συνήθως, λαμβάνεται υπόψιν αποκλειστικά μέσω των χρονοσειρών μετρούμενων μεγεθών (παροχής, βροχόπτωσης, θερμοκρασίας αέρα).

Όπως αναφέρθηκε, μπορούν να εφαρμοστούν πολλά, και διαφορετικής σκοπιάς, κριτήρια για την εκτίμηση του υδρογραφικού δικτύου και η επιλογή τους αποτελεί βαρύνουσα σημασίας υδρολογική απόφαση, καθώς εξυπηρετούν τις ανάγκες κάθε εφαρμογής. Να σημειωθεί ότι εφαρμόζονται διαφορετικά κριτήρια, ανάλογα με τη δομή του ΨΜΕ, καθώς ο τρόπος με τον οποίο είναι αποθηκευμένη η χωρική πληροφορία υδρολογικού χαρακτήρα αποτελεί παράγοντα ο οποίος επηρεάζει τις διαδικασίες. Για παράδειγμα, άλλες διαδικασίες ακολουθούνται για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από ΨΜΕ σε δομή TINs (Palacios-Velez and Cuevas-Renaud, 1986) και άλλες για ΨΜΕ σε μορφή κανάβου.

Επίσης συναντώνται σύγχρονες τεχνικές, σύμφωνα με τις οποίες το υδρογραφικό δίκτυο που ψηφιοποιείται πάνω στους τοπογραφικούς χάρτες αποτελεί το κριτήριο (ή τον χωρικό

περιορισμό) με το οποίο η επιφανειακή απορροή εξαναγκάζεται να «εμφανιστεί» μόνο στις θέσεις στις οποίες εμφανίζεται το υδρογραφικό δίκτυο των τοπογραφικών χαρτών (Wu et al., 2019). Σύμφωνα με αυτές τις τεχνικές, το ΨΜΕ που χρησιμοποιείται διορθώνεται κατάλληλα, έτσι ώστε να πληροίται η παραπάνω συνθήκη. Η μελέτη των παραπάνω κριτηρίων δεν εντάσσεται στο πλαίσιο των ερευνητικών ενδιαφερόντων της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Τα κριτήρια που απασχολούν και σύμφωνα με τα οποία αναζητείται το υδρογραφικό δίκτυο μιας λεκάνης απορροής, κατηγοριοποιούνται σε δύο βασικές ομάδες (Soille et al., 2003). Η κατηγοριοποίηση αυτή αναφέρεται στα χαρακτηριστικά είτε της λεκάνης απορροής, είτε του εδάφους. Επομένως, παρουσιάζεται διαχωρισμός των κριτηρίων σε αυτά που αφορούν στα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, και σε αυτά που αφορούν στα υδρολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

Εν συντομία, αναφέρεται ότι τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται ως κρίσιμο στοιχείο για τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου ομαδοποιούνται όπως περιγράφεται παρακάτω:

- Γεωμορφολογικά κριτήρια ορισμένα σύμφωνα με τις τοπικές συνθήκες, π.χ. της τοπικής κλίσης του εδάφους (Shen and Sheng, 2011), της τοπικής καμπυλότητας (Howard, 1994.) για τον εντοπισμό των μισγαγγειών ή την αναγνώριση των κοιλάδων των ποταμών, όπου παράλληλα εφαρμόζονται τεχνικές που βασίζονται στην αναγνώριση των κοιλάδων των ποταμών ή των κορυφογραμμών από τοπογραφικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά (Peucker and Douglas, 1975· Yoeli, 1984· Band, 1986· Tribe, 1992· Passalacqua et al., 2010· Rulli, 2010· Matsuura and Aniya, 2012· Pelletier, 2013· Tarboton and Ames, 2001)
- Υδρολογικά κριτήρια επιφάνειας, όπως η ελάχιστη συμβάλλουσα έκταση (minimum drainage area ή accumulated area threshold ή support area threshold) (O'Callaghan and Mark, 1984· Mark, 1988· Jenson and Domingue, 1988· Giannoni et al., 2005· Hancock and Evans, 2006· Tarolli and Fontana, 2009· Bai et al., 2015), σύμφωνα με τα οποία επιλέγεται ένα σταθερό κατώφλι ανάντη έκτασης ανεξάρτητο τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Στην κατηγορία αυτή κατατάσσεται επίσης η χρήση του γινομένου της κλίσης του εδάφους επί την ανάντη επιφάνεια (Tucker 2001· Lashermes et al., 2007) και η χρήση της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου (Tarboton et al., 1991· Tarboton and Ames, 2001).

4.2.1 Κριτήρια βασισμένα στα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης

Τα κριτήρια που είναι βασισμένα στη γεωμορφολογική δομή της λεκάνης απορροής χρησιμοποιούνται για να εντοπίσουν τις γεωμορφολογικές συνθήκες που είναι απαραίτητες για το σχηματισμό του υδρογραφικού δικτύου. Η αναζήτηση των περιοχών που πληρούν τις κατάλληλες γεωμορφολογικές συνθήκες για το σχηματισμό του υδρογραφικού δικτύου βασίζεται σε τεχνικές αναγνώρισης των σχηματισμών του αναγλύφου, με εκμετάλλευση της τοπογραφικής πληροφορίας που υπάρχει διαθέσιμη σε ένα ΨΜΕ. Η αναζήτηση έχει στόχο τον αυτόματο εντοπισμό των μισγαγγειών και των κορυφογραμμών από τα τοπογραφικά και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

Τα κελιά του ΨΜΕ που ανήκουν στο υδρογραφικό δίκτυο ορίζονται από τοπικές μορφολογικές συνθήκες όπως αυτές (Johnston and Rosenfeld, 1975· Peucker and Douglas, 1975· Toriwaki and Fukumara, 1978· Haralick, 1983· Band, 1986· Zhang et al., 1990· Smith et al., 1990). Οι τοπογραφικοί χάρτες παρέχουν πολύτιμη πληροφορία για την επιφάνεια του εδάφους, η οποία είναι απαραίτητη σε πολλές γεωεπιστήμες. Παράλληλα, η άνθιση των συστημάτων GIS

επιτρέπει την εύκολη επεξεργασία της αρχικής πληροφορίας και τον υπολογισμό άλλων παραμέτρων οι οποίες είναι χρήσιμες στην επιστήμη της Υδρολογίας. Τα ΨΜΕ αποτελούν ένα μέσο αποθήκευσης της πολύπλοκης αυτής πληροφορίας και γι' αυτό, η χρήση τους διευκολύνει. Για παράδειγμα, στην εργασία των Johnston και Rosenfeld (1975) τα κελιά του ΨΜΕ που χαρακτηρίζονται ως υδρογραφικό δίκτυο κρίνονται βάσει ενός συντελεστή καμπυλότητας (concave curvature coefficient), σύμφωνα με τον οποίο, επιλέγονται οι κοίλες περιοχές με τιμές μεγαλύτερες από ένα δεδομένο όριο. Ωστόσο, γίνεται σαφές ότι δεν υπάρχει απόλυτο επίπεδο ορίου (κατώφλι) για τη διάκριση των κελιών που αποτελούν το υδρογραφικό δίκτυο, από τα κελιά της υπόλοιπης λεκάνης απορροής. Κατά συνέπεια, το υδρογραφικό δίκτυο, που προκύπτει, μπορεί να εμφανίζει προβλήματα ασυνέχειας. Επομένως, επιπλέον της εφαρμογής του κριτηρίου, απαιτείται μετέπειτα επεξεργασία ακολουθώντας μη τετριμμένα βήματα, για τη σύνδεση των υπολογισμένων κελιών που αποτελούν το υδρογραφικό δίκτυο, με άλλα όμοια, χαρακτηρισμένα μέσω της παράλληλης διόρθωσης των ενδιάμεσων κελιών της λεκάνης απορροής.

Ο Band (1986), ακολουθώντας την πρόταση των Peucker και Douglas (1975), πρότεινε τη χρήση τοπικών συνθηκών ως κριτήριο για την επισημάνση των κοίλων κελιών ενός ΨΜΕ, ως εκείνα τα πιθανά κελιά στα οποία θα σχηματιστεί ροή. Η πρόταση των Peucker και Douglas (1975) επισημαίνει ως πιθανό κελί, στο οποίο θα σχηματιστεί ροή, το κελί με το μεγαλύτερο υψόμετρο, από κάθε πιθανό τετράγωνο που ελέγχεται και περιέχει τέσσερα γειτονικά κελιά. Η διαδικασία συνεχίζεται και μετά την πρώτη σάρωση του προς έλεγχο τετραγώνου, τα μη σημασμένα κελιά αποτελούν τα κελιά της πλαγιάς (drainage courses), όπου η ροή γίνεται επί εδάφους και όχι επί υδρογραφικού δικτύου. Από την εφαρμογή της πρότασης των Peucker και Douglas (1975), το υδρογραφικό δίκτυο που προκύπτει δεν είναι απαραίτητο ότι είναι συνεχές. Για τον λόγο αυτό, ο Band (1986) περιγράφει διαδικασίες για την αραίωση και σύνδεση, όπου αυτές είναι απαραίτητες. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι αποφεύγεται ο αυθαίρετος καθορισμός μιας ανάντη έκτασης, αλλά μιας και η τεχνική δεν έχει φυσική βάση, για να λειτουργήσει σωστά, είναι αναγκαία η εξομάλυνση των αρχικών δεδομένων.

Πριν προχωρήσει η ανάλυση συγκεκριμένων παραμέτρων, ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον έχει ο συνδυασμός των τοπικών γεωμορφολογικών συνθηκών που εμφανίζονται σε μια περιοχή μελέτης. Αυτή είναι η βασική ιδέα των Qian et al. (1990) οι οποίοι πρότειναν το σύστημα εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου DNESYS σύμφωνα με το οποίο, και σε αντίθεση με άλλες τεχνικές, ο πρώτος εντοπισμός των θέσεων του υδρογραφικού δικτύου γίνεται αφαιρετικά, σε παγκόσμιο επίπεδο και οι περιοχές αυτές ονομάζονται *τμήματα*, χωρίς να εφαρμόζεται διαδικασία ομαδοποίησης ανά κελί του ΨΜΕ. Τα *τμήματα* αυτά θεωρούνται πρόγονοι του υδρογραφικού δικτύου και είναι πιο αξιόπιστα από τις μεμονωμένες θέσεις των κελιών που επιλέγονται από την εφαρμογή άλλων τεχνικών, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί συλλογιστική διαδικασία για την ομαδοποίησή τους. Για τη δεύτερη φάση της τεχνικής, χρησιμοποιείται ένα διάνυσμα χαρακτηριστικών το οποίο περιέχει όλους τους παράγοντες που συμμετέχουν στη συλλογιστική διαδικασία, και στη συνέχεια, μια γεννήτρια υποθέσεων προτείνει συνδέσμους μεταξύ των χωρικά συναφών τμημάτων.

Σε ό,τι αφορά την εφαρμογή τοπικών συνθηκών για την εκτίμηση του υδρογραφικού δικτύου, μέσω της εφαρμογής ενός κατωφλίου ορισμένου στην τοπική κλίση του εδάφους (Shen and Sheng, 2011), η διαδικασία περιλαμβάνει τρία βασικά βήματα και έχει εφαρμογή σε τμήματα υδατορευμάτων σημαντικού πλάτους. Σύμφωνα με τη διαδικασία, έμμεσα λύνεται και το πρόβλημα της ασυνέχειας που δημιουργείται στις επίπεδες περιοχές που εμφανίζονται στο ΨΜΕ. Τα βήματα της διαδικασίας είναι: (1) εντοπίζονται οι επίπεδες περιοχές, μέσω του ελέγχου των κλίσεων των 8 γειτονικών κελιών του κελιού που εξετάζεται και εφαρμόζεται σε

αυτές μια μάσκα. Οι επίπεδες περιοχές αποτελούν τμήμα της επιφάνειας καθρέφτη του υδρογραφικού δικτύου και επομένως, είναι αναγκαίος ο «εμπλουτισμός» εκείνων των περιοχών με δορυφορικά δεδομένα. (2) Το υδρογραφικό δίκτυο που εξάγεται από τις δορυφορικές απεικονίσεις, χρησιμοποιείται για τη διόρθωση του κανάβου της διεύθυνσης ροής του ΨΜΕ, και στο τελευταίο βήμα της διαδικασίας (3), επιλέγεται, για τις περιοχές οι οποίες έχουν σημειωθεί με τη μάσκα του πρώτου βήματος, η διατήρηση του υδρογραφικού δικτύου, όπως έχει εξαχθεί από τις δορυφορικές απεικονίσεις.

Μιας και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό των μισγαγγειών, οι οποίες αποτελούν την πιθανή θέση ανάπτυξης του υδρογραφικού δικτύου, τις τελευταίες δεκαετίες γίνονται προσπάθειες ως προς αυτήν την κατεύθυνση. Να σημειωθεί επίσης ότι η διάκριση των μισγαγγειών /κοιλιάδες (valleys) από τις πλαγιές (hillslopes) είναι θεμελιώδης διαδικασία κατά την υδρολογική και τη γεωμορφολογική ανάλυση, καθώς πολλά μοντέλα απαιτούν διαφορετικές τιμές δεικτών στις περιοχές χαμηλού υψομέτρου των μισγαγγειών και διαφορετικές τιμές στις πλαγιές, ώστε να παράγονται ρεαλιστικότερα αποτελέσματα (Julien et al., 1995). Επίσης, η εκτίμηση της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου απαιτεί, για τον υπολογισμό της, τον καθορισμό του υδρογραφικού δικτύου. Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου είναι μια σημαντική παράμετρος για τον καθορισμό του οριακού εκείνου σημείου, όπου συμβαίνει η μετάβαση από την κίνηση του νερού επί της πλαγιάς στην κίνηση του νερού εντός του υδρογραφικού δικτύου. Για τον αξιόπιστο εντοπισμό των θέσεων των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου, χρησιμοποιούνται τεχνικές στις οποίες επιλέγεται η τοπική καμπυλότητα (Peucker and Douglas, 1975· Yoeli, 1984· Band, 1986· Tribe, 1992· Tarboton and Ames, 2001· Passalacqua et al., 2010· Rulli, 2010· Matsuura and Aniya, 2012· Pelletier, 2013) για τον εντοπισμό των μισγαγγειών ή άλλων χρήσιμων γεωμορφολογικών σχηματισμών. Η επιλογή της καμπυλότητας συμβάλλει στο μετριασμό των επιπτώσεων λόγω της συσχέτισης που έχει η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου με το κατώφλι της ανάντη έκτασης που συχνά επιλέγεται. Για παράδειγμα, η μέθοδος των Tarboton και Ames (2001), δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ της χρήσης ενός κατωφλίου επί της ανάντη έκτασης (συμβάλλουσα έκταση) και της μεθόδου των Peucker and Douglas (1975), σύμφωνα με την οποία οι μισγάγγειες/ κοιλιάδες (πιθανές θέσεις του υδρογραφικού δικτύου) προσδιορίζονται ως οι περιοχές, οι οποίες έχουν θετική καμπυλότητα.

Την καμπυλότητα χρησιμοποιεί ως κριτήριο μια ακόμα σύγχρονη τεχνική, σύμφωνα με την οποία χρησιμοποιούνται συνθετικά δίκτυα (synthetic valley networks) για να μιμηθούν την πολυπλοκότητα των πραγματικών τοπίων (Pelletier, 2013) και των μορφών του εδάφους. Σύμφωνα με την γεωμορφολογία, η θέση του πραγματικού υδρογραφικού δικτύου είναι γνωστή μέσω των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών του εδάφους. Η μέθοδος περιλαμβάνει έξι κύρια βήματα: (1) φιλτράρισμα Wiener για την αφαίρεση του θορύβου του τοπογραφικού αναγλύφου, (2) υπολογισμό της καμπυλότητας (contour-curvature), (3) αναγνώριση των κεφαλών στις μισγάγγειες, χρησιμοποιώντας ως κριτήριο μια τιμή κατωφλίου καμπυλότητας (contour-curvature threshold) που ορίζεται από τον χρήστη, (4) διόδευση μιας ποσότητας νερού, από κάθε κεφαλή, χρησιμοποιώντας αλγόριθμο πολλαπλής διεύθυνσης ροής (multiple-flow-direction routing), (5) αφαίρεση των πιθανών ασυνεχών που εμφανίζονται στο υδρογραφικό δίκτυο χρησιμοποιώντας, ως κριτήριο, την τιμή ενός κατωφλίου παροχής ανά ανάντη κεφαλή μισγάγγειας, και τέλος, (6) εφαρμογή της παραδοχής ότι το πλάτος του υδρογραφικού δικτύου δεν απασχολεί, και επομένως, αυτό ισούται με το πλάτος ενός κελιού. Πλεονεκτήματα της παραπάνω μαθηματικής μεθόδου είναι το γεγονός ότι δίνει ακριβή

αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τις ίδιες τιμές παραμέτρων σε δύο διαφορετικής χωρικής ανάλυσης: από ΨΜΕ που ελέγχθηκαν σε σχέση με το ΨΜΕ αναφοράς.

4.2.2 Κριτήρια βασισμένα στα υδρολογικά χαρακτηριστικά του εδάφους

Από την σκοπιά των υδρολογικών χαρακτηριστικών του εδάφους, η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι το υδρογραφικό δίκτυο σχηματίζεται εκεί όπου ο όγκος του νερού που συγκεντρώνεται είναι αρκετά μεγάλος, ή, καλύτερα, ικανός να οδηγήσει σε σχηματισμό κεφαλής υδρογραφικού δικτύου. Στην περίπτωση αυτή, η φέρουσα ικανότητα για το σχηματισμό του υδρογραφικού δικτύου καθορίζεται από τον κυρίαρχο μηχανισμό γένεσης της επιφανειακής απορροής και την κλίση του εδάφους (Montgomery and Dietrich, 1989· 1992). Η ανάντη έκταση που συμβάλλει στη δημιουργία υδρογραφικού δικτύου σε ένα κελί της λεκάνης απορροής (δηλαδή, η περιοχή του εδάφους με κελιά που συμβάλλουν στο υπό εξέταση κελί) χρησιμοποιείται ως υποκατάστατο του μηχανισμού γένεσης της επιφανειακής απορροής. Οι ανάντη εκτάσεις που συμβάλλουν στη δημιουργία υδρογραφικού δικτύου υπολογίζονται μέσω της προσομοίωσης της ροής του νερού επί του ΨΜΕ.

Κατά τη διαδικασία εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου από το ΨΜΕ, το πρώτο βήμα που πρέπει να ολοκληρωθεί είναι ο χαρακτηρισμός των κελιών της λεκάνης απορροής ως προς το αν ανήκουν ή όχι, στο υδρογραφικό δίκτυο. Για να γίνει αυτό, πρέπει να αποφασιστεί το που ξεκινάει το υδρογραφικό δίκτυο (Montgomery and Dietrich, 1988· 1992). Στη βιβλιογραφία, έχουν προταθεί πληθώρα κριτηρίων με συνθέςτερη την υιοθέτηση ενός κατωφλίου με τη μορφή της ανάντη έκτασης (Band, 1986· Tarboton et al. 1991), ενώ, επίσης, χρησιμοποιούνται κατώφλια με τη μορφή της κλίσης του εδάφους, του γινομένου της ανάντη έκτασης και της κλίσης εδάφους (Montgomery and Dietrich, 1988, 1992· Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993· Moore et al., 1988a,· 1988b,· Dietrich et al., 1992, 1993· Prosser and Dietrich, 1995), και της καμπυλότητας (Howard, 1994). Λιγότερο συχνή είναι η εφαρμογή πολλαπλών κριτηρίων, δηλαδή συνδυασμού δύο ή και περισσότερων παραμέτρων όπως π.χ., του γινομένου της ανάντη έκτασης επί την κλίση του εδάφους ή συνδυασμού της ανάντη έκτασης και της τοπικής καμπυλότητας (Heine et al., 2004). Συνήθως, κατά την εφαρμογή των παραπάνω κατωφλίων, οι κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου, που προκύπτουν, ελέγχονται και συγκρίνονται οπτικά, είτε με τις θέσεις των κεφαλών σε τοπογραφικούς χάρτες, είτε με τις κεφαλές που έχουν αποτυπωθεί τοπογραφικά στο πεδίο.

Σύμφωνα με τους Tucker et al. (2001), και βάσει της μελέτης που πραγματοποίησαν σε λεκάνη απορροής στα Απέννινα Όρη, προκειμένου να αποτυπωθεί η ετερογένεια των ιδιοτήτων της επιφάνειας του εδάφους, μελετήθηκε η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, έχοντας πριν εξαγάγει από ΨΜΕ ένα υδρογραφικό δίκτυο. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτείνουν οι παραπάνω ερευνητές η εφαρμογή πολλαπλών κριτηρίων, μέσα από τις τιμές των αντίστοιχων κατωφλίων, φαίνεται να λειτουργεί καλύτερα από την εφαρμογή ενός μεμονωμένου κριτηρίου. Η διαπίστωση, ότι η εφαρμογή πολλαπλών κριτηρίων λειτουργεί καλύτερα, έγινε με σύγκριση των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου που προέκυψαν μετά την εφαρμογή των πολλαπλών κριτηρίων, με τις κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου όπως αυτές απεικονίζονται σε τοπογραφικούς χάρτες. Η προσέγγισή τους περιλαμβάνει συνδυαστική χρήση κριτηρίων, όπως η συνολική ανάντη έκταση, η τοπική κλίση, και η τοπική καμπυλότητα. Τα βήματα της διαδικασίας εξαγωγής παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Η τοπική κλίση του εδάφους ∇z υπολογίζεται εύκολα από ένα ΨΜΕ για κάθε κελί i , ως η μέγιστη πτώση, δηλαδή η διαφορά υψομέτρων μεταξύ του κελιού i και του κελιού με το χαμηλότερο υψόμετρο μεταξύ των οχτώ γειτονικών κελιών αυτού. Η τοπική κλίση

προσδιορίζεται από την μέγιστη πτώση των υψομέτρων, η οποία διαιρείται με τη διάσταση του κελιού, ενώ παράλληλα, καταχωρείται η διεύθυνση της πιο απότομης πτώσης. Η τοπική καμπυλότητα είναι, επίσης, ένας ακόμα γεωμορφολογικός δείκτης. Η καμπυλότητα υπολογίζεται από ακριβείς προσεγγίσεις αριθμητικού μέσου όρου (Rodriguez-Iturbe and Rinaldo, 1997· Roering et al., 1999), οι οποίες εμπλέκουν τα οκτώ γειτονικά κελιά. Η καμπυλότητα διακρίνει τις περιοχές του τοπίου, καθώς συνηθίζεται να θεωρείται η θετική καμπυλότητα απαραίτητη, αλλά όχι επαρκής συνθήκη, για την ύπαρξη του υδρογραφικού δικτύου. Επομένως, εάν η καμπυλότητα είναι $\nabla_{zi}^2 \leq 0$, το κελί κρίνεται τοπογραφικά ως κυρτό, ή αποκλίνον, και, τυπικά, ορίζει πλαγιά· ενώ, εάν η καμπυλότητα είναι $\nabla_{zi}^2 \geq 0$, το κελί κρίνεται τοπογραφικά κοίλο, ή συγκλίνον, και τυπικά αντιστοιχεί σε κοιλάδα, μισγάγγεια, ή κοιλότητα (Kirkby, 1971· Smith and Bretherton, 1972· Dunne, 1980).

Ως προς την τελευταία παράμετρο, η συνολική συμβάλλουσα έκταση για κάθε κελί i , θεωρείται ως σημαντική τοπική ιδιότητα και υπολογίζεται μέσω μιας αναδρομικής εξίσωσης, όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$A_i = \sum_j w_{i,j} A_j + a \quad (4.1)$$

Όπου A_j είναι η συμβάλλουσα έκταση στο κελί j , a είναι η θεμελιώδης έκταση του κελιού και $w_{i,j}$, είναι ο πίνακας συνέχειας, ο οποίος παίρνει τιμή 0 αν το κελί j δεν είναι συνδεδεμένο με το κελί i και τιμές $0 < w_{i,j} \leq 1$, αν το κελί j είναι συνδεδεμένο με το κελί i και επομένως στέλνει τα νερά στο κελί i . Προφανώς, για λόγους συνέχειας, το $\sum_j w_{i,j} = 1$ για όλα τα j . Επίσης, $w_{i,j} = 1$, εάν επιλεγεί μονής διεύθυνση αλγόριθμος υπολογισμού του κανάβου διεύθυνσης ροής, όπως για παράδειγμα ο D8 (Fairfield and Leymarie, 1991· Quinn et al., 1991· Tarboton, 1997).

Ως προς τον υπολογισμό της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου, ο οποίος αποτελεί επίσης σημαντική διαδικασία, οι Tucker et al. (2001), προτείνουν τον υπολογισμό δύο μηκών, όπως φαίνεται παρακάτω. Το πρώτο βήμα της διαδικασίας είναι ανεξάρτητο από τα κριτήρια που επιλέγονται. Αναλυτικότερα, το πρώτο βήμα αφορά τον υπολογισμό της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου, από ΨΜΕ, μέσω της εφαρμογής μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας που διαχωρίζει τα κελιά του ΨΜΕ σε δύο κατηγορίες, τα κελιά που αποτελούν το υδρογραφικό δίκτυο, και αυτά που αποτελούν το υπόλοιπο της λεκάνης απορροής. Μετά τη χονδροειδή αυτή ταξινόμηση των κελιών της λεκάνης απορροής μπορεί, για κάθε κελί, να οριστεί ένα τοπικό (σημειακό) μέτρο της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου, δηλαδή, σε κάθε κελί να υπολογίζεται η τιμή της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου ως η απόσταση ενός κελιού που έχει χαρακτηριστεί ως λεκάνη απορροής από το κελί που έχει χαρακτηριστεί ως υδρογραφικό δίκτυο. Επομένως, για κάθε κελί που εξετάζεται, ορίζονται δύο αποστάσεις. Ας θεωρηθεί ότι για κάθε κελί i , το οποίο ανήκει στη λεκάνη απορροής (όχι κελί υδρογραφικού δικτύου), ορίζονται δύο χαρακτηριστικά μήκη: (1) το τοπικό μήκος επί της πλαγιάς μέχρι το υδρογραφικό δίκτυο, L_i και (2), το τοπικό μήκος επί της πλαγιάς μέχρι τα κελιά, τα οποία περιγράφουν τις κοιλάδες/ μισγάγγειες \mathcal{L}_i .

Το μήκος L_i , ορίζεται ως το «μήκος της διαδρομής του νερού μέχρι το πλησιέστερο ρέμα», μέχρι ο αλγόριθμος να συναντήσει ένα κελί που είναι χαρακτηρισμένο ως υδρογραφικό δίκτυο. Ένας τέτοιος ορισμός, ωστόσο, εξαρτάται από την κατάλληλη αναγνώριση του υδρογραφικού δικτύου και μπορεί να επηρεαστεί από την αβεβαιότητα καθορισμού του υδρογραφικού δικτύου, από τους τοπογραφικούς χάρτες (Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993) ή από τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από ΨΜΕ, δηλαδή, από τις τιμές των κριτηρίων γεωμορφολογικού χαρακτήρα, όπως η συνολική συμβάλλουσα έκταση A_i , η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου D_i , ή το γινόμενο της

τετραγωνικής ρίζας της συνολικής συμβάλλουσας έκτασης επί την τοπική κλίση $\sqrt{A_i}|\nabla z|$. Επίσης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι περισσότερη αβεβαιότητα εντοπίζεται σε περιοχές με χαμηλές τιμές υψομέτρων και σε ΨΜΕ αδρομερούς ανάλυσης.

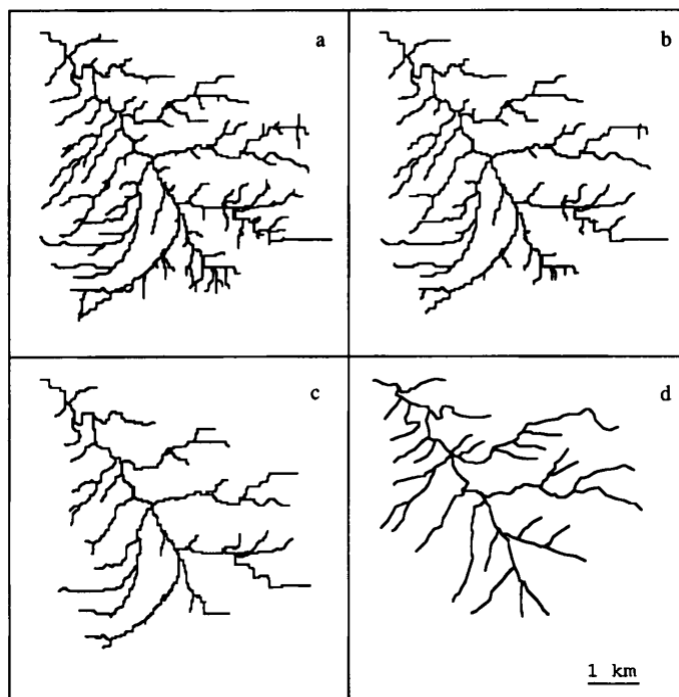
Το μήκος L_i , είναι το «μήκος της διαδρομής του νερού μέχρι την πλησιέστερη μισγάγγεια». Αυτό είναι ανάλογο του μήκους L_i , και ορίζεται ως το μήκος της πιο απότομης διαδρομής διαδρομής κατάντη μέχρι ο αλγόριθμος να συναντήσει ένα κοίλο κελί. Μαθηματικά εκφρασμένο, αυτό σημαίνει ότι $\nabla_{zi}^2 \geq C_0$, όπου C_0 είναι η μια κατάλληλα επιλεγμένη τιμή ελάχιστης καμπυλότητας, μεγαλύτερη ή ίση με το μηδέν. Η αβεβαιότητα υπολογισμού του μήκους αυτού εξαρτάται από την ακρίβεια εκτίμησης της καμπυλότητας, διαδικασία η οποία θεωρείται γενικότερα αξιόπιστη (Rodriguez-Iturbe and Rinaldo, 1997), ενώ, από την άλλη, η καμπυλότητα, ως η δεύτερη παράγωγος του υψομέτρου, είναι ευαίσθητη στο θόρυβο ή πιθανά σφάλματα του ΨΜΕ και, κατά συνέπεια, απαιτεί υψηλής ακρίβειας δεδομένα ή εφαρμογή κατάλληλης εξομάλυνσης.

Παρά το γεγονός ότι το μήκος L_i είναι ένα μέτρο με υδρολογική σημασία (Dietrich and Dunne, 1993· Rodriguez-Iturbe and Rinaldo, 1997), αυτό δεν απεικονίζει το πραγματικό ανάπτυγμα του δικτύου των μισγαγγειών/ κοιλάδων, λόγω του ότι μπορεί να προκύψουν μικρές διαφορές μεταξύ των μισγαγγειών και του υδρογραφικού δικτύου. Όμως, τα δύο μήκη αποτελούν συνεχείς μεταβλητές και οδηγούν στον υπολογισμό και την απεικόνιση της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου, καθώς, όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3.3, η υδρογραφική πυκνότητα υπολογίζεται χωρικά ως το αντίστροφο του διπλάσιου του μήκους που πρέπει να διανύσει μια σταγόνα νερού κατά την πιο απότομη διαδρομή πριν συναντήσει το υδρογραφικό δίκτυο (Horton, 1945).

Στη βιβλιογραφία συναντάται πολύ συχνά η εφαρμογή ενός κριτηρίου κατωφλίου έκτασης για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου. Όμως η επιλεγόμενη τιμή του κριτηρίου, συχνά, δεν είναι κατάλληλη και αντιπροσωπευτική του μεγέθους της λεκάνης απορροής και, επομένως, δεν μπορεί να μεταφερθεί η τιμή ενός κατωφλίου από μια μικρή έκταση λεκάνης απορροής σε μια μεγαλύτερης έκτασης λεκάνη. Κατά την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από ΨΜΕ προτείνεται οι κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου να ορίζουν το τελικό ανάπτυγμα αυτού, έτσι ώστε να είναι κοντά στις θέσεις των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου, όπως αυτές αποτυπώνονται στους τοπογραφικούς χάρτες, μιας και η απεικόνιση αυτών επί των χαρτών θεωρείται αξιόπιστη, καθώς, έχει προκύψει από επιτόπια έρευνα. Επομένως, η εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από ΨΜΕ με εφαρμογή του επιλεγμένου, κάθε φορά, κατωφλίου, κσταδεικνύει πόσο σημαντική είναι η επιλογή της τιμής του κατωφλίου. Η χωρική ταύτιση των δύο προς σύγκριση υδρογραφικών δικτύων συνήθως, γίνεται με απλό οπτικό έλεγχο.

Οι μέθοδοι που προτείνονται για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από ένα ΨΜΕ (O'Callaghan and Mark, 1984· Tarboton et al., 1991· Band and Moore, 1995), αφορούν τη χρήση μιας ελάχιστης έκτασης που εφαρμόζεται ως μια σταθερή τιμή κατωφλίου της ελάχιστης ανάντη έκτασης που απαιτείται για την έναρξη της επιφανειακής ροής (Band, 1986· Morris and Heerdegen, 1988· Tarboton et al., 1988) (Σχήμα 4-2). Για την υλοποίηση της παραπάνω προσέγγισης, ο πρώτος αλγόριθμος που εφαρμόζει τον υπολογισμό της ανάντη έκτασης που συμβάλλει στη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου, επί του ΨΜΕ, αποδίδεται στους O'Callaghan και Mark (1984). Τα κελιά που έχουν ανάντη έκταση μεγαλύτερη από την τιμή ενός δεδομένου ορίου (κατώφλι έκτασης), ανήκουν στο υδρογραφικό δίκτυο. Αποτέλεσμα της εφαρμογής του κριτηρίου της ανάντη έκτασης είναι ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του κατωφλίου, τόσο μικρότερη είναι η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου που εξάγεται. Επίσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η τιμή του κατωφλίου εξαρτάται από την χωρική

ανάλυση του ΨΜΕ και την έκταση της λεκάνης απορροής. Η εφαρμογή κριτηρίων, όπως το παραπάνω σε αντίθεση με την προσέγγιση της χρήσης κριτηρίων βασισμένων στα μορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής εξάγει, εν τέλει, ένα συνεχές υδρογραφικό δίκτυο, με την προϋπόθεση ότι ο υπολογισμός της ροής του νερού θα εξασφαλίζει λύσεις στα θέματα των εδαφικών κοιλοτήτων του ΨΜΕ, και των επίπεδων περιοχών, εντός της λεκάνης απορροής. Η μη αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων, που εμφανίζονται στα ΨΜΕ, μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα ασυνέχειας στο τελικό υδρογραφικό δίκτυο.



Σχήμα 4-2: Το εξαγόμενο υδρογραφικό δίκτυο από ΨΜΕ και διαφορετικές τιμές συμβάλλουσας έκτασης, (a) 50 pixels ($D_d = 3.4 \text{ km}^2$), (b) 100 pixels ($D_d = 2.7 \text{ km}^2$), (c) 200 pixels ($D_d = 2.0 \text{ km}^2$), (d) Τοπογραφικός Χάρτης ($D_d = 1.7 \text{ km}^2$) (πηγή: Tarboton et al., 1991)

Οι Tarboton et al. (1989· 1992) πρότειναν ότι το όριο της ανάντη έκτασης, που θα χρησιμοποιηθεί ως κατώφλι για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου, είναι το σημείο αλλαγής κλίσης (breakpoint) του διαγράμματος των λογαρίθμων της κλίσης προς την ανάντη έκταση (log-log diagram). Το κρίσιμο αυτό σημείο, ισχυρίζονται, αποκαλύπτει τη χωρική μετάβαση από κυρτές πλαγιές σε κοίλες κοιλάδες. Δυσκολίες στον εντοπισμό του υδρογραφικού δικτύου μπορεί να εμφανιστούν στην περίπτωση που το ΨΜΕ περιέχει ετερογενείς τύπους τοπίου ή ετερόκλητες γεωμορφολογικές δομές (π.χ. τοπογραφικές ανωμαλίες). Πράγματι, από τις παρατηρήσεις πεδίου είναι γνωστό, και θεωρητικά υποστηρίζεται, ότι οι κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου ελέγχονται από μια σειρά από γεωμορφολογικά όρια (κατώφλια) (Montgomery and Dietrich, 1988· 1992), αλλά τέτοιου είδους κατώτατα όρια θα πρέπει να επιλέγονται σύμφωνα με τα γεωμορφολογικά, γεωλογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά (Montgomery and Dietrich, 1988· 1992· Montgomery nad Foufoula-Georgiou, 1993· Howard, 1994· Tucker and Bras, 1998· Vogt et al., 2003a· 2003b).

4.2.3 Υβριδική προσέγγιση με συνδυασμό μορφολογικών και υδρολογικών κριτηρίων

Στο πλαίσιο της υβριδικής προσέγγισης γίνεται συνδυασμός των δύο παραπάνω ειδών κριτηρίων, δηλαδή των μορφολογικών και των υδρολογικών, για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου. Ουσιαστικά, στις υβριδικές προσεγγίσεις, που συνδυάζουν τον εντοπισμό των μορφομετρικών χαρακτηριστικών μιας λεκάνης απορροής και την έννοια της

προσομοίωσης της επιφανειακής ροής του νερού, δίνεται η δυνατότητα να αποφευχθεί το πρόβλημα που δημιουργείται, λόγω της υιοθέτησης του κατωφλίου της ανάντη έκτασης. Η βασική ιδέα πίσω από την υιοθέτηση υβριδικού κριτηρίου είναι ο εντοπισμός της περιοχής όπου θα εμφανιστούν οι κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιώντας τοπικές γεωμορφολογικές ιδιότητες όπως, για παράδειγμα, τα τοπικά μέγιστα (διάσελο ή saddle points) (Chorowicz et al., 1992), οι μισγάγγειες (valley bottoms) (Tribe, 1992) ή περιοχές με μεγαλύτερη τιμή από το συγκεκριμένο κρίσιμο κατώφλι του κριτηρίου, π.χ., της καμπυλότητας του εδάφους (Howard, 1994). Τα σημεία αυτά, τα οποία επιλέγονται από την εφαρμογή των παραπάνω κριτηρίων, στη συνέχεια ελέγχονται υπολογιστικά κατά μήκος της μέγιστης κλίσης μιας μισγάγγειας με υδρολογικό κριτήριο αυτή τη φορά, ώστε να αποδοθεί τελικά ένα συνεχές υδρογραφικό δίκτυο.

Μια άλλη υβριδική προσέγγιση, με εφαρμογή συνδυασμού γεωμορφομετρικού και υδρολογικού χαρακτήρα κριτηρίου, είναι η θεώρηση των θέσεων των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου, ως εκείνων των σημείων, των οποίων η ανάντη έκταση υπερβαίνει την τιμή ενός κατωφλίου έκτασης και επιπλέον ισχύει η θεώρηση της θετικότητας του τελεστή Laplace (Rinaldo et al., 1995).

4.2.4 Σύγχρονες διαδικασίες, όπου τα κριτήρια αντιστοιχούν σε υδρολογικές αποφάσεις

Σε πιο σύγχρονες τεχνικές, όπως αυτή των Wu et al. (2019), το υδρογραφικό δίκτυο που ψηφιοποιείται στους τοπογραφικούς χάρτες, αποτελεί το δεδομένο αναφοράς, σύμφωνα με το οποίο γίνεται η διόρθωση του ΨΜΕ. Το ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο από τους συμβατικούς χάρτες χρησιμοποιείται για τη διόρθωση του ΨΜΕ και, επομένως, δεν είναι αναγκαία η εφαρμογή κάποιου κριτηρίου, καθώς η επιφανειακή απορροή εξαναγκάζεται να ξεκινήσει από τις κεφαλές του ψηφιοποιημένου υδρογραφικού δικτύου και στη συνέχεια, να ακολουθήσει τη χωρική κατανομή του υδρογραφικού δικτύου, όπως αυτό εκτείνεται και στους τοπογραφικούς χάρτες (Wu et al., 2019). Η επιφανειακή απορροή, στην εφαρμογή των Wu et al., ακολουθεί αυστηρά το υδρογραφικό δίκτυο, όπως εμφανίζεται αυτό στους χάρτες.

Να σημειωθεί ότι το υδρογραφικό δίκτυο που παράγεται από την χρήση μορφομετρικών κριτηρίων, ή τη χρήση υδρολογικών κριτηρίων, ή τη χρήση συνδυασμού των προηγούμενων, ενδέχεται να διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος του κανάβου του ΨΜΕ που έχει χρησιμοποιηθεί (Walker and Willgoose, 1999). Επιπλέον, αδρομερούς και μέσης ανάλυσης ΨΜΕ δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό των βυθισμάτων, των μικρής τάξης κλάδων και των μορφομετρικών χαρακτηριστικών των κλιτύων. Επομένως, η έρευνα οδηγείται προς το συνδυασμό των δεδομένων διαφορετικών κλιμάκων για την αντιμετώπιση των παραπάνω περιορισμών.

Οι Soille et al. (2003) με κίνητρο τη δημιουργία μιας πανευρωπαϊκής βάσης δεδομένων, προτείνουν έναν σύγχρονο τρόπο εξαγωγής ενός υδρογραφικού δικτύου, από ΨΜΕ, με μέγεθος κελιού ίσο με 250 m (Vogt et al., 2007· Colombo et al., 2003), εισάγοντας σε αυτή τη μελέτη τρεις νέους αλγόριθμους για τον καλύτερο προσδιορισμό της κατεύθυνσης τοπικής ροής, στην περίπτωση παρουσίας, στο ΨΜΕ, εσφαλμένων βυθισμάτων και επίπεδων εκτάσεων. Οι αλγόριθμοι είναι βασισμένοι σε σχέσεις που αφορούν την έκφραση της γεωμορφολογίας του εδάφους με μαθηματικό τρόπο. Κατά τη διάρκεια της μελέτης τους, εξέτασαν τις υπάρχουσες τεχνικές που περιγράφονται στη βιβλιογραφία για την επίλυση των προβλημάτων των εσφαλμένων βυθισμάτων και των επίπεδων εκτάσεων εντός των ΨΜΕ και πρότειναν την εξάλειψη των βυθισμάτων με την εφαρμογή μιας καμπύλης επιφάνειας, και όχι εφαρμόζοντας το κλασικό γέμισμα αυτών των περιοχών με μια επίπεδη επιφάνεια, και σύμφωνα με το

ελάχιστο υψόμετρο της γειτονικής περιοχής. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής της καμπύλης επιφάνειας επεκτείνεται στην υιοθέτηση ενός προσαρμοσμένου υδρογραφικού δικτύου. Το δε πρόβλημα των επίπεδων περιοχών επιλύεται με τη βελτίωση του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε από τους Garbrecht and Martz (1997) για την επιβολή σύγκλισης ροής σε επίπεδες επιφάνειες.

5 Μεθοδολογικό πλαίσιο υδρολογικής προσομοίωσης

Όπως ελέχθη στο Κεφάλαιο 2, η συντριπτική πλειονότητα των λεκανών απορροής παγκοσμίως δεν έχει μετρημένες απορροές και επομένως οι λεκάνες αυτές χαρακτηρίζονται ως μη μετρούμενες. Η μελέτη και ο σχεδιασμός των έργων και, γενικά, των συστημάτων διαχείρισης υδατικών πόρων σε αυτές τις λεκάνες βασίζεται, πολύ συχνά, σε εκτιμήσεις της απορροής, οι οποίες γίνονται με άμεσο ή έμμεσο τρόπο βασιζόμενες σε πληροφορίες για τη απορροή λεκανών, που μετρώνται.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, είναι επιθυμητό η μη μετρούμενη λεκάνη να είναι υδρολογικά όμοια με τις λεκάνες για τις οποίες παρέχονται πληροφορίες. Με τον όρο *όμοια* νοείται μια συμπεριφορά παρόμοια ως προς τις υδρολογικές διεργασίες και τον μηχανισμό γένεσης της απορροής, ώστε να επιτρέπεται η μεταφορά πληροφορίας από άλλες λεκάνες στη ζητούμενη.

Ένας τρόπος προσέγγισης του παραπάνω προβλήματος, ο οποίος συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας κατά τη μεταφορά της υδρολογικής πληροφορίας, είναι η κατασκευή ενός συστήματος ταξινόμησης λεκανών απορροής. Ωστόσο, μέχρι σήμερα δεν υπάρχει σύστημα ταξινόμησης λεκανών ευρείας αποδοχής (Hrachowitz et al., 2013), αν και, στο παρελθόν, έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Οι προταθείσες προσεγγίσεις συνήθως βασίζονται στα χαρακτηριστικά της απορροής (π.χ. Richards 1990· Burn and Boorman, 1993), στην έννοια των υδρολογικών κατηγοριών τοπίου (Winter, 2001· Gharari et al., 2011· Papageorgaki and Nalbantis, 2013) ή σε κλιματολογικές μεταβλητές. Το πρόβλημα της ταξινόμησης λεκανών απορροής είχε ενδιαφέρον για τους υδρολόγους στο παρελθόν (Abida and Ellouze, 2006) και συνεχίζει να έχει μέχρι και σήμερα (Sawicz et al., 2011· Latt et al., 2015· Qamar et al., 2015· Papageorgaki and Nalbantis, 2016). Πρόσφατα, οι Sawicz et al. (2011) χρησιμοποίησαν την έννοια των υδρολογικών υπογραφών για να χαρακτηρίσουν τις λεκάνες απορροής ως προς το καθεστώς απορροής τους. Το γεγονός ότι τα φαινόμενα που συνδέονται με την επιστήμη της υδρολογίας χαρακτηρίζονται από μεγάλη ετερογένεια (χωρική και χρονική), οδηγεί στην έλλειψη κατανόησης των παραγόντων, οι οποίοι ελέγχουν τις υδρολογικές διεργασίες. Η επιπλέον αβεβαιότητα, η οποία ενέχεται στις υδρολογικές προσομοιώσεις και οφείλεται στην ελλιπή κατανόηση των διεργασιών που επηρεάζονται από την κλίμακα της λεκάνης απορροής, δηλαδή πιο συγκεκριμένα, από την έλλειψη κατανόησης των νόμων της φυσικής που περιγράφουν τις διεργασίες σε μικρής κλίμακας λεκάνες απορροής, και από την έλλειψη κατανόησης της υδρολογικής συμπεριφοράς των μεγάλης κλίμακας λεκανών απορροής, έχει γίνει από νωρίς αντιληπτή από τους υδρολόγους (Beven, 1989· Grayson et al., 1992· Sivapalan, 2005). Παρόλα αυτά, η προσπάθεια ανάπτυξης ενός συστήματος ταξινόμησης λεκανών, βασισμένου σε ένα πλαίσιο ομοιότητας, αποτελεί πολλά υποσχόμενο τρόπο (McDonnell and Woods, 2004). Στο ίδιο πλαίσιο, εντάσσεται και η προσπάθεια οργάνωσης της υπάρχουσας γνώσης από μελέτες σχετικές με την πρόβλεψη της απορροής, που έγινε από τους Blöschl et al. (2013). Να σημειωθεί εδώ, ότι παρόμοια είναι και η διαπίστωση της πρωτοβουλίας PUB, σύμφωνα με την οποία, παρά τις τόσες μελέτες μεμονωμένων περιπτώσεων λεκανών απορροής παγκοσμίως, την εφαρμογή μοντέλων και τις πειραματικές μετρήσεις, δεν υπάρχει γενικευμένο πλαίσιο οργάνωσης και κατανόησης της πληροφορίας που αφορά στις υδρολογικές διεργασίες.

Στο παρόν κεφάλαιο με τίτλο «Μεθοδολογικό πλαίσιο υδρολογικής προσομοίωσης», προσεγγίζονται θεωρητικά οι μεθοδολογίες που απασχόλησαν κατά τη διάρκεια της διδακτορικής διατριβής. Στην αρχή του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι ταξινόμησης

που χρησιμοποιήθηκαν στη διατριβή για την εφαρμογή ταξινόμησης των λεκανών απορροής σε κλάσεις υδρολογικά όμοιων λεκανών απορροής. Επιπλέον, περιγράφεται συνοπτικά η γνωστή μέθοδος Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών (Principal Components Analysis, PCA) η οποία εφαρμόστηκε στην παρούσα διατριβή. Στη συνέχεια, περιγράφεται η μεθοδολογία για αναζήτηση της σχέσης μεταξύ της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης και των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της ανάντη λεκάνης που δημιουργείται στις κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου. Ακολουθεί η βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου, με χρήση κριτηρίων ανάντη έκτασης, και η παρουσίαση της προτεινόμενης μεθοδολογίας για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου με τη χρήση της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης (ΑΣΕ).

Στον πυρήνα των ερευνητικών δραστηριοτήτων εντάσσεται η μελέτη της ταξινόμησης των λεκανών απορροής του ελλαδικού χώρου, με την αποκλειστική χρήση γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών. Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιήθηκαν ως κριτήρια ταξινόμησης των λεκανών απορροής. Ακολουθήθηκαν δύο προσεγγίσεις: η αδιαμέριστη ταξινόμηση και η ημικατανεμημένη ταξινόμηση.

Στην αδιαμέριστη ταξινόμηση η κάθε λεκάνη απορροής θεωρείται ενιαία χωρική οντότητα. Ο έλεγχος του αποτελέσματος της ταξινόμησης έγινε με χρήση των υδρολογικών υπογραφών, οι οποίες επικεντρώνονται στην υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών απορροής, και στην προτεινόμενη προσέγγιση, χρησιμοποιούνται ως στοιχεία ελέγχου. Η χρήση των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών επιτρέπει την επέκταση της μεθοδολογίας που προτείνεται στις μη μετρούμενες λεκάνες απορροής, μιας και η διάθεση της πληροφορίας από Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) επιτρέπει τον υπολογισμό όλων των κριτηρίων και στις μη μετρούμενες λεκάνες απορροής και, προφανώς, και την μετέπειτα εφαρμογή της ταξινόμησης στις τελευταίες. Ο συνδυασμός γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών και υδρολογικών υπογραφών στην εφαρμογή του μεθοδολογικού πλαισίου της ταξινόμησης αποτελεί πρωτότυπο στοιχείο της διατριβής. Περιγράφονται και οι μεθοδολογίες επιβλεπόμενης και μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης που χρησιμοποιήθηκαν για την προτεινόμενη αδιαμέριστη ταξινόμηση. Στην προσέγγιση αυτή, κάθε λεκάνη απορροής που εξετάζεται αποτελεί ένα στοιχείο του δείγματος.

Ακολουθεί η ημικατανεμημένη ταξινόμηση του γήινου αναγλύφου της λεκάνης απορροής, σε κατηγορίες τοπίου. Για την ταξινόμηση αυτή χρησιμοποιείται ένα ΨΜΕ, και ποιοτική πληροφορία, για τις κατηγορίες τοπίου, που αντλείται από αεροφωτογραφίες ή δορυφορικές εικόνες. Η ποιοτική πληροφορία, που εξάγεται από την παρατήρηση των εικόνων, χρησιμοποιείται ως δεδομένο εκπαίδευσης ενός Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου (ΤΝΔ) επιβλεπόμενης ταξινόμησης. Το ΤΝΔ εφαρμοζόμενο στο σύνολο της λεκάνης απορροής επιτρέπει την ταξινόμηση όλων των εικονοστοιχείων της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής σε κατηγορίες τοπίου.

Το κεφάλαιο συνεχίζεται με την παρουσίαση του μεθοδολογικού πλαισίου σύμφωνα με το οποίο, σε κάθε λεκάνη απορροής, γίνεται προσπάθεια μεταφοράς πληροφορίας μέσω της χρήσης της έννοιας της Συνάρτησης Πλάτους με ταυτόχρονη θεώρηση της χωρικής ετερογένειας του υδρογραφικού δικτύου. Είναι γνωστό ότι ένας σύγχρονος τρόπος αντιμετώπισης της έλλειψης μετρήσεων παροχής σε λεπτή χρονική κλίμακα είναι η κατάρτιση ενός Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος της εξεταζόμενης λεκάνης. Η θεωρία του Γεωμορφολογικού Στιγμιαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph, GIUH) (Rodriguez-Iturbe and Valdez, 1979· Rinaldo and Rodriguez-Iturbe, 1996) αποτελεί μια σύγχρονη απάντηση στο πρόβλημα της σύνθεσης του

Μοναδιαίου Υδρογραφήματος, αλλά δεν έχει μέχρι σήμερα συμβάλει ουσιαστικά στον υδρολογικό σχεδιασμό. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε η εναλλακτική στο GIUH που είναι η μέθοδος του Στιγμιαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος βασισμένου στη Συνάρτηση Πλάτους (Width Function Instantaneous Unit Hydrograph, WFIUH).

Στο κεφάλαιο περιγράφονται οι δύο προσεγγίσεις υπολογισμού του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος μέσω της χρήσης της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους: (Rescaled Width Function, RWF) (Rinaldo et al., 1995): (1) Η κλασική Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους (cRWF), και (2) η σταθμισμένη, μέσω της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου, Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους, γνωστή ως ddRWF (Di Lazzaro et al., 2015). Ουσιαστικά, οι δύο παραπάνω προσεγγίσεις αφορούν δύο εκδοχές της μεθόδου της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους, με την δεύτερη εκδοχή να αποτελεί τροποποιημένη προσέγγιση κατά την οποία λαμβάνεται υπόψιν η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου (Di Lazzaro et al., 2015). Περιγράφονται τα μεθοδολογικά βήματα που προτάθηκαν για χρήση της προσέγγισης ddRWF σε συνθήκες μεγάλης έλλειψης υδρολογικών δεδομένων σε λεπτή χρονική κλίμακα, κάτι που συναντάται συχνά στην πλειονότητα των λεκανών απορροής παγκοσμίως.

Το κεφάλαιο περιλαμβάνει την παρουσίαση της μεθοδολογίας των μοντέλων βροχόπτωσης απορροής. Να σημειωθεί ότι δίνεται έμφαση στον τρόπο με τον οποίον συμβάλλει η χρήση των μοντέλων βροχόπτωσης απορροής στην ανάδειξη της υδρολογικής ομοιότητας και στη μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας από τη λεκάνη απορροής, με γνωστή υδρολογική πληροφορία, στη μη μετρούμενη λεκάνη απορροής.

5.1 Αλγόριθμοι Ταξινόμησης

Στόχος του υποκεφαλαίου είναι η ανάλυση των μεθόδων ταξινόμησης που εφαρμόστηκαν στο πλαίσιο της διατριβής. Το θεωρητικό υπόβαθρο για κάθε μέθοδο ταξινόμησης που παρουσιάζεται είναι σημαντικό καθόσον επηρεάζει την οργάνωση όλων των σταδίων στις οποίες αυτές εμπλέκονται, όπως, για παράδειγμα, την προετοιμασία των αρχικών δεδομένων, την επιλογή της κλίμακας εφαρμογής, καθώς και την ερμηνεία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Στο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται η μέθοδος της ασαφούς ταξινόμησης, η μέθοδος μέσω της χρήσης του αλγορίθμου εγγύτερου γείτονα (k-NN) και ΤΝΔ (Artificial Neural Networks, ANNs). Κατά την εφαρμογή των ΤΝΔ, ως μεθόδου επιβλεπόμενης ταξινόμησης, τα αρχικά δεδομένα εκπαίδευσης χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο ώστε να γίνει αξιοποίηση, στην ταξινόμηση νέων δεδομένων, της γνώσης που εξασφαλίστηκε από τα αρχικά δεδομένα

Στη μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση γίνεται προσπάθεια εντοπισμού των συνδέσεων μεταξύ των στοιχείων των αρχικών δεδομένων, χωρίς να υπάρχει προηγούμενη γνώση για τη διάταξή τους ή τις σχέσεις μεταξύ τους, και, επομένως, ούτε για την κλάση που ανήκουν τα δεδομένα, ούτε για το πλήθος των κλάσεων που περιγράφουν καλύτερα τα δεδομένα. Το γεγονός αυτό, δεν επιτρέπει την εκτίμηση του σφάλματος της πιθανής λύσης η οποία προτείνεται από τον αλγόριθμο. Η εφαρμογή της ασαφούς λογικής και η μέθοδος της ανάλυσης κατά συστάδες (cluster analysis) αποτελούν κλασικές τεχνικές μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης. Στη συνέχεια, αναλύεται η πρώτη μέθοδος, καθόσον αυτή έχει χρησιμοποιηθεί στη διατριβή. Η δεύτερη μέθοδος παρουσιάζεται σύντομα, μιας και έχει χρησιμοποιηθεί, στο παρελθόν, στη μελέτη ταξινόμησης ενός δείγματος 280 λεκανών απορροής στις Η.Π.Α. (Sawicz et al., 2011). Η ανάλυση κατά συστάδες είναι διαδικασία ομαδοποίησης όμοιων οντοτήτων σύμφωνα με ένα ή περισσότερα μέτρα ομοιότητας, που, στην προκειμένη περίπτωση, ήταν οι υδρολογικές υπογραφές. Αυτές ποσοτικοποιούν τα χαρακτηριστικά της υδρολογικής απόκρισης της

εξεταζόμενης λεκάνης απορροής. Η μέθοδος επιτρέπει την ομαδοποίηση των στοιχείων ενός δείγματος με τέτοιο τρόπο ώστε τα στοιχεία που ανήκουν στην ίδια ομάδα, ή αλλιώς, συστάδα, να παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιότητα μεταξύ τους, παρά με οποιοδήποτε άλλο στοιχείο άλλης συστάδας.

Η επιβλεπόμενη ταξινόμηση αξιοποιεί τη χρήση ενός δείγματος δεδομένων εκπαίδευσης και, μέσω κατάλληλων αλγορίθμων, μπορεί να κατατάξει δεδομένα εισόδου σε συγκεκριμένες ομάδες (κλάσεις). Στην περίπτωση αυτή, ο χρήστης έχει πλήρη γνώση του προβλήματος και της λύσης του και μπορεί, μέσω της διαδικασίας, να εφαρμόσει τη γνώση σε ένα νέο δείγμα δεδομένων. Στόχος του συστήματος είναι η αντιστοίχιση ενός δείγματος στοιχείων εισόδου (input sample point) $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_m]^T$ σε τιμές εξόδου y που εκτιμούν επιθυμητές (desired) τιμές d (π.χ. πρόβλεψη ή ταξινόμηση). Τα στοιχεία x_i είναι αριθμητικές τιμές που κωδικοποιούν m ειδοποιά χαρακτηριστικά (features) του δειγματικού στοιχείου \mathbf{x} . Επομένως, ζητείται ο προσδιορισμός της συνάρτησης εισόδου - εξόδου $y = h(\mathbf{x}) \cong d$ που προκύπτει από δείγμα δεδομένων μάθησης/ εκπαίδευσης (training set). Όταν ο αλγόριθμος ταξινόμησης έχει εκπαιδευτεί, μπορεί να επεκτείνει τη γνώση που κέρδισε ώστε να αναγνωρίσει και να κατατάξει τα στοιχεία οποιουδήποτε νέου δείγματος και να αποδώσει στο δείγμα την κατάλληλη κλάση. Έχουν αναπτυχθεί πολλοί αλγόριθμοι επιβλεπόμενης ταξινόμησης, όπως οι αλγόριθμοι της ελάχιστης απόστασης, του παραλληλεπιπέδου, της μέγιστης πιθανοφάνειας και άλλοι..

Να σημειωθεί, ότι η επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου για ταξινόμηση δεν είναι απλή υπόθεση. Από την πληθώρα των αλγορίθμων, οι οποίοι υπάρχουν στην βιβλιογραφία, προκύπτει το ερώτημα της επιλογής του καταλληλότερου αλγορίθμου για τη μελέτη του εκάστοτε προβλήματος. Το θέμα της επιλογής γίνεται ακόμα πιο έντονο σε πολυδιάστατα σύνολα δεδομένων. Βιβλιογραφικά, μπορούν να αναζητηθούν κριτήρια που έχουν προταθεί για την σύγκριση αλγορίθμων ταξινόμησης με στόχο την διευκόλυνση της επιλογής του κατάλληλου. Αυτά τα κριτήρια βασίζονται στον τρόπο με τον οποίο σχηματίζονται οι ομάδες, στην δομή που έχουν τα αρχικά δεδομένα, και στην ευαισθησία που έχει ο αλγόριθμος σε πιθανές αλλαγές που όμως δεν επηρεάζουν τη δομή των δεδομένων.

5.1.1 Ασαφής ταξινόμηση - Αλγόριθμος fuzzy c-means (FCM)

Η βασική ιδέα πίσω από τη διαδικασία της ασαφούς ταξινόμησης και το στοιχείο που την διαφοροποιεί από τις κλασικές μεθόδους ταξινόμησης είναι το γεγονός ότι ένα στοιχείο μπορεί να ανήκει σε περισσότερες από μία ομάδες ανάλογα με το βαθμό συμμετοχής ή τη συνάρτηση συμμετοχής. Αυτό το χαρακτηριστικό διαφέρει εννοιολογικά από την θεώρηση της κλασικής ταξινόμησης, σύμφωνα με την οποία, ένα στοιχείο ανήκει σε μία μοναδική ομάδα. Η συνάρτηση συμμετοχής υποδηλώνει το βαθμό συμμετοχής κάθε στοιχείου στην κάθε ομάδα. Οι τιμές που μπορεί να πάρει ο βαθμός συμμετοχής είναι από μηδέν έως ένα. Όσο πιο κοντά στο ένα είναι ο βαθμός συμμετοχής του στοιχείου i στην ομάδα j , τόσο πιο σίγουρη είναι η συμμετοχή του στοιχείου στη συγκεκριμένη ομάδα. Όπως στην ασαφή ταξινόμηση, έτσι και στην κλασική ορίζεται η συνάρτηση συμμετοχής των στοιχείων στις ομάδες. Η διαφορά είναι ότι η συνάρτηση συμμετοχής στην κλασική ταξινόμηση λαμβάνει διακριτές τιμές, τόσες όσες οι ομάδες που υπάρχουν, π.χ., τις τιμές 0 και 1, αν υπάρχουν δύο ομάδες, ενώ, στην ασαφή ταξινόμηση, ο βαθμός συμμετοχής ενός στοιχείου σε κάποια ομάδα είναι συνεχής μεταβλητή και, για παράδειγμα, λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 0 έως 1.

Η έννοια του ασαφούς συνόλου εισήχθη από τον Zadeh (1965) και δημιούργησε πραγματική επανάσταση στο χώρο των Μαθηματικών. Η βασική ιδέα για τον ορισμό των ασαφών συνόλων ήταν η γενίκευση της χαρακτηριστικής συνάρτησης ενός συνόλου A . Ως γνωστόν, κάθε

υποσύνολο A ενός κλασικού (μη ασαφούς) συνόλου X μπορεί να ταυτιστεί με τη χαρακτηριστική συνάρτηση $I_A : X \rightarrow \{0, 1\}$. Η τιμή της χαρακτηριστικής συνάρτησης ενός υποσυνόλου A του X , για κάθε x του X , εκφράζει το βαθμό (0 ή 1) με τον οποίον το στοιχείο x ανήκει στο σύνολο A (Zadeh, 1965).

Στόχος της ασαφούς λογικής είναι η μοντελοποίηση εννοιών και χαρακτηριστικών με αίσθηση βαθμιαίας αλήθειας, που ακολουθεί την αβεβαιότητα της πραγματικότητας. Στις υδρολογικές διεργασίες, η αβεβαιότητα απορρέει από την φυσική πολυπλοκότητα των υδρολογικών παραμέτρων και τη μεταβλητότητα, στη χωροχρονική κλίμακα, των υδρολογικών φαινομένων, καθώς επίσης και από την ανεπαρκή δική μας γνώση (Kundzewicz et al., 2007).

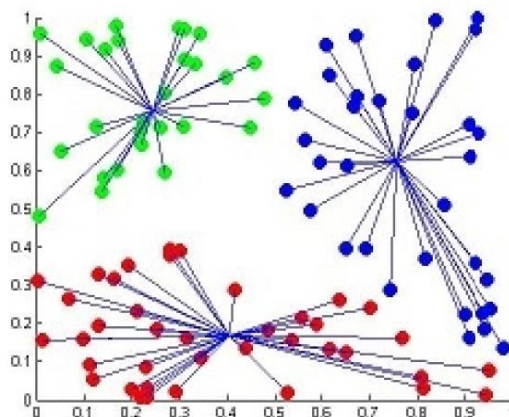
Για την εφαρμογή της ασαφούς ταξινόμησης χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος fuzzy c-means ή FCM (Dunn, 1974· Bezdek et al., 1984). Ο αλγόριθμος αυτός ταξινομεί ένα σύνολο στοιχείων $X = \{x_1, \dots, x_n\} \subset \mathbb{R}^p$, σε $c \in \{2, \dots, n-1\}$ επικαλυπτόμενες ή ασαφείς κλάσεις, οι οποίες αντιπροσωπεύονται από τα κέντρα τους. Η απόδοση των στοιχείων στις ασαφείς κλάσεις επιτυγχάνεται με ελαχιστοποίηση της συνάρτησης στόχου (objective function):

$$J_{FCM}(\mathbf{M}, \mathbf{C}) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m \|x_k - v_i\|^T, \quad (5.1)$$

χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική διαδικασία.

Στην παραπάνω εξίσωση, \mathbf{M} είναι ο πίνακας συμμετοχής, \mathbf{C} είναι ο πίνακας με τα κέντρα κάθε κλάσης, c είναι ο αριθμός των κλάσεων, n είναι ο αριθμός των σημείων που αποτελούν τα δεδομένα, και u_{ik}^m είναι ο βαθμός συμμετοχής του δείγματος k στην κλάση i , ενώ ο εκθέτης T δηλώνει τον ανάστροφο ενός πίνακα ή ενός διανύσματος. Στην περίπτωση κατά την οποία η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του επιπέδου X_k και του κέντρου της κλάσης v_i είναι μεγάλη, η J_{FCM} ελαχιστοποιείται. Στην περίπτωση που η απόσταση είναι μικρή, η συνάρτηση συμμετοχής προσεγγίζει τη μονάδα (Höppner, 2002). Η παράμετρος $m \in (1, \infty)$ ελέγχει το βαθμό ασάφειας ή, αλλιώς, το βαθμό επικάλυψης του αποτελέσματος της ταξινόμησης, στην περίπτωση που $m = 1$, το αποτέλεσμα είναι η Αριστοτελική ταξινόμηση κατά την οποία τα στοιχεία θα ανήκουν ή όχι στην κλάση, ενώ στην περίπτωση που η παράμετρος m πλησιάζει το άπειρο, το αποτέλεσμα της ταξινόμησης προσεγγίζει το μέγιστο βαθμό ασάφειας. Ένα λογικό εύρος τιμών για το δείκτη m θεωρείται από $1.7 < m < 2.3$.

Βασικό πλεονέκτημα της ασαφούς ταξινόμησης είναι το ότι επιτρέπεται η διαδικασία της γενίκευσης σε περιπτώσεις πολλών δεδομένων και η εξαγωγή βασικών προτύπων. Από την άλλη πλευρά, λόγω του μικρού αριθμού παραμέτρων εισαγωγής, οι παράμετροι αυτές (c , m) αποτελούν κομβικό σημείο της διαδικασίας και ως, εκ τούτου, υπάρχει πληθώρα αλγορίθμων για τον προσδιορισμό τους. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5-1) παρουσιάζεται το αποτέλεσμα ενός παραδείγματος ταξινόμησης με χρήση του αλγορίθμου FCM σε ομάδες, καθώς και οι αποστάσεις των στοιχείων από το κέντρο βάρους κάθε ομάδας.



Σχήμα 5-1: Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου FCM.

Στόχος του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε στο περιβάλλον του προγράμματος MatLab είναι να ελαχιστοποιήσει την εξής συνάρτηση αντικειμενικού σκοπού

$$J = \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^n u_{i,k}^m \|x_i - v_k\| \quad (5.2)$$

όπου $u_{i,k}^m$ είναι η τιμή της συνάρτησης συμμετοχής του i -στού αντικειμένου στην k -στή κλάση, m είναι μια παράμετρος που καθορίζεται από το χρήστη, και $\|\cdot\|$ είναι ένας μετρητής απόστασης στον l -διαστάσεων χώρο, που στην παρούσα περίπτωση είναι η Ευκλείδεια απόσταση. Η παράμετρος m ανήκει στο διάστημα $(1, \infty)$ και στην παρούσα περίπτωση, επιλέχθηκε να είναι ίση με 2.0. Ο αριθμός των κλάσεων, c , είναι μια δεύτερη παράμετρος της μεθόδου.

Καταληκτικά, στα αποτελέσματα της ταξινόμησης FCM, λόγω του πίνακα των τιμών της συνάρτησης συμμετοχής, εξαλείφεται η έννοια του αυστηρού ορίου μεταξύ των κλάσεων και παρέχεται η δυνατότητα εξέτασης και ερμηνείας της επικάλυψης των κλάσεων (μερική συμμετοχή), που πιθανά να περιέχει χρήσιμες πληροφορίες (π.χ. υδρολογικές, χωρικές, γεωλογικές) (Güler et al., 2012).

5.1.2 Επιβλεπόμενη ταξινόμηση – Αλγόριθμος εγγύτερου γείτονα (k-NN)

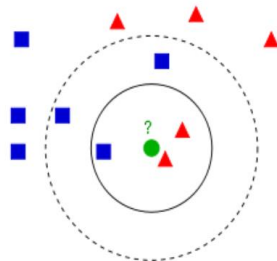
Ο αλγόριθμος εγγύτερου γείτονα k-NN (k-Nearest Neighbours) είναι μία μη παραμετρική μέθοδος που χρησιμοποιείται για ταξινόμηση και κατάτμηση. Και στις δύο περιπτώσεις, ο αλγόριθμος στηρίζεται στα k εγγύτερα δεδομένα εκπαίδευσης στο χώρο των αντικειμένων. Όσον αφορά την εφαρμογή του αλγορίθμου σε διαδικασίες ταξινόμησης, η έξοδος είναι η κατηγοριοποίηση των δεδομένων σε κλάσεις με βάση την πλειοψηφία των γειτόνων. Ο αριθμός των γειτόνων k είναι ένας θετικός ακέραιος αριθμός, όπου αν $k=1$ τότε το αντικείμενο απλά αποδίδεται στην κατηγορία που ανήκει ο πλησιέστερος γείτονας. Ο αλγόριθμος k-NN ανήκει στην κατηγορία των instance-based learning algorithms ή αλλιώς lazy learning algorithms, καθώς η συνάρτηση απόδοσης τιμής και οι υπολογισμοί είναι κατά προσέγγιση σε τοπικό επίπεδο. Σε σύγκριση με άλλους αλγορίθμους υπολογιστικής μάθησης, ο k-NN είναι ο πιο απλός (Altman, 1992). Επιπλέον, ο αλγόριθμος k-NN δεν χρησιμοποιεί τα δεδομένα εκπαίδευσης για να κάνει οποιαδήποτε γενίκευση, οπότε δεν υπάρχει ρητή φάση εκπαίδευσης ή αυτή είναι ελάχιστη. Με τη μη γενίκευση των δεδομένων εκπαίδευσης ο αλγόριθμος κρατά όλα τα δεδομένα για εκπαίδευση σε όλες τις φάσεις δοκιμών, σε αντίθεση με άλλους αλγορίθμους εκπαίδευσης, όπως είναι οι αλγόριθμοι Support Vector Machines, όπου υπάρχει η δυνατότητα απόρριψης δεδομένων. Κατά συνέπεια, ο αλγόριθμος k-NN είναι πιο απαιτητικός από άποψη υπολογιστικής ισχύος καθώς αποθηκεύει και χρησιμοποιεί το σύνολο των δεδομένων για τη λήψη απόφασης. Όπως αναφέρθηκε, ο αλγόριθμος k-NN είναι μη

παραμετρικός και το μόνο που απαιτείται είναι η επιλογή του αριθμού των γειτόνων k . Η καλύτερη επιλογή του k εξαρτάται από τα δεδομένα και, σε γενικές γραμμές, έχει παρατηρηθεί πως όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του k τόσο περισσότερο μειώνεται ο θόρυβος στην ταξινόμηση κάνοντας παράλληλα τα όρια των τάξεων λιγότερο διακριτά (Everitt et al., 2010) Για τη βέλτιστη επιλογή του αριθμού k εκτελούνται διάφοροι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης (π.χ., υπερπαραμετρική βελτιστοποίηση) για κάθε διαφορετική εφαρμογή. Μία προφανής αδυναμία των αλγορίθμων lazy learning algorithms είναι ότι ορισμένα στοιχεία του δείγματος των δεδομένων εκπαίδευσης μπορεί να μην μπορούν να ταξινομηθούν μιας και δεν ταιριάζουν με κάποιο άλλο στοιχείο (ως προς τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα) από τα δεδομένα εκπαίδευσης.

Ο αλγόριθμος k -NN θεωρείται ο απλούστερος μη παραμετρικός αλγόριθμος μηχανικής μάθησης. Στην περίπτωση κατά την οποία επιλεγεί μια τιμή k πολύ μικρή, ο αλγόριθμος επηρεάζεται από το θόρυβο των δεδομένων, ενώ αν επιλεγεί μια τιμή πολύ μεγάλη, ο αλγόριθμος μπορεί να ταξινομήσει λανθασμένα στοιχεία από πιο μακρινές κλάσεις (Σχήμα 5-2). Η καλύτερη επιλογή του k εξαρτάται κάθε φορά, από το σύνολο των δεδομένων που υπάρχουν. Γενικά όμως, όσο μεγαλύτερο είναι το k , τόσο καλύτερη είναι η ταξινόμηση. Εν γένει, αύξηση του k μέχρι ενός σημείου βελτιώνει την ακρίβεια του αλγορίθμου. Με περαιτέρω αύξηση η απόδοση χειροτερεύει, διότι συμπεριλαμβάνεται πληροφορία αρκετά «μακρινών» γειτόνων. Στη περίπτωση των 2 κλάσεων, το k επιλέγεται να είναι περιττός αριθμός, ενώ στη περίπτωση που υπάρχουν λίγα δεδομένα, συχνά επιλέγεται το $k=1$. Σε αυτή τη περίπτωση, ο αλγόριθμος k -NN λέγεται nearest neighbour algorithm.

Εκτός από πλεονεκτήματα, ο αλγόριθμος k -NN, έχει και μειονεκτήματα. Σε αυτά εντάσσεται η απουσία συστηματικού τρόπου για τον προσδιορισμό του καταλλήλου μέτρου απόστασης. Όπως έχει ήδη εξηγηθεί, αν η διάσταση των στοιχείων προς ταξινόμηση είναι μεγάλη, απαιτείται πολύ μεγάλος αριθμός δείγματος δεδομένων εκπαίδευσης ώστε το δείγμα να είναι όσο το δυνατόν πυκνότερο στο χώρο, για να δώσει ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

Ως προς τον υπολογισμό της απόστασης, να σημειωθεί ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε μέτρο. Ωστόσο, τα ευρέως χρησιμοποιούμενα μέτρα απόστασης είναι η ευκλείδεια απόσταση, η απόσταση Minkowski, η απόσταση Mahalanobis, η απόσταση του συνημίτονου και άλλες. Επομένως, μιας και δεν έχουν όλες οι διαστάσεις των στοιχείων την ίδια διαγνωστική αξία, η χρήση αποστάσεων που δίνουν την ίδια έμφαση σε όλες τις διαστάσεις, όπως για παράδειγμα η ευκλείδεια απόσταση, ή η απόσταση Minkowski, ενδεχομένως να μην είναι κατάλληλες πάντα.



Σχήμα 5-2: Ένα παράδειγμα ταξινόμησης με την χρήση του αλγορίθμου k -NN. Το στοιχείο προς ταξινόμηση (πράσινο) πρόκειται να ταξινομηθεί είτε στην κόκκινη ομάδα είτε στην μπλε. Στην

περίπτωση κατά την οποία $k=3$ (κύκλος με συνεχή γραμμή), τότε θα ταξινομηθεί στην κόκκινη κλάση, ενώ, εάν $k=5$ (κύκλος με στικτή γραμμή), τότε, θα ταξινομηθεί στην μπλε ομάδα.

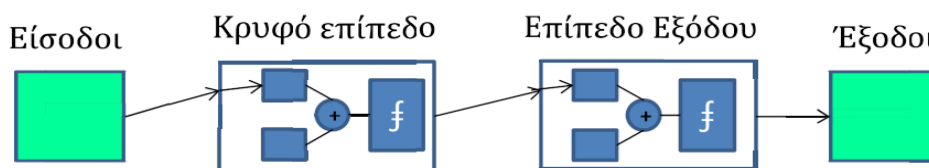
5.1.3 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Στον τομέα της Υπολογιστικής Νοημοσύνης (Computational Intelligence) ανήκει η περίπτωση των ΤΝΔ (Jain et al., 1996). Ως προς τον ορισμό, προτιμάται να γίνει η προσπάθεια απόδοσης της βασικής ιδέας και όχι ενός αυστηρού ορισμού. Επομένως, ΤΝΔ θεωρείται μια αλγοριθμική αρχιτεκτονική δομή που στόχο έχει την επίλυση ενός υπολογιστικού προβλήματος. Ένα ΤΝΔ αποτελείται από υπολογιστικούς κόμβους, τους νευρώνες οι οποίοι είναι διασυνδεδεμένοι μεταξύ τους, ενώ είναι εμπνευσμένο από το ανθρώπινο Κεντρικό Νευρικό Σύστημα. Ο ορισμός επομένως των ΤΝΔ απορρέει από το βιολογικό ανάλογο το οποίο, σε απλοποιημένη μορφή, είναι το εξής: Ο εγκέφαλος αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό διασυνδεδεμένων νευρώνων (νευρικών κυττάρων). Κάθε νευρώνας δέχεται ερεθίσματα ως εισόδους από άλλους νευρώνες μέσω των συνδέσεων (συνάψεων), ερεθίσματα τα οποία επηρεάζουν την κατάσταση του νευρώνα και τον αναγκάζουν να αντιδράσει και να στείλει, με τη σειρά του, ερεθίσματα σε άλλους νευρώνες. Κάθε σύνδεση μεταξύ των νευρώνων χαρακτηρίζεται από μια τιμή ισχύος η οποία υποδηλώνει την ισχύ της αλληλεπίδρασης μεταξύ των νευρώνων.

Το ΤΝΔ αποτελείται από ένα πλήθος διασυνδεδεμένων μονάδων επεξεργασίας, τους τεχνητούς νευρώνες (κόμβους του δικτύου) που δέχονται εισόδους και επιστρέφουν εξόδους. Προκειμένου να εκτελέσει έναν υπολογισμό, ο κάθε κόμβος λαμβάνει υπόψιν τις εισόδους που δέχεται και μεταδίδει τα αποτελέσματα (εξόδους) σε άλλους κόμβους με τους οποίους είναι διασυνδεδεμένος. Ως προς το ανάλογο της ισχύος μεταξύ των βιολογικών νευρώνων, οι τιμές των βαρών των συνδέσεων εμπεριέχουν και αποδίδουν τη γνώση που είναι αποθηκευμένη στο ΤΝΔ και, επομένως, καθορίζουν τη λειτουργικότητά του. Οι συνδέσεις των νευρώνων ενεργοποιούνται όταν οι είσοδοι ξεπεράσουν την τιμή ενός κατωφλίου μιας εξίσωσης ενεργοποίησης (activation function). Αναλυτικότερα, σε κάθε κόμβο του δικτύου ακολουθείται μια συγκεκριμένη σειρά υπολογισμών, η οποία αποτυπώνεται στις παρακάτω λειτουργίες:

- Το σύνολο των κόμβων (νευρώνες)

Οι νευρώνες (neurons ή στοιχεία επεξεργασίας ή κόμβοι) είναι τα σχετικά απλά υπολογιστικά στοιχεία και αποτελούν τα βασικά δομικά στοιχεία των ΤΝΔ, ενώ, τυπικά, κατανέμονται σε επίπεδα (layers). Συμβατικά, οι κόμβοι οι οποίοι δέχονται τα δεδομένα καλούνται μονάδες εισόδου (αποτελούν το επίπεδο εισόδου - input layer), ενώ το επίπεδο που μεταφέρει τα δεδομένα εκτός του ΤΝΔ καλείται επίπεδο εξόδου (output layer). Τα εσωτερικά επίπεδα, στα οποία λαμβάνει χώρα η ενδιάμεση εσωτερική επεξεργασία καλούνται κρυμμένα επίπεδα (hidden layers) (Σχήμα 5-3). Ο αριθμός των μονάδων εισόδου και των νευρώνων εξόδου είναι ίσος με τις μεταβλητές εισόδου και εξόδου αντίστοιχα, ενώ τα κρυμμένα επίπεδα μπορούν να περιέχουν οποιοδήποτε αριθμό νευρώνων. Επίσης, δεν είναι απαραίτητο ότι όλα τα νευρωνικά δίκτυα έχουν κρυμμένα επίπεδα.



Σχήμα 5-3: Βασικό μοντέλο νευρωνικού δικτύου (πηγή: Παπαγεωργάκη, 2012).

- Η κατάσταση ενεργοποίησης

Η κατάσταση του συστήματος σε ένα συγκεκριμένο χρονικό σημείο αναπαρίσταται από την κατάσταση ενεργοποίησης των νευρώνων του δικτύου. Εάν θεωρηθεί ένα πλήθος N νευρώνων, η κατάσταση του συστήματος στον χρόνο t μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα διάνυσμα $\mathbf{a}(t)$ από N πραγματικούς αριθμούς που προσδιορίζουν την κατάσταση ενεργοποίησης των N νευρώνων. Ανάλογα με το μοντέλο του ΤΝΔ, οι τιμές ενεργοποίησης μπορεί να είναι οποιουδήποτε μαθηματικού τύπου (ακέραιος, πραγματικός, μιγαδικός, Boolean, κλπ.).

- Η συνάρτηση εξόδου κάθε νευρώνα

Οι νευρώνες αλληλεπιδρούν μεταφέροντας πληροφορίες/ γνώση στους νευρώνες με τους οποίους είναι διασυνδεδεμένοι. Η ισχύς της αλληλεπίδρασης καθορίζεται από το βαθμό ενεργοποίησής τους. Κάθε νευρώνας διαθέτει μία συνάρτηση εξόδου η οποία καθορίζει την τρέχουσα κατάσταση ενεργοποίησης σε ένα σήμα εξόδου $\mathbf{o}(t)$, ως $\mathbf{o}(t) = f[\mathbf{a}(t)]$. Αυτή η συνάρτηση εξόδου μπορεί να είναι είτε μια συνάρτηση ταυτότητας, $f(x) = x$, με αποτέλεσμα η τρέχουσα τιμή ενεργοποίησης απλά να μεταφέρεται στους επόμενους νευρώνες, είτε κάποιου είδους συνάρτηση κατωφλίου, με αποτέλεσμα ένας νευρώνας να έχει επίδραση σε άλλους νευρώνες μόνον εάν η τιμή ενεργοποίησης υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή. Η τιμή της συνάρτησης εξόδου μπορεί συχνά να επηρεάζεται από ορισμένα συστηματικά σφάλματα (biases), τα οποία καλούνται συστηματικά σφάλματα νευρώνα. Τα σφάλματα αυτά αποτελούν παραμέτρους του νευρωνικού δικτύου και εκφράζονται από το διάνυσμα \mathbf{b} . Η κατάσταση κατά την οποία η συνάρτηση εξόδου είναι ίση με συνάρτηση ταυτότητας αναφέρεται ως «κατάσταση στην οποία δεν χρησιμοποιείται συστηματικό σφάλμα νευρώνα», ενώ, ένα συστηματικό σφάλμα ίσο με 0.50 σημαίνει ότι ως συνάρτηση εξόδου χρησιμοποιείται συνάρτηση κατωφλίου, και, επομένως, το σήμα περνάει μέσω του νευρώνα μόνο εάν η τιμή εισόδου υπερβαίνει την τιμή 0.50.

- Το πρότυπο διασύνδεσης μεταξύ των νευρώνων

Ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται οι νευρώνες μεταξύ τους καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο ένα νευρωνικό δίκτυο θα αντιδράσει σε μια είσοδο. Οι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων ποικίλουν σε ισχύ. Σε πολλές περιπτώσεις, θεωρείται ότι οι εισερχόμενες τιμές από όλους τους νευρώνες απλά πολλαπλασιάζονται με ένα βάρος και αθροίζονται, ώστε να ληφθεί μια ολική είσοδος στον επόμενο νευρώνα. Στην περίπτωση αυτή, το ολικό πρότυπο σύνδεσης μπορεί να εκφραστεί με τον καθορισμό των βαρών του συστήματος, ενώ δεν είναι απαραίτητο ένας νευρώνας να συνδέεται με όλους τους νευρώνες στο επόμενο επίπεδο. Επομένως, μπορεί να προκύψουν μηδενικές τιμές για τα αντίστοιχα βάρη. Τα βάρη αυτά συχνά εκφράζονται με τη χρήση μητρώων. Σε ορισμένες περιπτώσεις μελετών, απαιτούνται περισσότερο περίπλοκα σχήματα σύνδεσης. Ένας δεδομένος νευρώνας μπορεί να δεχτεί εισόδους διαφορετικών ειδών, των οποίων η επίδραση αθροίζεται χωριστά. Στις περιπτώσεις αυτές, είναι καλύτερο να υπάρχουν χωριστά μητρώα σύνδεσης για κάθε τύπο σύνδεσης. Οι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων κατατάσσονται, συχνά, ανάλογα με την κατεύθυνσή τους στη δομή του δικτύου, ως: (α) πρόσθιας τροφοδότησης (feedforward) συνδέσεις, οι οποίες είναι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων σε διαδοχικά επίπεδα και κατευθύνονται από την είσοδο προς την έξοδο, (β) πλευρικών συνδέσεων (lateral), οι οποίες είναι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων στο ίδιο επίπεδο, και (γ) αναδρομικών συνδέσεων (recurrent), οι οποίες είναι συνδέσεις σε νευρώνα προηγούμενου επιπέδου και κατευθύνονται από την έξοδο προς την είσοδο.

- Ο κανόνας διάδοσης, για τη διάδοση των προτύπων των δραστηριοτήτων μέσω του δικτύου των συνδέσεων

Ο κανόνας διάδοσης ενός δικτύου περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζεται η καθαρή είσοδος, $\text{net}(t)$, ενός νευρώνα από τις εξόδους των γειτονικών νευρώνων. Συνήθως, η είσοδος

αυτή είναι το σταθμισμένο άθροισμα των εισόδων στο νευρώνα, δηλαδή, οι έξοδοι των προηγούμενων νευρώνων πολλαπλασιασμένες με τα βάρη \mathbf{W} του αντίστοιχου μητρώου, επομένως ισχύει: \mathbf{W} : $net(t) = \mathbf{W} \cdot \mathbf{o}(t)$, όπου ο πολλαπλασιασμός νοείται ως πολλαπλασιασμός μητρώων.

- Ο κανόνας ενεργοποίησης, για το συνδυασμό των εισόδων σε ένα νευρώνα και της τρέχουσας κατάστασής του, με σκοπό την παραγωγή νέας τιμής του επιπέδου ενεργοποίησης

Ο κανόνας ενεργοποίησης, που συχνά καλείται και συνάρτηση μετάβασης, καθορίζει τη νέα τιμή ενεργοποίησης ενός νευρώνα με βάση την καθαρή είσοδο. Στην περίπτωση στην οποία χρησιμοποιείται μνήμη στον υπολογισμό, περιλαμβάνονται και προηγούμενες τιμές ενεργοποίησης. Η συνάρτηση F , η οποία λαμβάνει το διάνυσμα ενεργοποίησης $\mathbf{a}(t)$ και τα διανύσματα $net(t)$ κάθε διαφορετικού τύπου σύνδεσης, παράγει μια νέα κατάσταση ενεργοποίησης. Η συνάρτηση F μπορεί να πάρει διαφορετικές μορφές, από μια απλή συνάρτηση ταυτότητας, $\mathbf{a}(t) = net(t) = \mathbf{W} \cdot \mathbf{o}(t)$, έως παραλλαγές γραμμικών ή και μη γραμμικών συναρτήσεων, όπως οι σιγμοειδείς. Οι πιο κοινές συναρτήσεις μετάβασης είναι:

Η γραμμική συνάρτηση: $\mathbf{a}(t + 1) = F(net(t)) = \alpha \cdot net(t)$

Η αυστηρού περιορισμού συνάρτηση: $\mathbf{a}(t + 1) = F(net(t)) = \begin{cases} \alpha & \text{if } net(t) < z \\ \beta & \text{if } net(t) \geq z \end{cases}$

Η δυαδική σιγμοειδής συνάρτηση: $\mathbf{a}(t + 1) = F(net(t)) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha \cdot net(t))}$

- Ο κανόνας εκμάθησης (εκπαίδευσης) κατά τον οποίο τα σχήματα σύνδεσης τροποποιούνται βάσει εμπειρίας

Διαδικασία εκμάθησης ή εκπαίδευσης ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία ένα ΤΝΔ «μαθαίνει» τις σχέσεις που εμπεριέχονται μέσα στο δείγμα δεδομένων που του δίνεται. Κατά τη διαδικασία αυτή το νευρωνικό δίκτυο προσαρμόζει τις εσωτερικές του παραμέτρους (τα βάρη, \mathbf{W} , και τα συστηματικά σφάλματα, \mathbf{b} , του κάθε νευρώνα), έτσι ώστε να εκτιμηθούν οι αναγκαίες παράμετροι και, κατ' επέκταση, να εντοπιστούν οι σχέσεις μεταξύ των δεδομένων μέσω της δομής του ΤΝΔ. Ο τρόπος με τον οποίο εκπαιδεύεται ένα ΤΝΔ είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του, αφού οι τιμές των ιδιοτήτων των νευρώνων σχετίζονται άμεσα με τον επιλεγμένο αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση των τιμών των βαρών και των συστηματικών σφαλμάτων των νευρώνων αποκαλείται «αλγόριθμος εκμάθησης» ή «αλγόριθμος εκπαίδευσης». Οι χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο ευρείες κατηγορίες: τους επιτηρούμενους (supervised) και τους μη επιτηρούμενους (unsupervised) αλγόριθμους εκπαίδευσης. Ο αλγόριθμος επιτηρούμενης εκπαίδευσης λειτουργεί όταν ο χρήστης δίνει και επομένως εκπαιδεύει το νευρωνικό δίκτυο με τις τιμές εισόδου και τις τιμές επιθυμητής εξόδου – τιμές στόχους. Το δίκτυο εκτιμά ορισμένες τιμές εξόδου, οι οποίες στη συνέχεια συγκρίνονται με την επιθυμητή έξοδο. Η σύγκριση αυτή καθοδηγεί το νευρωνικό δίκτυο ώστε να δώσει μια καλή λύση. Η επιτηρούμενη εκπαίδευση έχει ξεκάθαρα σχέση με τις διαδικασίες βαθμονόμησης, οι οποίες χρησιμοποιούνται στις συμβατικές μεθόδους μοντελοποίησης. Ο αλγόριθμος μη επιτηρούμενης εκπαίδευσης αναφέρεται στην περίπτωση κατά την οποία, στο νευρωνικό δίκτυο, δεν παρουσιάζονται επιθυμητές τιμές εξόδου, αλλά μόνο οι τιμές εισόδου. Το ΤΝΔ ομαδοποιεί τα δεδομένα εκπαίδευσης βασιζόμενο στις ομοιότητες που εξάγει από τα δεδομένα εισόδου. Το ΤΝΔ δεν επιβλέπεται αναφορικά με τα αποτελέσματα που καλείται να βρει, αλλά αναλαμβάνει να ανακαλύψει τις πιθανές σχέσεις από τα δεδομένα εισόδου και, βασιζόμενο σε αυτές, να κάνει τις προβλέψεις των εξόδων.

- Το περιβάλλον στο οποίο το σύστημα θα πρέπει να λειτουργεί

Το περιβάλλον στο οποίο πρόκειται να εφαρμοστεί ένα ΤΝΔ είναι μια χρονικά μεταβαλλόμενη στοχαστική συνάρτηση, στον χώρο, των εισερχόμενων στοιχείων. Επομένως, σε κάθε χρονική στιγμή, υπάρχει κάποια πιθανότητα, σύμφωνα με την οποία, οποιαδήποτε από τις πιθανές σειρές εισόδου μπορεί να επηρεάσει τις μονάδες εισόδου. Αυτή η συνάρτηση πιθανότητας μπορεί, γενικά, να εξαρτάται από την ιστορία των δεδομένων εισόδου του συστήματος, καθώς και από τις εξόδους του συστήματος (De Vos et al., 2003).

5.2 Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis)

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο περιγράφεται η στατιστική μέθοδος της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών. Η Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (ΑΚΣ; Principal Component Analysis, PCA) είναι μια από τις πιο δημοφιλείς στατιστικές μεθόδους που χρησιμοποιείται σε πολλά επιστημονικά πεδία και μάλλον μια από τις πιο παλιές μεθόδους. Η θεμελιώδης θεώρηση της μεθόδου εντοπίζεται στα πειράματα που πραγματοποίησε ο Francis Galton, και αργότερα περιγράφεται με τις μαθηματικές εκφράσεις των Karl Pearson και George Udny Yule (Hald, 1998· Farebrother, 2022), ενώ η σύγχρονη έκφρασή της μορφοποιήθηκε από τον Harold Hotelling (1933), ο οποίος αναφέρθηκε πρώτος στον όρο κύρια συνιστώσα (principal component).

Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε μόνον για την μείωση του πλήθους των ανεξάρτητων μεταβλητών (μορφομετρικών χαρακτηριστικών) κατά την αδιαμέριστη ταξινόμηση λεκανών.

Η κλασική στατιστική με την Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών έχει ως σκοπό τον προσδιορισμό των κυρίων αξόνων ενός ελλειψοειδούς που παράγεται από μια πολυδιάστατη κανονική κατανομή. Τα τελευταία χρόνια, ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιείται η μέθοδος PCA διαφέρει, καθώς η μέθοδος εφαρμόζεται ως μια τεχνική περιγραφή δεδομένων, στα οποία έχουν εφαρμοστεί βελτιστοποιήσεις ως προς συγκεκριμένα αλγεβρικά και/ή γεωμετρικά μεγέθη, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν υποθέσεις για κατανομές ή στατιστικά μοντέλα.

Η PCA είναι μία μέθοδος μείωσης της αρχικής διάστασης ενός συνόλου δεδομένων, χωρίς, από την άλλη, να υπάρχει σημαντική απώλεια πληροφοριών. Η μέθοδος επιτρέπει την αναδιοργάνωση της πληροφορίας που περιέχουν τα αρχικά δεδομένα σε πίνακες με μικρότερη διάσταση, και, συγχρόνως, παρέχει μια γεωμετρική αναπαράσταση αυτής. Η μέθοδος έχει σκοπό να δημιουργήσει γραμμικούς συνδυασμούς μεταξύ των αρχικών μεταβλητών, οι οποίοι να είναι ασυσχέτιστοι μεταξύ τους, ενώ, παράλληλα, να περιέχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος της διακύμανσης των αρχικών μεταβλητών και να αντιπροσωπεύουν καλύτερα τα δεδομένα. Στόχοι της μεθόδου είναι αρχικά ο εντοπισμός και η εξαγωγή της πιο σημαντικής πληροφορίας από τα αρχικά δεδομένα (μεταβλητές), η ελάττωση/ συμπίεση των αρχικών μεταβλητών, και ο εντοπισμός εκείνων των μεταβλητών που αντιπροσωπεύουν καλύτερα τα αρχικά δεδομένα. Η μέθοδος επιτρέπει τη διατήρησή αυτών των μεταβλητών στα μετέπειτα βήματα επεξεργασίας. Επιμέρους στόχοι της μεθόδου είναι η απλοποίηση των δεδομένων και η ανάλυση της δομής των αρχικών δεδομένων και των μεταβλητών, από τις οποίες αυτά αποτελούνται. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η πρώτη κύρια συνιστώσα που θα εντοπιστεί να περιέχει την μεγαλύτερη δυνατή συνδιακύμανση των μεταβλητών.

Γεωμετρικά, η μέθοδος PCA, μέσα από τους γραμμικούς συνδυασμούς των αρχικών μεταβλητών, δημιουργεί ένα νέο σύστημα συντεταγμένων το οποίο προκύπτει μετά από μετατόπιση και στροφή του παλαιού (αρχικού) συστήματος. Οι νέοι άξονες καθορίζουν τις

κατευθύνσεις που παρουσιάζουν τις μέγιστες μεταβολές των δεδομένων, ενώ παραμένουν ορθογώνιοι.

Κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι χρησιμοποιεί έναν ορθογώνιο μετασχηματισμό και καταφέρνει να μετατρέψει το αρχικό σύνολο δεδομένων, το οποίο περιέχει μεγάλο αριθμό μεταβλητών, πιθανότατα συσχετιζόμενων μεταξύ τους, σε ένα σύνολο με αρκετά λιγότερες μεταβλητές, οι οποίες είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Οι νέες μεταβλητές ονομάζονται κύριες συνιστώσες και είναι γραμμικοί συνδυασμοί των μεταβλητών του αρχικού δείγματος. Ο μετασχηματισμός ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε η πρώτη κύρια συνιστώσα να έχει τη μεγαλύτερη δυνατή διακύμανση ή διασπορά (variance) δηλαδή, να αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος της μεταβλητότητας των αρχικών δεδομένων. Κάθε επόμενη συνιστώσα, με τη σειρά της, αντιστοιχεί στην αμέσως μικρότερη δυνατή διακύμανση με τον επιπλέον περιορισμό να είναι ορθογώνια προς τις προηγούμενες κύριες συνιστώσες που εντοπίστηκαν. Το γεγονός ότι οι κύριες συνιστώσες μεταξύ τους δημιουργούν ένα νέο ορθογώνιο σύστημα, υποδηλώνει ότι οι κύριες συνιστώσες είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους.

Η μέθοδος βασίζεται στη μελέτη των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων του πίνακα διακύμανσης/ συνδιακύμανσης (variance – covariance) των αρχικών μεταβλητών. Οι κύριες συνιστώσες της μεθόδου βρίσκονται από τον υπολογισμό των ιδιοδιανυσμάτων και των αντιστοιχών ιδιοτιμών του πίνακα συνδιακύμανσης, όπως αυτός υπολογίζεται από τα αρχικά δεδομένα. Το ιδιοδιάνυσμα με την μεγαλύτερη ιδιοτιμή είναι η κατεύθυνση της μεγαλύτερης διασποράς και άρα η πρώτη κύρια συνιστώσα.

Ουσιαστικά η μέθοδος PCA, χρησιμοποιεί έναν ορθογώνιο μετασχηματισμό. Στη γραμμική άλγεβρα, ένας ορθογώνιος μετασχηματισμός είναι ένας γραμμικός μετασχηματισμός, όπως ο παρακάτω:

$$T: V \rightarrow V, \quad (5.3)$$

ο οποίος διατηρεί το εσωτερικό γινόμενο. Δηλαδή, για κάθε ζεύγος u, v των στοιχείων του V , ισχύει: $u, v = \langle Tu, Tv \rangle$. Ο μετασχηματισμός εφαρμόζεται για να μετατρέψει ένα σύνολο πιθανώς συσχετισμένων μεταβλητών, σε ένα σύνολο γραμμικά μη συσχετισμένων μεταβλητών που ονομάζονται κύριες συνιστώσες, όπως ήδη ελέχθη.

Ο αριθμός των κύριων συνιστωσών είναι μικρότερος ή ίσος από τον αριθμό των αρχικών μεταβλητών. Όπως ελέχθη, η πρώτη κύρια συνιστώσα έχει τη μεγαλύτερη δυνατή διακύμανση, ενώ κάθε επόμενη κύρια συνιστώσα έχει την αμέσως μικρότερη δυνατή διακύμανση.

Αναλυτικότερα η μέθοδος ακολουθεί τον παρακάτω συλλογισμό. Έστω $\mathbf{X} \in R^{m \times n}$ το σύνολο των αρχικών δεδομένων. Οι στήλες του \mathbf{X} είναι τα n χαρακτηριστικά και οι γραμμές του είναι οι m διαφορετικές μετρήσεις. Ζητείται να εντοπιστεί ένας γραμμικός μετασχηματισμός του πίνακα \mathbf{X} σε έναν πίνακα \mathbf{Y} , έτσι ώστε:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{P}\mathbf{X}, \quad (5.4)$$

όπου $\mathbf{P} \in R^{m \times m}$ κατάλληλος πίνακας. Όπως ειπώθηκε προηγουμένα, ζητείται να βρεθεί ο μετασχηματισμός με τον οποίο εκφράζονται τα αρχικά δεδομένα, έτσι ώστε οι κύριες συνιστώσες της καινούριας βάσης να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Η PCA εξασφαλίζει αυτή την ανεξαρτησία εντοπίζοντας τις διευθύνσεις στις οποίες η διακύμανση των δεδομένων στην αρχική βάση είναι η μέγιστη δυνατή, και έπειτα χρησιμοποιεί αυτές τις διευθύνσεις για να ορίσει την καινούρια βάση. Για να βρεθεί λοιπόν η διακύμανση των δεδομένων, χρησιμοποιείται ο πίνακας συνδιακύμανσης, ή εναλλακτικά χρησιμοποιείται ο πίνακας συσχέτισης, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$C_X = \frac{1}{n-1} \mathbf{X}\mathbf{X}^T, \quad (5.5)$$

όπου \mathbf{X} είναι πια ο πίνακας των κανονικοποιημένων δεδομένων (αφαίρεση της μέσης τιμής). Ο C_X περιέχει, στην κύρια διαγώνιο, τις διακυμάνσεις, ενώ, στα εκτός της κύριας διαγωνίου στοιχεία, περιέχει τις συνδιακυμάνσεις των μεταβλητών. Η συνδιακύμανση είναι το μέτρο το οποίο δείχνει πόσο συσχετίζονται δύο μεταβλητές μεταξύ τους.

Η μέθοδος εφαρμόστηκε στο περιβάλλον του προγράμματος MatLab. Αναλυτικότερα, τα βήματα που ακολουθούνται για την επεξεργασία των αρχικών δεδομένων με την μέθοδο PCA παρουσιάζονται παρακάτω:

- Συλλογή των αρχικών δεδομένων
- Κανονικοποίηση των αρχικών δεδομένων (διαδικασία που παράγει ένα σύνολο δεδομένων με μέσο όρο ίσο με το μηδέν)
- Υπολογισμός του πίνακα συνδιακύμανσης
- Υπολογισμός των ιδιοδιανυσμάτων και των ιδιοτιμών του πίνακα συνδιακύμανσης

Καθώς ο πίνακας συνδιακύμανσης είναι τετραγωνικός, είναι δυνατός ο υπολογισμός των ιδιοτιμών (eigenvalues) και των ιδιοδιανυσμάτων (eigenvectors). Η ανάλυση των τιμών που εμφανίζονται στον πίνακα συνδιακύμανσης είναι σημαντική, καθώς μπορούν να διακριθούν χρήσιμες πληροφορίες για τις σχέσεις μεταξύ των αρχικών μεταβλητών.

- Επιλογή των ιδιοδιανυσμάτων για να εξαχθεί το διάνυσμα των χαρακτηριστικών (feature vector)

Σε αυτό το σημείο εντάσσεται η έννοια της συμπίεσης των αρχικών μεταβλητών και της μείωσης της διάστασης των αρχικών δεδομένων. Το ιδιοδιάνυσμα με την μεγαλύτερη ιδιοτιμή είναι η κύρια συνιστώσα (principal component) του συνόλου των μεταβλητών. Επομένως, όταν υπολογίζονται τα ιδιοδιανύσματα από τον πίνακα συνδιακύμανσης, το επόμενο βήμα είναι η τοποθέτησή τους σε φθίνουσα σειρά σύμφωνα με τις αντίστοιχες τιμές των ιδιοτιμών, καθώς η διάταξη επιτρέπει την εμφάνιση όλων των μεταβλητών κατά σειρά σπουδαιότητας. Στο σημείο αυτό, οι λιγότερο σημαντικές μεταβλητές είναι πιθανόν να εξαιρεθούν από την μετέπειτα διαδικασία, και, επομένως, ένα μικρό μέρος της αρχικής πληροφορίας αγνοείται ως μη σημαντικό. Παραδείγματος χάριν, εάν τα αρχικά δεδομένα είναι n διαστάσεων και υπολογίζονται n ιδιοτιμές και ιδιοδιανύσματα και στη συνέχεια επιλέγονται p ιδιοδιανύσματα, όπου $p < n$, τότε οι τελικές μεταβλητές θα είναι λιγότερες σε σχέση με τις αρχικές. Το διάνυσμα των χαρακτηριστικών (feature vector) ορίζεται μέσα από τα ιδιοδιανύσματα που τελικά επιλέγονται να παραμείνουν στη διαδικασία (όπου $p < n$). Το διάνυσμα των χαρακτηριστικών έχει την παρακάτω μορφή:

FeatureVector = [eig₁ eig₂ ... eig_p].

- Υπολογισμός του τελικού μοντέλου ή της τελικής εξίσωσης του μοντέλου

Το πλήθος των τελικών ασυσχέτιστων μεταβλητών περιγράφεται από την εξίσωση του μοντέλου PCA. Το τελευταίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά, στη πρόγνωση των τιμών της υπό διερεύνηση μεταβλητής, μέσω της εξίσωσής του.

- Εφαρμογή του μοντέλου για πρόγνωση των τιμών των αρχικών δεδομένων (προαιρετικό στάδιο)

Μετά από την μείωση/ συμπίεση των αρχικών δεδομένων και την εκτίμηση της εξίσωσης του μοντέλου, μπορεί να εφαρμοστεί η αντίστροφη διαδικασία της πρόβλεψης των τιμών της υπό

διερεύνηση μεταβλητής. Οι νέες μοντελοποιημένες τιμές (από πρόβλεψη) της εξαρτημένης μεταβλητής μπορούν να συγκριθούν με τις αρχικές τιμές της μεταβλητής και επομένως να υπολογιστούν τα σφάλματα από τη διαδικασία της εφαρμογής της εξίσωσης του μοντέλου της PCA (ή από τη συμπίεση των αρχικών δεδομένων).

5.3 Εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου με χρήση της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης

5.3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Σήμερα, που η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει βοηθήσει στην συλλογή δεδομένων με τηλεπισκοπική παρατήρηση, τα ΨΜΕ καλύπτουν πλέον μεγάλο ποσοστό της γήινης επιφάνειας, και διευκολύνουν τη μελέτη του γήινου αναγλύφου των λεκανών απορροής. Η εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από τα ΨΜΕ είναι μια κλασική υδρολογική διαδικασία, που έχει, ως βασικό κριτήριο που επηρεάζει το ανάπτυγμα και το σχήμα του υδρογραφικού δικτύου και την παράμετρο της ανάντη έκτασης που χρησιμοποιείται ως κατώφλι.

Ως προς τους υδρολογικούς μηχανισμούς που δρουν, στην κεφαλή του υδρογραφικού δικτύου που αντιπροσωπεύει το κρίσιμο σημείο μεταξύ των συνθηκών που ισχύουν επί της πλαγιάς και εκείνων στο υδρογραφικό δίκτυο, οι παράγοντες που συμβάλλουν στην έναρξη του υδρογραφικού δικτύου μπορούν να περιγραφούν από θεωρίες που εξηγούν τις συνθήκες ανάπτυξης των συνθηκών τόσο της πλαγιάς όσο και του υδρογραφικού δικτύου. Επίσης, πολλές από τις ιδιότητες του υδρογραφικού δικτύου μπορούν να προβλεφθούν μέσα από την τοπογραφία, μολονότι δεν ισχύει το ίδιο για τις κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου, των οποίων οι θέσεις δεν μπορούν να εντοπιστούν. Ως προς τους μηχανισμούς που συμβάλλουν και μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό των θέσεων των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου, να σημειωθεί ότι οι κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου ελέγχονται χωρικά από τις δύο συνθήκες που ανταγωνίζονται η μία την άλλη και δεν είναι άλλες από την ποτάμια μεταφορά, η οποία συμβαίνει στο υδρογραφικό δίκτυο, και την μεταφορά φερτών υλών, η οποία συμβαίνει στις πλαγιές (Casagli and Catani, 1998· Gallant, and Dowling, 2003).

Ως προς τους μηχανισμούς, τρεις βασικές συνθήκες είναι αυτές που μπορούν να συμβάλλουν στην πρόβλεψη των θέσεων των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου και αυτές είναι (1) δημιουργία εδαφοτομής λόγω κορεσμού του εδάφους από την επίγεια ροή (Kirkby and Chorley, 1967), (2) διάβρωση λόγω διήθησης (Dunne, 1980), και (3) αβαθείς γεωλισθήσεις (Dietrich et al., 1986). Οι δε μηχανισμοί αυτοί εμφανίζονται σε συγκεκριμένες περιοχές του αναγλύφου και μπορούν να εντοπιστούν μέσω μελέτης του αναγλύφου. Η επίγεια ροή λόγω κορεσμού είναι πιθανώς πιο σημαντική σε ήπιες πλαγιές, ενώ η διάβρωση και η γεωλίσθηση θα πρέπει να κυριαρχούν σε απότομες πλαγιές όπου η επίγεια ροή λόγω κορεσμού είναι σπάνια ή απουσιάζει.

Ως προς τον εντοπισμό των κεφαλών, όμως, οι θεωρίες φυσικής βάσης, για πρόβλεψη της ανάντη έκτασης που αποδίδεται στις κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου συμβάλλουν με συνεπή τρόπο στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου και παρέχουν σύνδεση μεταξύ των διεργασιών που συμβαίνουν επί της πλαγιάς και της θέσης του υδρογραφικού δικτύου.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τη μελέτη της βιβλιογραφίας, τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου, είναι συγκεκριμένων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων και θεωρητικού υπόβαθρου. Λαμβάνοντας υπόψη την ευαισθησία της

υδρολογικής απόκρισης μιας λεκάνης απορροής στα χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου, είναι σημαντικό να οριστεί με ακρίβεια το υδρογραφικό δίκτυο (Tarboton et al., 1991· Freeze, 1974). Η ανάντη έκταση είναι μια παράμετρος η οποία σχετίζεται με την κλίμακα της λεκάνης απορροής και καθορίζει το μήκος του υδρογραφικού δικτύου (Tarboton et al., 1991). Τα μειονεκτήματα της εφαρμογής ενός σταθερού, και πολύ συχνά αυθαίρετα ορισμένου, κατώφλιου, περιεγράφηκαν σε προηγούμενες παραγράφους, επομένως, γίνεται προσπάθεια να αντιμετωπιστούν λαμβάνοντας υπόψιν την έννοια του χρόνου και της εποχικότητας των υδρολογικών διεργασιών.

Η μελέτη και η κατανόηση της σχέσης μεταξύ της επιφανειακής απορροής και του υδρογραφικού δικτύου οδήγησε στον ορισμό της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης ως ενός κρίσιμου στοιχείου που αναπόφευκτά επιλέγεται από τους μελετητές κατά τη διαδικασία της εξαγωγής του δικτύου από δεδομένα ΨΜΕ. Η επιλογή μίας σταθερής τιμής της ΑΣΕ, ανεξάρτητης τόσο χωρικά (σε σχέση με την περιοχή μελέτης) όσο και χρονικά (σχετικά με την περίοδο μελέτης), συνηθίζεται τα τελευταία χρόνια σε πληθώρα εργασιών (Band, 1986· Morris and Heerdegen, 1988· Tarboton et al., 1988). Όπως ήδη αναφέρθηκε, κατά την επιλογή της τιμής ΑΣΕ, η διακύμανσή της στο χρόνο και στο χώρο συνήθως αγνοείται, μιας και επιλέγεται μια σταθερή τιμή. Επομένως, η επιλογή της ΑΣΕ η οποία αποτελεί μια διαφορετική έκφραση της ανάντη έκτασης, ως κρίσιμου στοιχείου για τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου, είναι αναπόφευκτο βήμα.

Στην παρούσα διατριβή, η ανάντη έκταση, τα νερά της οποίας απορρέουν σε μια κεφαλή του υδρογραφικού δικτύου ορίζεται ως η ΑΣΕ ή Critical Support Area (CSA). Η Ανάντη Συμβάλλουσα Έκταση συχνά επιλέγεται ως σταθερή ποσότητα, χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η διακύμανσή της στο χώρο και στο χρόνο. Η παρούσα προσέγγιση εισάγει για πρώτη φορά τη χρονική κλίμακα στον προσδιορισμό της ΑΣΕ λαμβάνοντας υπόψη ένα μη στατικό υδρογραφικό δίκτυο. Το κίνητρό για την μελέτη της χωροχρονικής κατανομής της ΑΣΕ ήταν το γεγονός ότι, πολύ συχνά, το ανάπτυγμα του υδρογραφικού δικτύου που απεικονίζεται στους χάρτες είναι υπερεκτιμημένο (Papageorgaki and Nalbantis, 2018), γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται μέσω της γνώσης της φυσικής (πραγματικής) κατανομής του υδρογραφικού δικτύου σε γνωστές λεκάνες απορροής στον ελλαδικό χώρο.

Η διερεύνηση της παραπάνω σχέσης αναμένεται να συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση, μελέτη και πρόβλεψη υδρολογικών γεγονότων. Σκοπός αυτής της μεθόδου που προτείνεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή είναι η διερεύνηση της ΑΣΕ και η μοντελοποίηση της διακύμανσής της τόσο στο χρόνο όσο και στο χώρο, ενώ ακολουθεί στην επόμενη παράγραφο η ανάλυση της προσπάθειας να εντοπιστεί η θέση των κεφαλών μέσω της χρήσης γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών.

5.3.2 Προταθείσα μέθοδος εκτίμησης της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης (Critical Support Area)

Στόχος του εδαφίου είναι η ανάπτυξη της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της ΑΣΕ και η συνοπτική περιγραφή των δεδομένων και των αναλυτικών βημάτων που ακολουθήθηκαν για την ποσοτικοποίηση της ΑΣΕ. Συνοπτικά, ως προς τη μεθοδολογία που ακολουθείται αναφέρεται ότι, στην προταθείσα μεθοδολογία αξιοποιείται το υδρογραφικό δίκτυο, που προέρχεται από συμβατικούς τοπογραφικούς χάρτες σε συνδυασμό με το υδρογραφικό δίκτυο που προέρχεται από ΨΜΕ. Το υδρογραφικό δίκτυο που προέρχεται από τους χάρτες περιλαμβάνει τόσο τα μόνιμα όσο και τα εφήμερα ή εποχιακά ρεύματα. Οι τιμές της ΑΣΕ υπολογίζονται για τις κεφαλές τόσο των μόνιμων όσο και των εφήμερων ρευμάτων, ενώ στη συνέχεια, διερευνάται η χωρική κατανομή της ΑΣΕ. Η χρονική διακύμανση της ΑΣΕ

διερευνάται υιοθετώντας δύο εποχές σε κάθε υδρολογικό έτος: (i) την υγρή περίοδο, κατά την οποία λαμβάνονται υπόψη τόσο τα μόνιμα όσο και τα εφήμερα ρεύματα, και ii) την ξηρή περίοδο, κατά την οποία θεωρείται ότι υπάρχουν μόνο οι μόνιμοι κλάδοι του δικτύου. Να σημειωθεί ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα της εφαρμογής της προταθείσας μεθοδολογίας σε λεκάνες απορροής του ελλαδικού χώρου παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7. Στόχος της μεθοδολογία που προτείνεται είναι η χρήση του ΨΜΕ για τον εντοπισμό των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου σε λεκάνες απορροής ποταμών σε δύο χρονικές περιόδους μετά την εφαρμογή κατάλληλης τιμής ΑΣΕ.

Χρησιμοποιήθηκαν χάρτες κλίμακας 1/ 50.000 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού, στους οποίους παρουσιάζεται και διαχωρίζεται με διαφορετικό σύμβολο το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης σε μόνιμο και εφήμερο υδρογραφικό δίκτυο. Επίσης, το ΨΜΕ που χρησιμοποιείται με χωρική ανάλυση (μέγεθος κελιού) 30 m, παρέχεται από δεδομένα της διαστημικής αποστολής Global Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) και η ακρίβεια της υψομετρικής πληροφορίας η οποία παρέχεται μέσα από το συγκεκριμένο ΨΜΕ, εκτιμάται από άλλες μελέτες και θεωρείται κατάλληλη για το σκοπό της παρούσας μελέτης. Επομένως, όπως γίνεται αντιληπτό, αρκεί η χρήση μόνο τοπογραφικής πληροφορίας η οποία παρέχεται από δύο διαφορετικά σύνολα δεδομένων. Ως δεδομένο αναφοράς, στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, χρησιμοποιούνται οι τοπογραφικοί χάρτες.

Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας είναι απαραίτητη η οργάνωση και η επεξεργασία των αρχικών δεδομένων εφαρμόζοντας γνωστές διαδικασίες. Ουσιαστικά πρόκειται για προεργασία για μετέπειτα ανάλυση των χωρικών δεδομένων, και για τον λόγο αυτό, γίνεται σύντομη περιγραφή των υπολογιστικών διαδικασιών. Να σημειωθεί ότι η επεξεργασία των διαφορετικών συνόλων δεδομένων (datasets) των αρχικών χωρικών δεδομένων και η εφαρμογή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε έγινε με χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS). Η κυρίως επεξεργασία των χωρικών δεδομένων στο GIS έγινε με υλοποίηση των βημάτων της μεθοδολογίας σε μορφή μοντέλου στο περιβάλλον ModelBuilder, καθώς πολλές από τις διαδικασίες που ακολουθήθηκαν είναι επαναληπτικές. Όλα τα σύνολα δεδομένων (συμβατικοί χάρτες σε κλίμακα 1:50000 και δεδομένα υψομέτρων, υπό τη μορφή του SRTM DEM) προβάλλονται στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων, και συγκεκριμένα το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ '87), έτσι ώστε να περιορίζονται τα σφάλματα και να επιτρέπεται σύγκριση μεταξύ της θέσης των διαφόρων οντοτήτων. Είναι απαραίτητη η προεπεξεργασία των δεδομένων από το SRTM DEM, ώστε να διασφαλίζεται ότι τα βυθίσματα που υπάρχουν στο ΨΜΕ, και οι επίπεδες περιοχές θα διορθωθούν υψομετρικά, ή αλλιώς, «θα γεμίσουν», σύμφωνα με το μικρότερο υψόμετρο των κοντινότερων κελιών. Έτσι, το νερό που θα φτάσει σε περιοχές θα απορρέει στο κελί της εξόδου της λεκάνης απορροής μέσω μιας αδιάλειπτης διαδρομής.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, περιλαμβάνει πέντε βήματα τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια.

Το Βήμα 1 περιλαμβάνει την ψηφιοποίηση των κεφαλών των μόνιμων και εφήμερων εποχικών κλάδων του υδρογραφικού δικτύου των εξεταζόμενων λεκανών απορροής, πάνω στους συμβατικούς τοπογραφικούς χάρτες, που έχουν γεωαναφερθεί στο επιλεγέν σύστημα αναφοράς.

Στο Βήμα 2 εφαρμόζεται χωρική διόρθωση στις πληροφορίες που είναι σχετικές με τη θέση των κεφαλών, καθώς, οι τελευταίες, μεταφέρονται από το υδρογραφικό δίκτυο, που περιγράφεται στο χάρτη, πάνω στο υδρογραφικό δίκτυο που έχει προκύψει με βάση το ΨΜΕ. Η μεταφορά γίνεται με χρήση μιας διαδικασίας ελεγχόμενης έλξης και επικόλλησης (snapping).

Η ανάγκη για αυτήν τη διαδικασία διόρθωσης προκύπτει από σφάλματα που υφίστανται από τη γεωαναφορά των χαρτών και τη πεπερασμένη ικανότητα του ΨΜΕ να αποδώσει με ακρίβεια και ορθότητα την τοπογραφία του αναγλύφου της λεκάνης απορροής (κορυφογραμμές και μισγάγγειες). Η διαδικασία εξασφαλίζει τη διόρθωση της τοπολογίας των θέσεων των κεφαλών, δηλαδή την μεταφορά τους σε κελιά με υψηλή τιμή στο κάναβο της συγκεντρωτικής ροής, δηλαδή κελιά πάνω στο το υδρογραφικό δίκτυο.

Αυτό το βήμα εφαρμόζεται δύο φορές, μία φορά για κάθε εποχή, χρησιμοποιώντας μια διαδικασία μετατροπής της μορφής των δεδομένων από τη διανυσματική μορφή (vector) σε κανονικοποιημένη μορφή (raster). Για όλα τα κελιά που επιλέχθηκαν ως κεφαλές, ορίζεται η ΑΣΕ και υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές των υπόλοιπων χαρακτηριστικών.

Για κάθε κεφαλή του υδρογραφικού δικτύου, για τις δύο εποχές, υπολογίζονται και αποδίδονται οι τιμές των μορφομετρικών χαρακτηριστικών για την ανάντη έκταση που συμβάλλει σε κάθε κεφαλή, βάσει των δεδομένων από το SRTM DEM.

Οι παραπάνω τιμές των μορφομετρικών χαρακτηριστικών αποτελούν μια περιγραφική ιδιότητα στον πίνακα των κεφαλών, μαζί με τις θέσεις τους εντός του GIS. Σε αυτή την εφαρμογή, η ΑΣΕ για κάθε κεφαλή του υδρογραφικού δικτύου εκτιμάται από το SRTM DEM και υπολογίζεται ως το πλήθος των κελιών που συνεισφέρουν με μια μοναδιαία ποσότητα νερού στη συγκεκριμένη κεφαλή του δικτύου. Η τιμή της ΑΣΕ αποδίδεται σε κάθε κεφαλή του υδρογραφικού δικτύου ως μια περιγραφική ιδιότητα μαζί με τα προαναφερθέντα μορφομετρικά χαρακτηριστικά που υπολογίζονται για την ίδια ανάντη συμβάλλουσα έκταση και αποθηκεύεται στον πίνακα των κεφαλών. Για να γίνει έλεγχος πλεονασμού στα μορφομετρικά χαρακτηριστικά που αφορούν κάθε κεφαλή, υπολογίζονται οι συντελεστές συσχέτισης (cross-correlation coefficients) και, στη συνέχεια, εφαρμόζεται Ανάλυση Παλινδρόμησης (Regression Analysis). Οι συναρτήσεις που είναι απαραίτητες για την ανάλυση υλοποιούνται εντός του μαθηματικού πακέτου MatLab. Εξετάζονται μόνο γραμμικές σχέσεις με στόχο, από την Ανάλυση Παλινδρόμησης, να διερευνηθεί η σχέση μεταξύ των μορφομετρικών χαρακτηριστικών των κεφαλών και της τιμής της ΑΣΕ, και να δημιουργηθεί ένα μοντέλο που να συνοψίζει την γνώση που αποκομίζεται από τη μελέτη της σχέσης των μεταβλητών. Εκτός από τη μελέτη του πλήρους δείγματος των κεφαλών, στην Ανάλυση Παλινδρόμησης έγινε και επιπλέον μελέτη, μετά από ανίχνευση και αφαίρεση των ακραίων τιμών του δείγματος, με την ελπίδα, η επεξεργασία αυτή, να βελτιώσει την ποιότητα του τελικού μοντέλου.

Στο Βήμα 3 αξιολογούνται τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά που περιγράφονται στο Υποκεφάλαιο 3.2, τα οποία χρησιμεύουν αργότερα ως ανεξάρτητες μεταβλητές στην Ανάλυση Παλινδρόμησης που θα προγραμματιστεί για κάθε εποχή ξεχωριστά. Το Βήμα 4, εκτελείται η Ανάλυση Παλινδρόμησης, όπου η ΑΣΕ είναι η εξαρτημένη μεταβλητή, και τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά του Βήματος 2 είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές. Ο έλεγχος, για το αν είναι στατιστικά σημαντικό το αποτέλεσμα της παλινδρόμησης πραγματοποιείται εφαρμόζοντας το γνωστό F-test. Στην εφαρμογή, υπολογίζονται ο συντελεστής R^2 , η τιμή F-statistic και η πιθανότητα υπέρβασης, (significance of F), η οποία στη συνέχεια συγκρίνεται με μια πολύ μικρή τιμή ενός ορίου.

Η διαδικασία του Βήματος 4, εφαρμόζεται σε δεδομένα από λεκάνες απορροής του ελλαδικού χώρου (τα αριθμητικά αποτελέσματα περιγράφονται στο Κεφάλαιο 7). Όπως σε όλα τα προηγούμενα βήματα, το Βήμα 4, εκτελείται, επίσης, δύο φορές, δηλαδή ξεχωριστά για κάθε εποχή. Εκτελείται επίσης, για δύο διαφορετικές δοκιμές, με ή χωρίς την αφαίρεση των ακραίων τιμών του συνόλου των δεδομένων. Επίσης, η διάμεσος τιμή των τιμών της ΑΣΕ, που προέρχεται από τις κεφαλές που έχουν εντοπιστεί στο χάρτη, χρησιμοποιείται ως η απλούστερη

επιλογή μιας τιμής ΑΣΕ, για τη μοντελοποίηση του υδρογραφικού δικτύου (Papageorgaki and Nalbantis 2018· Papageorgaki and Nalbantis, 2017).

Στο Βήμα 5 της μεθοδολογίας, επιλέγονται οι τελικές τιμές της ΑΣΕ για κάθε λεκάνη και αξιολογούνται σύμφωνα με τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά που εξαρτώνται μετά την εφαρμογή της τιμής της ΑΣΕ, σε όλη τη λεκάνη απορροής. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα της εφαρμογής της ΑΣΕ στις λεκάνες απορροής παρουσιάζονται στο κεφάλαιο της αντίστοιχης εφαρμογής (Κεφάλαιο 7).

5.3.3 Εκτίμηση της σχέσης μεταξύ της ΑΣΕ και των μορφομετρικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής - Ανάλυση Παλινδρόμησης

Στην Υδρολογία, η έκταση της λεκάνης απορροής είναι εκείνη η πληροφορία που είναι απαραίτητη για μια πρώτη πρόχειρη εκτίμηση πολλών υδρολογικών παραμέτρων και, σε έναν βαθμό, της υδρολογικής συμπεριφοράς μιας λεκάνης απορροής. Είναι γνωστό, επομένως, ότι οι περισσότερες υδρολογικές παράμετροι είναι άμεσα και στενά εξαρτώμενες από την έκταση της λεκάνης απορροής. Οι Leopold και Miller (1956), στηριζόμενοι στην αρχική ιδέα των λόγων του Horton, διαπίστωσαν ότι ο λογάριθμος (log) πολλών υδραυλικών μεταβλητών αποτελεί γραμμική σχέση της έκτασης της λεκάνης απορροής. Επιπλέον επιβεβαιώνεται εμπειρικά από τις εργασίες των Leopold and Miller, (1956) και Leopold et al. (1964) ότι η κλίση του εδάφους (S) σχετίζεται με την ανάντη έκταση (A), σύμφωνα με τη σχέση:

$$S = CA^{-\theta} \quad (5.6)$$

όπου C και θ είναι παράμετροι.

Αν και ο κύριος στόχος είναι η πρόβλεψη των θέσεων των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιώντας γεωμορφολογικές μεταβλητές, τα αποτελέσματα της μελέτης, είναι χρήσιμα σε εφαρμογές άλλων επιστημονικών πεδίων. Μια πολλά υποσχόμενη ερευνητική οδό προς την καλύτερη γνώση των υδρολογικών διεργασιών, μπορεί να αποτελέσει η διερεύνηση της επίδρασης της ΑΣΕ στο ανάπτυγμα του υδρογραφικού δικτύου, και στους υδρολογικούς δείκτες που σχετίζονται με την εκτίμηση της απορροής. Παραδείγματος χάριν, η προτεινόμενη μεθοδολογία, για εξαγωγή ενός αξιόπιστου υδρογραφικού δικτύου μπορεί στη συνέχεια, να χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση δεικτών, όπως του stream power index, ενός δείκτη που εκφράζει τη δυνατότητα μεταφοράς ιζήματος των κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου και τη χωρική κατανομή του ενεργειακού δυναμικού (Tetford et al., 2017). Ένα άλλο παράδειγμα είναι η επίδραση του κατωφλίου, που εφαρμόζεται για εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από ΨΜΕ και την εν συνεχεία εκτίμηση του δείκτη HAND. Ο δείκτης αυτός ορίστηκε στο εδάφιο 3.2.5. Η εφαρμογή του κατωφλίου επηρεάζει τον δείκτη HAND και τον καθιστά ευαίσθητο στη επιλεγόμενη τιμή. Η τιμή του κατωφλίου ορίζεται διαφορετικά από περιοχή μελέτης σε περιοχή μελέτης και εξαρτάται από την έκταση της λεκάνης απορροής και από το μέγεθος του κελιού του ΨΜΕ. Οι Renno et al. (2008), διαπίστωσαν ότι μικρές αλλαγές στην τιμή του κατωφλίου, δεν επηρεάζουν πάντα τη διαδικασία εξαγωγής, ούτε επηρεάζουν την ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου, ενώ μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές του κατωφλίου, παράγουν μεγαλύτερης ή μικρότερης ιεράρχησης υδρογραφικό δίκτυο, γεγονός που έχει επίδραση στο δείκτη HAND.

Οι υδρολογικοί δείκτες στους οποίους βιβλιογραφικά φαίνεται να επιδρά η χωρική κατανομή του υδρογραφικού δικτύου, είναι οι: η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, ο δείκτης HAND (Gharari et al., 2011· Nobre et al., 2011· Papageorgaki και Nalbantis, 2013· Rahmati et al., 2018), ο τοπογραφικός δείκτης υγρασίας (topographic wetness index) (Ambroise et al., 1996· Papageorgaki and Nalbantis, 2016· Liang and Chan, 2017), ο δείκτης ισχύος ρέματος (stream

power index) (Moore et al., 1992· Townsend et al., 2003) και ο δείκτης μεταφοράς ιζημάτων (sediment transport index) (De Roo, 1998). Ενδείξεις οι οποίες υποδεικνύουν τη δυνατότητα απόκτησης νέας γνώσης από τη διερεύνηση της επίδρασης του υδρογραφικού δικτύου είναι: (i) η συσχέτιση μεταξύ του υδρογραφικού δικτύου και των διεργασιών των υπόγειων υδάτων, με την έννοια ότι η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου υποδεικνύει έμμεσα το δυναμικό των υπόγειων υδάτων μιας περιοχής (Sedhuraman et al., 2014· Falah et al., 2017), (ii) η πιθανή σχέση μεταξύ της διαδικασίας μεταφοράς ιζήματος και των διεργασιών που προκαλεί το νερό, στις κυρτές και συγκλινουσες γεωμορφές του εδάφους (Montgomery and Dietrich, 2002), (iii) το γεγονός ότι έχει μοντελοποιηθεί η ισχύς της διάβρωσης λόγω επιφανειακής απορροής ως συνάρτησης της απόστασης επί πλαγιάς (Dabney et al., 2011).

Η σημαντικότητα των κριτηρίων που επιλέγονται για τον καθορισμό του υδρογραφικού δικτύου, αναδύεται από τη μελέτη των επιπτώσεων της επιλογής αυτής, σε φυσικές διεργασίες στην λεκάνη απορροής. Βιβλιογραφικά, αναφέρεται πως η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου αποτελεί το βασικό κριτήριο, με το οποίο αναγνωρίζεται το σημείο εκείνο μεταξύ δύο φυσικών διαδοχικών καταστάσεων (δύο διαφορετικών επικρατούντων μηχανισμών), όπου οι σταθερές διεργασίες μεταφοράς/διάχυσης (π.χ. διαδικασίες μεταφοράς αλλουβιακών φερτών υλικών) διαδέχονται τις ασταθείς διεργασίες σχηματισμού του υδρογραφικού δικτύου. Το σημείο μεταξύ των δύο διαδοχικών καταστάσεων αποτελεί την κεφαλή του υδρογραφικού δικτύου. Για παράδειγμα, ο ρυθμός μεταφοράς του ιζήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ανάντη έκταση, ενώ η σταθερότητα κατάντη προκύπτει λόγω της κύριας εξάρτησης από την κλίση. Επομένως, η διερεύνηση της σχέσης, μεταξύ της έκτασης ανάντη των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου και των μορφομετρικών χαρακτηριστικών, όπως η κλίση, είναι αναγκαία και βαρύνουσα σημασίας για τις διεργασίες που επιτελούνται.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι αναζητούνται σχέσεις μεταξύ της ΑΣΕ και των διαφόρων μορφομετρικών χαρακτηριστικών της ανάντη συμβάλλουσας έκτασης, με σκοπό τον εύκολο προσδιορισμό της ΑΣΕ σε πρακτικές εφαρμογές. Για τον προσδιορισμό αυτό λαμβάνονται υπόψη τυπικά μορφομετρικά χαρακτηριστικά τα οποία εξάγονται εύκολα από το ΨΜΕ. Αυτά περιλαμβάνουν: (1) τη μέση κλίση του εδάφους, (2) την τυπική απόκλιση της κλίσης του εδάφους, (3) τη μέση τιμή της τετραγωνικής ρίζας της κλίσης του εδάφους, (4) την τυπική απόκλιση της τετραγωνικής ρίζας της κλίσης του εδάφους, (5) τη μέση τιμή του δείκτη HAND, και (6), την τυπική απόκλιση του δείκτη HAND. Υπενθυμίζεται ότι όλες οι τιμές των παραπάνω μεγεθών αναφέρονται στην ανάντη συμβάλλουσα έκταση.

Επιπλέον, να σημειωθεί ότι το υδρογραφικό δίκτυο θεωρείται δυναμικό και, στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, οι υπολογισμοί αναφέρονται σε δύο καταστάσεις: η πρώτη αφορά την υγρή περίοδο του υδρολογικού έτους και η δεύτερη αφορά την ξηρή περίοδο. Το ανάπτυγμα του υδρογραφικού δικτύου για κάθε εποχή καθορίζεται πλήρως από τη θέση των κεφαλών αυτού.

Το υδρογραφικό δίκτυο αναφοράς προέρχεται από τον συμβατικό χάρτη ο οποίος περιλαμβάνει τόσο τα μόνιμα όσο και τα εφήμερα ή εποχιακά ρεύματα. Οι τιμές της ΑΣΕ υπολογίζονται για τις κεφαλές τόσο των μόνιμων, όσο και των εφήμερων ρευμάτων, ενώ, στη συνέχεια, διερευνάται η χωρική κατανομή της ΑΣΕ μέσω των σχέσεων αυτής και των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών.

Η υιοθέτηση διαφορετικής σταθερής τιμής της ΑΣΕ για την ξηρή και την υγρή περίοδο του έτους προτείνεται για πρώτη φορά και έχει δημοσιευτεί (Parageorgaki and Nalbantis, 2017· Parageorgaki and Nalbantis, 2018· Παπαγεωργάκη και Ναλμπάντης, 2017). Με την προσέγγιση τότε έγινε προσπάθεια να διερευνηθεί η χρονική διακύμανση της ΑΣΕ. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της διερεύνησης των θέσεων των κεφαλών του υδρογραφικού

δικτύου για τις δύο εποχές του υδρολογικού έτους, παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7. Στα αποτελέσματα περιλαμβάνονται και οι διερευνήσεις των σχέσεων μεταξύ της ΑΣΕ και των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών με χρήση της μεθόδου της Ανάλυσης Παλινδρόμησης η οποία παρουσιάζεται στη συνέχεια.

5.4 Ανάλυση Παλινδρόμησης

Με την Ανάλυση Παλινδρόμησης (Regression Analysis) εξετάζεται η σχέση μεταξύ δύο ή περισσότερων μεταβλητών με απώτατο σκοπό την πρόβλεψη των τιμών της μιας μεταβλητής, μέσω των τιμών της άλλης (ή των άλλων). Η Ανάλυση Παλινδρόμησης είναι ένα σύνολο στατιστικών διαδικασιών που στοχεύουν την εκτίμηση και αξιολόγηση της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών με βάση ένα σύνολο δεδομένων.

Σε ένα μοντέλο παλινδρόμησης διακρίνονται δύο είδη μεταβλητών: οι ανεξάρτητες ή ελεγχόμενες ή επεξηγηματικές (independent ή explanatory variables, ή predictors) και οι εξαρτημένες ή μεταβλητές απόκρισης (dependent ή response variables). Η Ανάλυση Παλινδρόμησης είναι μια στατιστική τεχνική μοντελοποίησης της συμπεριφοράς των μεταβλητών, η οποία διερευνά τη σχέση μεταξύ μιας εξαρτημένης μεταβλητής (Y) και μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων ή επεξηγηματικών μεταβλητών (X). Η εκτίμηση της σχέσης των μεταβλητών αυτών αποσκοπεί στο να μελετηθεί εάν και κατά πόσο οι τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής επηρεάζονται από τις τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών, με τρόπο που να είναι σύμφωνες οι τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής, με τις παρατηρούμενες τιμές αυτής. Επομένως, η παλινδρόμηση έχει στόχο τόσο να περιγράψει και να εξηγήσει τη σχέση των τιμών των μεταβλητών, όσο και να προβλέψει τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής βάσει των τιμών των ανεξαρτήτων μεταβλητών.

Η παλινδρόμηση είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση και ανάλυση αριθμητικών δεδομένων, ενώ το μαθηματικό μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιείται είναι μια μαθηματική συνάρτηση συσχέτισης της εξαρτημένης μεταβλητής με τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Στην περίπτωση, κατά την οποία η μοντελοποίηση μπορεί να ξεκινήσει χωρίς να είναι, εκ των προτέρων, γνωστός ο τρόπος με τον οποίο συνδέεται η εξαρτημένη μεταβλητή με τις ανεξάρτητες, η μοντελοποίηση ονομάζεται εμπειρική. Σε ένα μοντέλο παλινδρόμησης συμμετέχουν, επίσης, οι άγνωστες παράμετροι συσχέτισης, που ονομάζονται παράμετροι ή συντελεστές παλινδρόμησης και συμβολίζονται με β . Το τελικό προϊόν της παλινδρόμησης είναι η εξίσωση παλινδρόμησης, ή μοντέλο παλινδρόμησης. Στόχος, επομένως, της παλινδρόμησης είναι ο καθορισμός της σχέσης με τη μορφή εξίσωσης και η αναζήτηση της εξίσωσης εκείνης, που καλύτερα απ' όλες, συλλαμβάνει την πραγματική σχέση των μεταβλητών, που συμμετέχουν.

Η σχέση μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής, των ανεξάρτητων μεταβλητών και των συντελεστών της παλινδρόμησης εκφράζεται με τη μορφή εξίσωσης, που καλείται εξίσωση παλινδρόμησης ή μοντέλο παλινδρόμησης, και έχει την εξής μορφή:

$$Y \cong F(X, \beta) \quad (5.7)$$

Η Εξίσωση 4.1 μπορεί να λάβει οποιαδήποτε αλγεβρική μορφή. Στόχος της ανάλυσης παλινδρόμησης είναι να προσδιοριστούν οι τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης για το συγκεκριμένο μοντέλο από τα δεδομένα εκπαίδευσης (training data). Συνήθως, ένα μέρος από τα αρχικά δεδομένα χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του μοντέλου παλινδρόμησης (σύνολο εκπαίδευσης). Στο μοντέλο που παρουσιάζεται παρακάτω, η εξαρτημένη μεταβλητή

Y είναι ένας γραμμικός συνδυασμός (Εξίσωση 5.8) των ανεξαρτήτων μεταβλητών, οπότε το μοντέλο έχει τη μορφή:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (5.8)$$

όπου β_i οι συντελεστές και X_i οι ανεξάρτητες μεταβλητές και ε είναι μια τυχαία μεταβλητή.

Στην Ανάλυση Παλινδρόμησης, οι τιμές της εξαρτημένης και των ανεξαρτήτων μεταβλητών είναι εξ αρχής γνωστές, από το σύνολο εκπαίδευσης, ενώ οι άγνωστες ποσότητες είναι οι τιμές των συντελεστών β . Οι συντελεστές, γενικά, επιχειρούν να αποδώσουν το εάν και κατά πόσο ισχυρά μία ανεξάρτητη μεταβλητή επηρεάζει την τιμή της εξαρτημένης. Ο συντελεστής β_0 καλείται σταθερός όρος (intercept). Εξαιτίας της αναγκαίας ύπαρξης των δεδομένων εκπαίδευσης για τον προσδιορισμό των παραμέτρων παλινδρόμησης β , η παλινδρόμηση ανήκει στην κατηγορία μοντέλων επιβλεπόμενης μάθησης.

Η Ανάλυση Παλινδρόμησης συμβάλλει στην κατανόηση της μεταβολής της εξαρτημένης μεταβλητής Y , όταν μεταβάλλεται μία από τις ανεξάρτητες μεταβλητές X , ενώ οι άλλες ανεξάρτητες μεταβλητές παραμένουν σταθερές. Συνήθως, επιδιώκεται να εξακριβωθεί η αιτιώδης επίδραση μιας μεταβλητής σε κάποια άλλη. Συνηθίζεται, να συγκεντρώνονται τα δεδομένα που αφορούν τις μεταβλητές ενδιαφέροντος και να υιοθετείται η παλινδρόμηση για να υπολογίσει την ποσοτική επίδραση των ανεξάρτητων μεταβλητών στη εξαρτημένη μεταβλητή, που επηρεάζουν. Όλες οι μέθοδοι ανάλυσης παλινδρόμησης προσπαθούν να εκτιμήσουν όλους τους συντελεστές β του μοντέλου από τα δεδομένα του συνόλου εκπαίδευσης, με τρόπο ώστε το μοντέλο παλινδρόμησης να ταιριάζει όσο καλύτερα γίνεται στις παρατηρούμενες τιμές του συνόλου των δεδομένων. Επομένως, συμπεραίνεται ότι οι δύο βασικοί λόγοι για τους οποίους εκτελείται Ανάλυση Παλινδρόμησης είναι: (1) η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής και των ανεξάρτητων μεταβλητών, μέσω της ανάλυσης της διακύμανσης της τιμής της εξαρτημένης μεταβλητής, βάσει των τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών, με την έμφαση να δίνεται στην περιγραφή του μοντέλου παλινδρόμησης που αποτυπώνει το πως οι ανεξάρτητες μεταβλητές επηρεάζουν τη διακύμανση της εξαρτημένης, και (2), η πρόβλεψη, με ακρίβεια, της τιμής της εξαρτημένης μεταβλητής, βάσει μόνον των τιμών των ανεξαρτήτων μεταβλητών. Η πρόβλεψη μπορεί να γίνει, εάν έχει προσδιοριστεί το μοντέλο παλινδρόμησης, μέσω των αρχικών δεδομένων, και, επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο παλινδρόμησης για να υπολογίσει τις μελλοντικές τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής, αν είναι γνωστές, ως είσοδοι, οι τιμές των ανεξαρτήτων μεταβλητών.

Η Ανάλυση Παλινδρόμησης, όπως αυτή χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της ΑΣΕ έχει ως στόχο τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ μίας μεταβλητής που απαραίτητα πρέπει να λαμβάνει συνεχείς αριθμητικές τιμές, και είναι η Ανάντη Συμβάλλουσα Έκταση, και μίας ή περισσότερων άλλων μεταβλητών, που είναι τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της έκτασης που καταλαμβάνει η ΑΣΕ, οι οποίες μπορεί να είναι οποιουδήποτε τύπου μεταβλητές. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά, που ορίζονται στα Υποκεφάλαια 3.1 και 3.2, ως επεξηγηματικές μεταβλητές και η ΑΣΕ, που ορίζεται στο Υποκεφάλαιο 4.2, αποτελεί την εξαρτημένη μεταβλητή. Θέτοντας ως εξαρτημένη μεταβλητή Y , την ΑΣΕ, και τις επεξηγηματικές μεταβλητές ως X_1, X_2, \dots, X_n . Συγκεκριμένα, οι μεταβλητές X_1 και X_2 δηλώνουν τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της κλίσης του εδάφους, αντίστοιχα, οι μεταβλητές X_3 και X_4 δηλώνουν τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της τετραγωνικής ρίζας της κλίσης του εδάφους αντίστοιχα, ενώ οι μεταβλητές X_5 και X_6 δηλώνουν τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση του δείκτη HAND αντίστοιχα. Σε όλα τα μοντέλα, που ελέγχθηκαν, έγινε στατιστικός έλεγχος καλής προσαρμογής. Αν, επομένως, το πλήθος των ανεξαρτήτων

μεταβλητών σε μία συνάρτηση παλινδρόμησης είναι παραπάνω από δύο, όπως στην παρούσα εφαρμογή, τότε μελετάται ένα μοντέλο πολλαπλής παλινδρόμησης (multiple regression model).

Στο πλαίσιο της διατριβής, γίνεται προσπάθεια εντοπισμού γραμμικής σχέσης μεταξύ των μεταβλητών που συμμετέχουν στον έλεγχο, επομένως, επιλέγεται η διερεύνηση της ΑΣΕ μέσω γραμμικής παλινδρόμησης. Η απόδοση κάθε γραμμικού μοντέλου στην πρόβλεψη της εξαρτημένης μεταβλητής, αξιολογείται χρησιμοποιώντας το F-test (Vincent, 1990· Neter et al., 1985). Χρησιμοποιούνται δύο τύποι παλινδρόμησης: η κλασική πολλαπλή γραμμική Παλινδρόμηση (classical multiple linear Regression) και η Βηματική Παλινδρόμηση (Stepwise Regression).

5.4.1 Κλασική Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση

Στην γραμμική παλινδρόμηση, η απαίτηση του μοντέλου που θα παραχθεί είναι: η εξαρτημένη μεταβλητή Y να είναι ένας γραμμικός συνδυασμός (Εξίσωση 5.9) των ανεξαρτήτων μεταβλητών, οπότε το μοντέλο έχει τη μορφή:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (5.9)$$

όπου β_i οι παλινδρομικοί συντελεστές, X_i οι ανεξάρτητες μεταβλητές και ε είναι μια ανεξάρτητη κανονικά κατανομημένη τυχαία μεταβλητή, με μέση τιμή ίση με το μηδέν (Seber and Lee, 2012· Neter et al., 1996· Atkinson et al., 1998). Ο όρος *γραμμική* αφορά τον τρόπο με τον οποίο αλλάζει η τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής αν αλλάξουν οι τιμές των συντελεστών ή/και των ανεξαρτήτων μεταβλητών. Για να χαρακτηριστεί ένα μοντέλο παλινδρόμησης ως γραμμικό, πρέπει η εξαρτημένη μεταβλητή να είναι γραμμική ως προς όλους τους συντελεστές β . Κατά τη διερεύνηση της ΑΣΕ μέσω των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών μιας λεκάνης απορροής, κρίθηκε σκόπιμο να δοκιμαστούν δύο ακόμα ευρέως χρησιμοποιούμενες μορφές γραμμικών μοντέλων, ως προς τη συμπεριφορά τους στα δεδομένα. Αρχικά, δοκιμάστηκε (α) ένα ημιλογαριθμικό εξαρτώμενο μοντέλο, η εξίσωση του οποίου παρουσιάζεται στην Εξίσωση 5.10 και (β) ένα ημιλογαριθμικό ανεξάρτητο μοντέλο, η εξίσωση του οποίου παρουσιάζεται στην Εξίσωση 5.11. Στις παρακάτω εξισώσεις φαίνονται οι μορφές των γραμμικών μοντέλων των επεξηγηματικών μεταβλητών, που εξετάστηκαν.

$$\log(Y) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (5.10)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \log(X_1) + \dots + \beta_n \log(X_n) + \varepsilon \quad (5.11)$$

όπου $\log(\cdot)$ δηλώνει το φυσικό λογάριθμο.

Η Ανάλυση Παλινδρόμησης για εφαρμογές που σχετίζονται με την πρόβλεψη έχει ουσιαστική επικάλυψη με τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται στον τομέα της μηχανικής μάθησης. Επίσης, αξιολογείται η «στατιστική σημασία» των κατ' εκτίμηση συσχετίσεων, και υπολογίζεται ο βαθμός εμπιστοσύνης (confidence). Στη γραμμική παλινδρόμηση, η τιμή F-statistic δείχνει αν είναι στατιστικά σημαντική η γραμμική σχέση μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής και της ανεξάρτητης μεταβλητής (Vincent, 1990· Neter et al., 1985). Είναι γνωστό ότι η γραμμική Παλινδρόμηση είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις ακραίες τιμές, αφού η προσαρμογή του μοντέλου βασίζεται στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (Chatterjee and Hadi, 1986). Μια ακραία τιμή ανιχνεύεται κατά τη διαδικασία της παλινδρόμησης, από το προσδιορισμένο ανώτερο και κατώτερο όριο, τα οποία προκύπτουν από το σύνολο των δεδομένων (Davies and Gather, 1993· Laurie and Gather, 1993), και στη συνέχεια, συγκρίνοντας κάθε παρατήρηση, και με τα δύο αυτά όρια, ελέγχεται αν η παρατήρηση βρίσκεται εντός του επιτρεπόμενου εύρους.

Στην παρούσα διατριβή επιλέγονται και χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές μεθοδολογίες για τον ορισμό του ανώτερου και κατώτερου ορίου: (1) η Μέση Απόλυτη Απόκλιση (the threefold scaled Median Absolute Deviation, MAD) (Rousseeuw and Croux, 1993) και (2) το διατεταρτημοριακού εύρους πολλαπλασιασμένο με 1.5.

5.4.2 Βηματική Παλινδρόμηση (Stepwise Regression)

Η μέθοδος της βηματικής παλινδρόμησης (Stepwise Regression) ξεκινά με την ανίχνευση όλων των ανεξαρτήτων μεταβλητών και έχει ως στόχο τον προσδιορισμό της μεταβλητής εκείνης που έχει τον μεγαλύτερο συντελεστή γραμμικής συσχέτισης με την εξαρτημένη μεταβλητή. Η λίστα των ανεξάρτητων μεταβλητών δεν περιλαμβάνει μόνον τις ανεξάρτητες μεταβλητές που θεωρήθηκαν αρχικά, αλλά περιλαμβάνει, επίσης, και άλλες εκφράσεις των μεταβλητών που ενδεχομένως να ενδιαφέρουν, και οι οποίες προκύπτουν ως συναρτήσεις των αρχικών μεταβλητών (π.χ. X^2). Στη Βηματική Παλινδρόμηση, η τελική επιλογή των ανεξάρτητων μεταβλητών εκτελείται αυτόματα χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Εκτός από τις Εξ. 5.9 έως 5.11, σταδιακά η παλινδρόμηση λαμβάνει υπόψη ως επεξηγηματικές μεταβλητές, παράγωγα των βασικών αρχικών μεταβλητών εισόδου, X_i .

Οι απλοί συντελεστές γραμμικής συσχέτισης κάθε μίας από τις ανεξάρτητες μεταβλητές που εξετάζονται με την εξαρτημένη μεταβλητή Y δίνονται σε πίνακα. Από τον πίνακα αυτό, χρησιμοποιούνται οι απόλυτες τιμές των συντελεστών συσχέτισης, ώστε να καθορισθεί η μεταβλητή εκείνη που έχει τον υψηλότερο συντελεστή συσχέτισης με την εξαρτημένη μεταβλητή Y . Με στόχο τη διάκριση των στατιστικά σημαντικών σχέσεων, επομένως, υπολογίζονται ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 , η το F-statistic, και το παρατηρούμενο επίπεδο σημαντικότητας (p -value). Να σημειωθεί ότι, αν ο συντελεστής προσδιορισμού εκφράζει το ποσοστό της συνολικής διακύμανσης της εξαρτημένης μεταβλητής που μπορεί να εξηγηθεί από το μοντέλο. Προκειμένου να προχωρήσει η ανάλυση στο επόμενο βήμα, θα πρέπει η τιμή του παρατηρούμενου επιπέδου σημαντικότητας να είναι μικρότερη από κάποιο καθορισμένο επίπεδο σημαντικότητας που συνήθως, επιλέγεται ίσο με 0.05. Στην περίπτωση, που το παρατηρούμενο επίπεδο σημαντικότητας υπερβαίνει την προκαθορισμένη τιμή καμιά μεταβλητή δεν περιλαμβάνεται στο μοντέλο, και, επομένως, η ανάλυση σταματά στο σημείο αυτό. Να σημειωθεί, όμως, ότι η απόφαση για το αν θα προχωρήσει η διαδικασία της πρόσθεσης μεταβλητών μπορεί να ληφθεί και με βάση την παρατηρούμενη τιμή της στατιστικής συνάρτησης t για τη συγκεκριμένη μεταβλητή.

Μετά την ολοκλήρωση ενός επιτυχούς πρώτου βήματος, με την προϋπόθεση δηλαδή, ότι έχει ήδη επιλεγεί κάποια «σημαντική» μεταβλητή, εξετάζεται το ενδεχόμενο του αν υπάρχει ένα μοντέλο με δύο ανεξάρτητες μεταβλητές. Στόχος σε αυτό το σημείο είναι να βρεθεί μια δεύτερη «σημαντική» μεταβλητή. Στο στάδιο αυτό είναι απαραίτητος ο έλεγχος των μεταβλητών με δύο τρόπους: είτε αναζητώντας μια άλλη έκφραση της μεταβλητής, που εντάχθηκε στο μοντέλο στο πρώτο βήμα (π.χ., το τετράγωνο αυτής ή την τετραγωνική ρίζα αυτής), είτε ελέγχοντας τις υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές των δεδομένων, διαδοχικά.

Στη συνέχεια η διαδικασία συνεχίζεται εξετάζοντας ποιά από τις μεταβλητές X στο νέο μοντέλο δύο μεταβλητών (αρχικώς επιλεγμένη μεταβλητή και νέα μεταβλητή) δίνει το μεγαλύτερο παρατηρούμενο επίπεδο σημαντικότητας (p -value). Εάν, η τιμή αυτή για τη νέα μεταβλητή είναι μεγαλύτερη από το προκαθορισθέν επίπεδο σημαντικότητας, η ανάλυση σταματά στο σημείο αυτό και συμπεραίνεται ότι το κατάλληλο μοντέλο είναι αυτό που είχε προκύψει στο προηγούμενο βήμα, δηλαδή, με μία μόνο μεταβλητή. Αντίθετα, αν η τιμή του παρατηρούμενου επιπέδου σημαντικότητας για τη νέα μεταβλητή είναι μικρότερη από το προκαθορισθέν επίπεδο σημαντικότητας, τότε, θεωρείται ότι η νέα μεταβλητή αυτή, στην οποία αντιστοιχεί η

συγκεκριμένη τιμή του παρατηρούμενου επίπεδου σημαντικότητας, πρέπει να περιληφθεί στο μοντέλο, οπότε η διαδικασία καταλήγει σε ένα νέο μοντέλο με δύο ανεξάρτητες μεταβλητές. Με τον ίδιο τρόπο συνεχίζεται ο έλεγχος όλων των ανεξάρτητων μεταβλητών που υπάρχουν στα αρχικά δεδομένα, και, προκύπτει η μορφή του τελικού μοντέλου παλινδρόμησης. Για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής και των ανεξάρτητων μεταβλητών, είναι απαραίτητη η συλλογή δεδομένων των μεταβλητών, με τρόπο αντικειμενικό και ακριβή. Ο τρόπος συλλογής των δεδομένων είναι σημαντικός, καθώς, τα σφάλματα των αρχικών δεδομένων επηρεάζουν τη διαδικασία, και, επίσης, μέρος του συνόλου των δεδομένων αποτελεί το σύνολο εκπαίδευσης του μοντέλου παλινδρόμησης, διαδικασίας που οδηγεί στον καθορισμό των συντελεστών παλινδρόμησης. Από τα δεδομένα εκπαίδευσης προκύπτει η δομή του μοντέλου το οποίο προσδιορίζει τη σχέση μεταξύ των μεταβλητών, εκφρασμένη με την εξίσωση της παλινδρόμησης. Για την μελέτη της σχέσης μεταξύ των εξεταζόμενων μεταβλητών, βοηθητική είναι η παρουσίαση των αρχικών δεδομένων με χρήση ενός διαγράμματος διασποράς (scatter plot). Το διάγραμμα διασποράς δίνει μία πρώτη ένδειξη της συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών. Το διάγραμμα αυτό μπορεί να δώσει απαντήσεις σε θέματα όπως: «Είναι η σχέση των μεταβλητών γραμμική;», «Πόσο ισχυρή είναι η σχέση των μεταβλητών;», «Η διακύμανση της εξαρτημένης μεταβλητής, εξαρτάται από την τιμή των ανεξαρτήτων μεταβλητών;», «Υπάρχουν ακραίες τιμές στο σύνολο δεδομένων;» κ.ά. Ανάλογα με τις απαντήσεις στα παραπάνω, συλλέγονται πληροφορίες ως προς την επιλογή των μοντέλων παλινδρόμησης, που θα μελετηθούν.

Ωστόσο, σε περιπτώσεις που αναζητείται η σχέση μεταξύ οποιοδήποτε ζεύγους μεταβλητών του συνόλου των αρχικών δεδομένων, είναι καταλληλότερη η χρήση της μήτρας διαγράμματος διασποράς (scatter plot matrix). Η μήτρα διαγράμματος διασποράς δημιουργεί διαγράμματα διασποράς μεταξύ όλων των συνδυασμών των πιθανών ζευγών των μεταβλητών του συνόλου δεδομένων και παραθέτει τα διαγράμματα αυτά σε μορφή μήτρας, ώστε να είναι εύκολη η σύγκρισή τους. Πρόκειται για ένα βολικό συγκεντρωτικό τρόπο παρουσίασης των μεταβλητών, προκειμένου να απεικονιστούν και να συγκριθούν οι συσχετίσεις μεταξύ όλων των ζευγών των μεταβλητών του συνόλου των δεδομένων.

5.5 Αδιαμέριστη Ταξινόμηση λεκανών απορροής

5.5.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Αφετηρία για την ενασχόληση με το αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής ήταν το γεγονός ότι, μέχρι σήμερα, δεν υφίσταται ένα ενιαίο σύστημα κατάταξης των λεκανών απορροής από υδρολογική άποψη. Ένα τέτοιο σύστημα απαιτεί διεπιστημονική προσέγγιση, καθόσον θα πρέπει να περιλαμβάνει μεγάλη ποικιλία πληροφοριών (εδαφολογικές, υδρολογικές και κλιματικές πληροφορίες). Επιπλέον, η πλειονότητα των λεκανών απορροής είναι μη μετρούμενες, επομένως η μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας είναι απαραίτητη για την πρόβλεψη της υδρολογικής τους συμπεριφοράς. Η ταξινόμηση δεν αντιμετωπίζεται ως ένας απλός τρόπος δημιουργίας ενός συστήματος ταξινόμησης, αλλά ως μια αυστηρή, ολοκληρωμένη έρευνα των περιπτώσεων των ομοιοτήτων και των σχέσεων μεταξύ των λεκανών απορροής. Στις προσεγγίσεις ταξινόμησης λεκανών απορροής ή σε προσεγγίσεις με τη χρήση μεθοδολογιών περιοχοποίησης, ο έλεγχος της συσχέτισης μεταξύ γειτονικών λεκανών παραμένει η βασική παράμετρος. Επίσης, ως προς την προσέγγιση ενός συστήματος ταξινόμησης και σύμφωνα με τον Sivapalan (2005), μια λεκάνη απορροής είναι ένα αυτόνομο και οργανωμένο σύστημα του οποίου το σχήμα, το μέγεθος, το υδρογραφικό δίκτυο, το υπέδαφος, οι κλίσεις του εδάφους και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδατορευμάτων, τα

εδάφη και η βλάστησή του, είναι όλα ένα αποτέλεσμα προσαρμοσμένων οικολογικών και γεωμορφολογικών διεργασιών, και επομένως, είναι δυνατόν να αναζητηθούν και να εντοπιστούν ομοιότητες, είτε μεταξύ των χαρακτηριστικών, είτε μεταξύ των διεργασιών που εκτελούνται.

Στο Υποκεφάλαιο, αντιμετωπίζονται μεθοδολογικά δύο βασικά προβλήματα, και προτείνεται το μεθοδολογικό πλαίσιο για την επίλυσή τους.

Το πρώτο πρόβλημα σχετίζεται με την ταξινόμηση των λεκανών απορροής, για τις οποίες υπάρχουν μετρήσεις απορροής, με σκοπό από την ταξινόμηση των λεκανών να προκύψει ο καθορισμός των υδρολογικών κλάσεων, ο οποίος, στη συνέχεια, θα χρησιμοποιηθεί για την ταξινόμηση των μη μετρούμενων λεκανών. Για την ταξινόμηση, επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν μερικές από τις υδρολογικές υπογραφές που χρησιμοποιήθηκαν από τους Sawicz et al. (2011), ως τα υδρολογικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής οι οποίες πρόκειται να ταξινομηθούν.

Το δεύτερο πρόβλημα, που επιλύεται μεθοδολογικά, είναι η αναγνώριση της υδρολογικής κλάσης στην οποία ανήκει μια μη μετρημένη λεκάνη απορροής, οπότε καθίσταται απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν οι άμεσα διαθέσιμες πληροφορίες μιας τέτοιας λεκάνης. Αυτές οι πληροφορίες συνήθως περιλαμβάνουν μεταβλητές που βασίζονται στο κλίμα και στα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, και, δυστυχώς, μιας και δεν υπάρχουν υδρολογικές μετρήσεις, δεν περιλαμβάνουν υδρολογικές μεταβλητές. Ως εκ τούτου, αναζητείται μια μέθοδος που θα επιτρέψει την αναγνώριση της υδρολογικής κλάσης της μη μετρούμενης λεκάνης μεταξύ των κλάσεων που έχουν ήδη εξαχθεί, μέσω της ταξινόμησης, με τη χρήση των υδρολογικών υπογραφών, στο πρώτο πρόβλημα.

Ενδεικτικά, αναφέρονται παραδείγματα δύο προσεγγίσεων στα οποία επιλέγεται στατιστική μεθοδολογία κατάταξης των λεκανών απορροής σύμφωνα με την υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών απορροής σε συνθήκες χαμηλής ροής. Η πρώτη προσέγγιση εφαρμόζεται σε λεκάνες απορροής στη Μασαχουσέτη (Vogel and Kroll, 1990), ενώ η δεύτερη προσέγγιση επιχειρεί την ταξινόμηση των υποπεριοχών της λεκάνης απορροής σε κλάσεις με παρόμοια συμπεριφορά, ενώ χρησιμοποιούνται, εκτός των υδρολογικών παραμέτρων, και απλά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά όπως το εμβαδόν και η κλίση του εδάφους της λεκάνης απορροής (Tsakiris et al., 2011).

Στόχος του Υποκεφαλαίου είναι, μέσα από την προσέγγιση της αντιμετώπισης των δύο παραπάνω προβλημάτων ταξινόμησης, να διαμορφωθεί ένα μεθοδολογικό πλαίσιο. Στο εδάφιο 5.5.1, παρουσιάζονται οι προσεγγίσεις που συναντώνται στη βιβλιογραφία και αποτέλεσαν κίνητρο για τη μελέτη και την ανάπτυξη της μεθοδολογίας που προτείνεται στην παρούσα διατριβή. Το μεθοδολογικό πλαίσιο που προτείνεται περιγράφεται στο εδάφιο 5.5.2.

Σκοπός ενός συστήματος ταξινόμησης λεκανών απορροής είναι παραβλέποντας την πολυπλοκότητα και τις έντονες διαφορές μεταξύ των λεκανών απορροής να εστιάσει στον εντοπισμό κοινών συνθηκών, επαναλαμβανόμενων μοτίβων και σταθερών ή διαδοχικών συνδέσεων, που μπορούν να διακριθούν και να οδηγήσουν στην πρόοδο στην υδρολογική επιστήμη μέσω της διατύπωσης υποθέσεων ή σχέσεων με καθολική δυνατότητα ισχύος (Wagener et al., 2007). Η αναζήτηση ενός συστήματος ταξινόμησης λεκανών απορροής για την πρόβλεψη της υδρολογικής συμπεριφοράς των μη μετρούμενων λεκανών απορροής και για τη μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας μεταξύ των λεκανών της ίδιας κλάσης αποτελεί, μέχρι και σήμερα, το βασικό κίνητρο σε πληθώρα υδρολογικών προσεγγίσεων. Ακολουθεί η ανάλυση των προσεγγίσεων που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία, ως προς το

μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο προτείνουν, και όχι ως προς τα κριτήρια ή το αποτέλεσμα της ταξινόμησης.

Το 2011, οι Sawicz et al. ανέπτυξαν μια μεθοδολογία ταξινόμησης λεκανών απορροής εφαρμόζοντας τη μέθοδο της ανάλυσης κατά συστάδες (cluster analysis) που βασίζεται στην υδρολογική ομοιότητα με τη χρήση κυρίως υδρολογικών υπογραφών. Οι υδρολογικές υπογραφές ποσοτικοποιούν τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της υδρολογικής απόκρισης των λεκανών απορροής, γεγονός που παρέχει μια εκτίμηση της συμπεριφοράς της λεκάνης απορροής. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας έγινε σε δείγμα 280 λεκανών απορροής στις ανατολικές ΗΠΑ, ενώ στην ταξινόμηση δεν χρησιμοποιήθηκαν ούτε γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά ούτε υδρομετεωρολογικά χαρακτηριστικά.

Η ανάλυση κατά συστάδες (cluster analysis) είναι μια μέθοδος ταξινόμησης/ομαδοποίησης όμοιων οντοτήτων σύμφωνα με ένα ή περισσότερα επιλεγμένα μέτρα ομοιότητας, που, στην προκειμένη περίπτωση, είναι οι υδρολογικές υπογραφές. Κατά τη μέθοδο, συστάδα θεωρείται ένα σύνολο από στοιχεία τα οποία είναι όμοια μεταξύ τους, ή βρίσκονται κοντά, και διαφοροποιούνται (ή βρίσκονται μακριά) από στοιχεία που ανήκουν σε άλλες συστάδες. Η ανάλυση κατά συστάδες αποσκοπεί στο διαχωρισμό ενός συνόλου από στοιχεία σε υποσύνολα έτσι ώστε, να υπάρχει ομοιογένεια μεταξύ των στοιχείων του υποσυνόλου και ανομοιογένεια μεταξύ των στοιχείων που ανήκουν σε διαφορετικά υποσύνολα. Επιπρόσθετα, η μεθοδολογία αποσκοπεί στην ιεραρχική οργάνωση των συστάδων με την διαδοχική ομαδοποίηση αυτών, έτσι ώστε, σε κάθε στάδιο της ταξινόμησης, τα στοιχεία που ανήκουν στην ίδια συστάδα να είναι πιο όμοια μεταξύ τους από αυτά που ανήκουν σε άλλη συστάδα (Johnson and Wichern, 1992· Hastie et al., 2009). Σημαντική έννοια στην ανάλυση κατά συστάδες είναι η απόσταση ή το μέτρο ομοιότητας, δηλαδή το μέτρο με βάση το οποίο δημιουργούνται οι συστάδες. Οι πιο συνηθισμένες μορφές μέτρων ομοιότητας που μπορούν να εφαρμοστούν μεταξύ δύο διανυσμάτων είναι: η μετρική Minkowsk, για την οποία με κατάλληλη παραμετροποίηση στη μετρική, υπολογίζεται και εφαρμόζεται η Ευκλείδεια απόσταση, η μέγιστη απόσταση, και η μετρική Canberra. Το μέτρο ομοιότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κατασκευαστεί μητρώο αποστάσεων σε κάθε στάδιο της διαδικασίας της ταξινόμησης. Το μητρώο έχει μηδενικά στοιχεία στη διαγώνιο και την απόσταση μεταξύ των στοιχείων, π.χ. του i στοιχείου (ή συστάδας) από το j στοιχείο (ή συστάδα), στην θέση (i, j) .

5.5.2 Η προτεινόμενη μεθοδολογία για αδιαμέριστη ταξινόμηση

Στο πλαίσιο της διατριβής, για την ταξινόμηση των λεκανών απορροής, αναπτύχθηκε και προτείνεται μια μεθοδολογία αδιαμέριστης ταξινόμησης, χρησιμοποιώντας τη βροχόπτωση ως τη μόνη διαθέσιμη κλιματολογική παράμετρο, ενώ ως κριτήρια χρησιμοποιήθηκαν τέσσερεις (4) υδρολογικές υπογραφές και δεκατρία (13) γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής. Η χρήση των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών εξασφαλίζει την αξιοποίηση της πληροφορίας του γήινου αναγλύφου που περιγράφεται μέσα από το ΨΜΕ και επιτρέπει τη χρήση αυτών των χαρακτηριστικών ως κριτηρίων για την ταξινόμηση των μη μετρούμενων λεκανών απορροής.

Η μεθοδολογία ταξινόμησης περιλαμβάνει δύο βασικά βήματα και στόχο έχει την ταξινόμηση των λεκανών απορροής σε κλάσεις, σύμφωνα με την υδρολογική συμπεριφορά αυτών. Στο πρώτο βήμα πραγματοποιείται μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση μέσω της μεθόδου ασαφούς λογικής (fuzzy c-means) για την αναγνώριση των κλάσεων των λεκανών απορροής, οι οποίες χρησιμεύουν ως κλάσεις αναφοράς στο δεύτερο βήμα της ανάλυσης. Στο δεύτερο βήμα, με γνωστές τις κλάσεις των λεκανών απορροής, πραγματοποιείται επιβλεπόμενη ταξινόμηση μέσω της μεθόδου εγγύτερου γείτονα (k-Nearest Neighbour) που ενσωματώνει πληροφορία

από τους δείκτες πρόγνωσης στις κλάσεις των λεκανών. Η αξιολόγηση της επιτυχίας της ταξινόμησης σε μια κλάση των λεκανών απορροής γίνεται με χρήση ενός δείκτη επιτυχίας και μιας μεθόδου επαναδειγματοληψίας (jack-knife re-sampling).

Να σημειωθεί ότι, για τον έλεγχο της επιτυχίας της ταξινόμησης, όλες οι λεκάνες απορροής έχουν γνωστές τις τιμές των υδρολογικών υπογραφών που περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2, και τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά που περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3. Οι υδρολογικές υπογραφές που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής: ο συντελεστής απορροής, η κλίση της καμπύλης διάρκειας παροχής, ο δείκτης βασικής ροής, και η αναλογία των ημερών χιονιού. Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν, προέρχονται αποκλειστικά από την επεξεργασία του ΨΜΕ και είναι τα εξής: ο δείκτης κυκλικότητας (Circulation ratio), η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου (Drainage density), ο βαθμός τραχύτητας (Ruggedness number), η μέση κλίση του εδάφους της λεκάνης απορροής (slope), το διατεταρτημοριακό εύρος, δηλαδή, η διαφορά μεταξύ των ποσοστιαίων σημείων 25% και 75% της κατανομής των κλίσεων του εδάφους, η μέση τιμή του προσανατολισμού του εδάφους της λεκάνης απορροής (aspect), η μέση τιμή της καμπυλότητας κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης (plan curvature), η μέση τιμή και το διατεταρτημοριακό εύρος του Τοπογραφικού Δείκτη Υγρασίας (Topographic Wetness Index), η μέση τιμή και το διατεταρτημοριακό εύρος του δείκτη HAND, και η κλίση του κύριου υδατορεύματος (main channel slope) (βλ. εδάφιο 3.2).

Αναλυτικότερα, το μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο διατυπώνεται, επιτρέπει να αναζητηθεί η υδρολογική ομοιότητα μιας μη μετρούμενης λεκάνης απορροής σε σχέση με τις λεκάνες μιας κλάσης λεκανών απορροής. Κατά την εφαρμογή η οποία αναλύεται στο Κεφάλαιο 6, η μη μετρούμενη λεκάνη έχει γνωστές τις υδρολογικές της υπογραφές, επομένως, ψευδώς χαρακτηρίζεται ως «μη μετρούμενη», μιας και δεν είναι στην πραγματικότητα, και αναζητείται η σχέση της με μια από τις συγκεκριμένες κλάσεις λεκανών απορροής, που σε προηγούμενα στάδια της διαδικασίας έχουν οριστεί μέσω της ταξινόμησης των «μετρούμενων» λεκανών απορροής, ώστε να ταξινομηθεί σε μία από αυτές τις κλάσεις. Επομένως, γίνεται κατανοητό ότι, για όλες τις λεκάνες που συμμετέχουν στο δείγμα, οι υδρολογικές υπογραφές και τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά τους είναι γνωστά, αν και, για την υπό εξέταση «μη μετρούμενη» λεκάνη απορροής, θα θεωρείται ότι δεν είναι διαθέσιμες οι μετρημένες τιμές της απορροής και επομένως δεν μπορεί να γίνει υπολογισμός των υδρολογικών υπογραφών. Ωστόσο, θεωρείται ότι για την «μη μετρούμενη» λεκάνη απορροής υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για άλλες υδρολογικές μεταβλητές, π.χ., για τη βροχόπτωση. Επίσης, οι πληροφορίες για την τοπογραφία της λεκάνης μέσω των υψομέτρων από το ΨΜΕ, επιτρέπουν την εκτίμηση των μορφομετρικών χαρακτηριστικών της υπό εξέταση «μη μετρούμενης» λεκάνης απορροής.

Το προτεινόμενο πλαίσιο της μεθοδολογίας αποτελείται από δύο βήματα. Στο Βήμα 1, εφαρμόζεται μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση με χρήση του αλγόριθμου fuzzy c-means, και οι μετρούμενες λεκάνες απορροής ταξινομούνται χρησιμοποιώντας τις υδρολογικές υπογραφές (βλ. Υποκεφάλαιο 2.5).

Όπως ελέχθη, ο αλγόριθμος ταξινόμησης χρησιμοποιεί τις υδρολογικές υπογραφές ως μέτρα υδρολογικής ομοιότητας των λεκανών απορροής. Επειδή, σε αυτήν την ταξινόμηση, οι κατηγορίες δεν είναι γνωστές εκ των προτέρων, επιλέγεται η εφαρμογή μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης, η οποία επιτρέπει την ομαδοποίηση των λεκανών σε κλάσεις που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα μοτίβα των υδρολογικών υπογραφών. Η επιλογή της ασαφούς προσέγγισης, δίνει τη δυνατότητα στον αλγόριθμο της ταξινόμησης να αντιμετωπίσει το δείγμα με ευελιξία. Σύμφωνα με τον επιλεγέντα ευρέως χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο fuzzy c-means, ή FCM

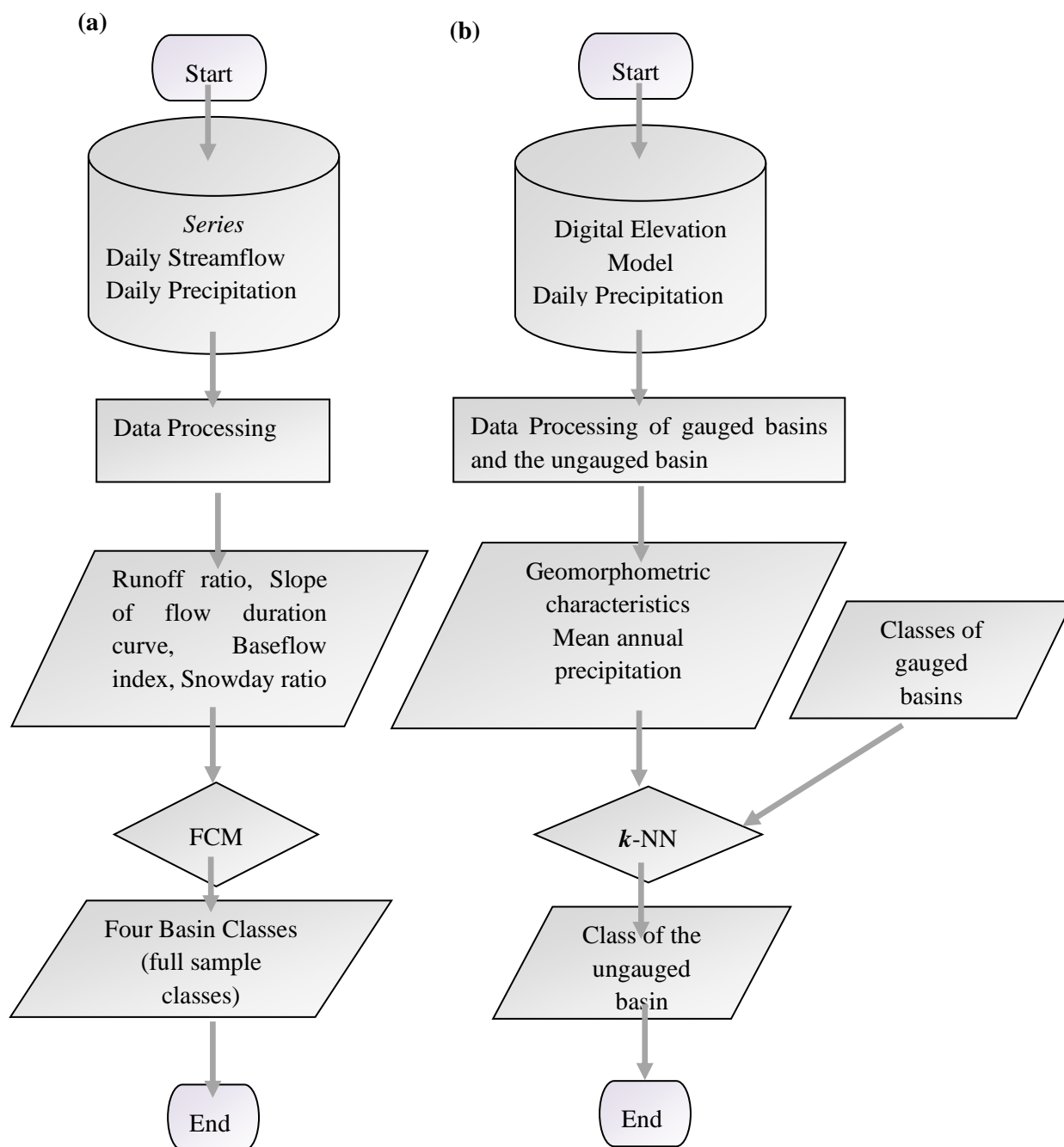
(Dunn, 1974· Bezdek et al., 1984), υπολογίζεται η τιμή ενός δείκτη εγκυρότητας (validity index), ο οποίος αποτιμά τον βαθμό συμμετοχής των αντικειμένων που μοιράζονται τα ασαφή υποσύνολα και, επομένως, αποτελεί μέτρο του βαθμού ασάφειας της ταξινόμησης. Σε αυτή την προσέγγιση, χρησιμοποιείται ως δείκτης εγκυρότητας ο γνωστός συντελεστής Validity Partition Coefficient ή, VPC, που προτάθηκε από τον Bezdek (1998) και δίνεται από την εξίσωση:

$$VPC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^2, \quad (5.12)$$

όπου $u_{i,j}$ είναι ο βαθμός συμμετοχής, n = πλήθος των προς ταξινόμηση αντικειμένων, και i και j δείκτες

Να σημειωθεί ότι η καλύτερη τιμή για τον αριθμό των κλάσεων εντοπίζεται λύνοντας το πρόβλημα της μεγιστοποίησης (max) του VPC, για $2 \leq c \leq n-1$.

Το διάγραμμα ροής της προτεινόμενης διαδικασίας ταξινόμησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-4 και συνοψίζει τα βήματα υπολογισμού Βήμα 1 και Βήμα 2, που συζητήθηκαν παραπάνω. Στο διάγραμμα ροής, τα ορθογώνια με στρογγυλεμένες γωνίες αφορούν διαδικασίες ελέγχου (έναρξη, τέλος), τα ορθογώνια αντιστοιχούν σε διαδικασίες επεξεργασίας και γενικότερων υπολογισμών, οι κύλινδροι αντιστοιχούν σε βάσεις δεδομένων, τα παραλληλόγραμμα αφορούν εξόδους υπολογισμών και απόδοσης αποτελεσμάτων, και οι ρόμβοι αντιστοιχούν σε ελέγχους για ικανοποίηση ή μη συνθηκών.



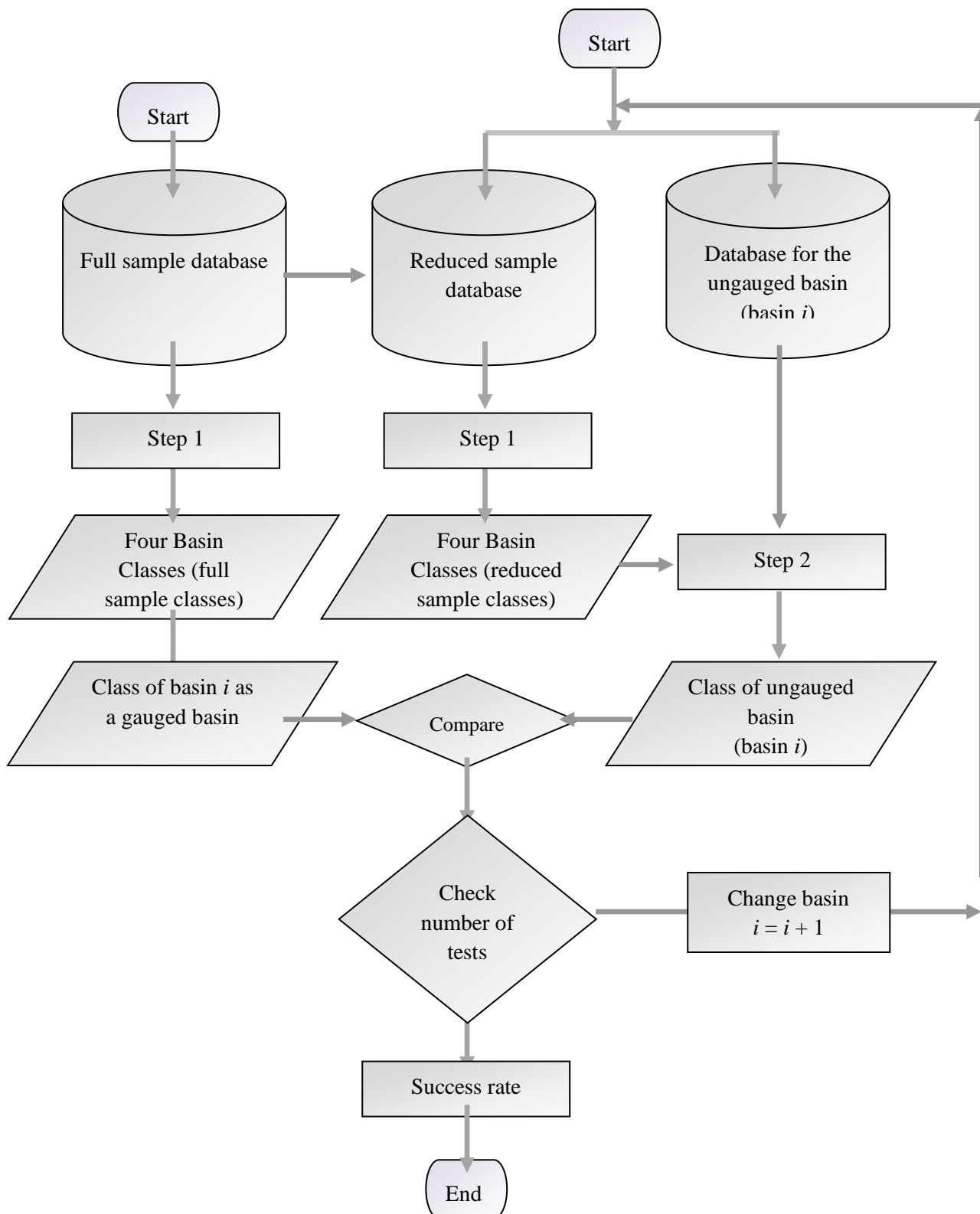
Σχήμα 5-4: Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθοδολογίας των βημάτων: (a) Βήμα 1 και (b) Βήμα 2.

Το Βήμα 2 περιλαμβάνει τη δημιουργία μιας σχέσης μεταξύ των χαρακτηριστικών των μετρούμενων λεκανών (δηλαδή, μεταβλητών που βασίζονται στο κλίμα και των μορφομετρικών χαρακτηριστικών), ως προγνωστικών παραγόντων, και των κλάσεων λεκανών απορροής που έχουν ήδη προσδιοριστεί στο Βήμα 1. Η βροχόπτωση επιλέγεται ως μεταβλητή που χαρακτηρίζει το κλίμα, καθώς αυτή μετριέται συνήθως στην πλειονότητα των λεκανών απορροής. Μια δεύτερη μεταβλητή, που βασίζεται στο κλίμα και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, είναι η θερμοκρασία αέρα, η οποία, ωστόσο, δεν λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα προσέγγιση για τους εξής λόγους: (1) Το δίκτυο των σταθμών μέτρησης της θερμοκρασίας αέρα είναι, συνήθως, πολύ λιγότερο πυκνό από αυτό της βροχόπτωσης, (2) σπάνια μετράται σε υψηλά υψόμετρα, και (3) για μεγάλα χρονικά βήματα (αδρομερής χρονική

κλίμακα), το μέγεθος αυτό μεταβάλλεται στο χώρο μόνο, και κυρίως σε σχέση με το υψόμετρο (θερμοβαθμίδα), κάτι το οποίο λαμβάνεται έμμεσα υπόψη μέσω της βροχόπτωσης, που επίσης συσχετίζεται με το υψόμετρο.

Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν προηγούμενα, λαμβάνονται υπόψη, στο βήμα αυτό, ενώ η διαδικασία συνεχίζεται με εφαρμογή μιας απλής μεθόδου επιβλεπόμενης ταξινόμησης, η οποία περιγράφεται στη συνέχεια. Να σημειωθεί ότι όλα τα δεδομένα που συμμετέχουν στη διαδικασία ταξινόμησης, έχουν υποστεί χωρική και στατιστική επεξεργασία. Επίσης, έγινε εφαρμογή της γνωστής μεθόδου Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis, PCA) με στόχο την συμπύκνωση της πληροφορίας που περιέχεται εντός των μορφομετρικών χαρακτηριστικών.

Για την αναγνώριση της υδρολογικής κλάσης μιας «μη μετρούμενης» λεκάνης απορροής χρησιμοποιείται ο γνωστός αλγόριθμος k-Nearest Neighbor (k-NN) (Freidman et al., 1977). Η επιλογή του συγκεκριμένου αλγορίθμου επιτρέπει την αποφυγή της διαδικασίας της βαθμονόμησης, καθώς την αντικαθιστά με την απλή αποθήκευση του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης. Να σημειωθεί ότι στα δεδομένα εκπαίδευσης, για κάθε λεκάνη απορροής, έχει αποθηκευτεί η κλάση στην οποία αυτή ανήκει σύμφωνα με την ταξινόμηση που έγινε στο Βήμα 1. Στον αλγόριθμο εισάγεται η μη ταξινομημένη λεκάνη απορροής και οι k λεκάνες απορροής, που είναι οι πλησιέστεροι γείτονες στο χώρο των οντοτήτων (ή στο χώρο των χαρακτηριστικών) της υπό εξέταση λεκάνης. Η κλάση των πλησιέστερων γειτόνων έχει προσδιοριστεί όπως εξηγείται στο Βήμα 1. Το κριτήριο που χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση της «μη μετρούμενης» λεκάνης απορροής είναι η εγγύτητα στον χώρο των οντοτήτων, που μετράται με ένα προεπιλεγμένο μέτρο απόστασης. Στην παρούσα προσέγγιση επιλέχθηκε η Ευκλείδεια απόσταση, ενώ το k ήταν ίσο με τη μονάδα.



Σχήμα 5-5: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας επαλήθευσης της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Το μεθοδολογικό πλαίσιο επικυρώνεται στο σύνολό του, δηλαδή και για τα δύο βήματα, Βήμα 1 και Βήμα 2, αξιολογώντας την γενικευμένη ικανότητα της γνωστής μεθόδου επαναδειγματοληψίας jack-knife (Efron, 1982). Η τελευταία έχει εφαρμοστεί σε παλαιότερες μελέτες στην υδρολογία (Castiglioni et al., 2009· Tsakiris et al., 2011). Κατά την μέθοδο επαναδειγματοληψίας jack-knife (resampling method) τα δείγματα που παράγονται από κάθε επανάληψη, λαμβάνονται εξαιρώντας, κάθε φορά, μία τιμή, από το αρχικό δείγμα.

Σε αυτή την προσέγγιση, η μέθοδος υλοποιείται με τον ακόλουθο τρόπο:

(1) Το Βήμα 1 εφαρμόζεται στο σύνολο των «μετρούμενων» λεκανών απορροής, κάτι το οποίο επιτρέπει τον ορισμό των κλάσεων των λεκανών απορροής καθώς και την αντιστοίχιση, σε κάθε λεκάνη, μιας συγκεκριμένης κλάσης. Στη συνέχεια, κατασκευάζεται το «πλήρες δείγμα» στο οποίο, οι περιγραφικές ιδιότητες κάθε λεκάνης απορροής και η κλάση στην οποία αυτή κατατάχθηκε αποτελούν το νέο σύνολο περιγραφικών χαρακτηριστικών της κάθε λεκάνης απορροής.

(2) Επιλέγεται μία λεκάνη απορροής που θεωρείται «μη μετρούμενη» και αφαιρείται από το πλήρες δείγμα λεκανών απορροής επί του οποίου εφαρμόζεται και πάλι, η μέθοδος ταξινόμησης (Βήμα 1) για τον προσδιορισμό νέων κλάσεων. Οι νέες κλάσεις που προκύπτουν από το μειωμένο κατά μια λεκάνη πλήρες δείγμα, ορίζονται ως κλάσεις λεκανών απορροής «μειωμένου δείγματος».

(3) Εφαρμόζεται το Βήμα 2 του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου χρησιμοποιώντας τις κλάσεις «μειωμένου δείγματος», κάτι που επιτρέπει την αντιστοίχιση της υπό εξέταση «μη μετρούμενης» λεκάνης σε μία από τις κλάσεις «μειωμένου δείγματος». Η κλάση που θα αποδίδεται στην «μη μετρούμενη» λεκάνη απορροής ονομάζεται «προβλεφθείσα» κλάση.

(4) Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με διαδοχική ανάθεση του ρόλου της «μη μετρούμενης» λεκάνης απορροής σε όλες τις λεκάνες του πλήρους δείγματος, γεγονός που επιτρέπει τη εκτίμηση της «προβλεφθείσα» κλάσης για κάθε λεκάνη θεωρούμενη «μη μετρούμενη». Η διαδικασία αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό του ποσοστού επιτυχίας, SR, που ορίζεται ως εξής:

$$SR = 100 \times \frac{n_s}{n} \quad (5.13)$$

όπου n_s είναι ο αριθμός των περιπτώσεων που μια «προβλεφθείσα» κλάση είναι ίδια με την αντίστοιχη κλάση στο «πλήρες δείγμα» και n είναι ο συνολικός αριθμός των περιπτώσεων που δοκιμάστηκαν, δηλαδή ο αριθμός των φορών που εφαρμόζεται η μεθοδολογία. Το κριτήριο SR εκφράζει τελικά την επιτυχία της προτεινόμενης μεθοδολογίας στο σύνολό της. Το διάγραμμα ροής του Σχήματος 5-5 παρουσιάζει την αλληλουχία των υπολογισμών που εμπλέκονται στο μεθοδολογικό πλαίσιο και στη διαδικασία επικύρωσης αυτού.

Κατά την εφαρμογή του Βήματος 1 στη διαδικασία επικύρωσης της ταξινόμησης, οι κλάσεις «μειωμένου δείγματος», σε ορισμένες περιπτώσεις, διαφέρουν από τις κλάσεις «πλήρους δείγματος». Όμως για τέτοιες διαφορές, οι στατιστικές πληροφορίες δεν έχουν καμία αξία, καθώς απώτερος στόχος της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι η επιτυχής πρόβλεψη της κλάσης μιας «μη μετρούμενης» λεκάνης. Το ίδιο ισχύει και για τις υδρολογικές υπογραφές οι οποίες, σε αυτή τη διαδικασία, είναι «ενδιάμεσες» μεταβλητές, και, γι' αυτό, έχουν περιορισμένο ενδιαφέρον. Ομοίως, κατά την εφαρμογή του Βήματος 2 στη διαδικασία επικύρωσης της ταξινόμησης, η «προβλεφθείσα» κλάση (predicted) μιας «μη μετρούμενης» λεκάνης θα διαφέρει, σε ορισμένες περιπτώσεις, από την κλάση «πλήρους δείγματος». Μια καταγραφή τέτοιων διαφορών σχετίζεται άμεσα με τον τελικό στόχο του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου, δηλαδή, με την επιτυχή πρόβλεψη της κλάσης των «μη

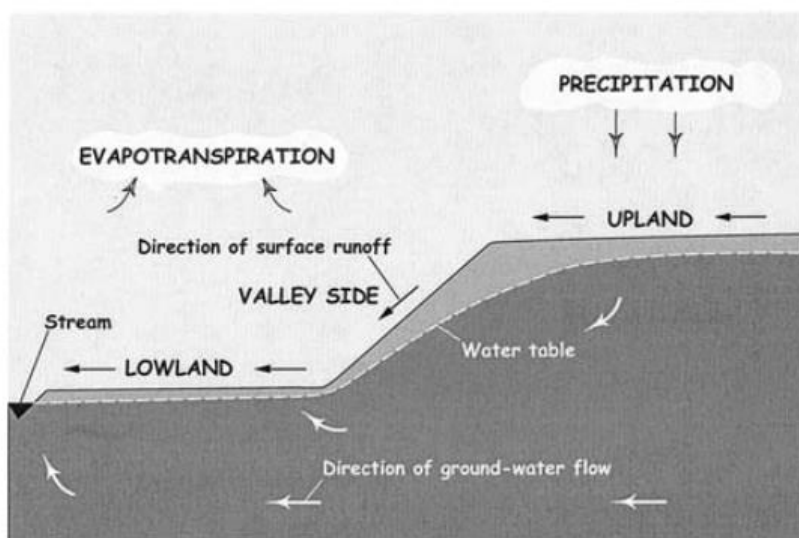
μετρούμενων» λεκανών απορροής. Αυτό είναι ακριβώς το κριτήριο SR ελέγχου της ταξινόμησης, που παρουσιάζεται στην Εξίσωση 5.13. Τα «προβλεφθέντα» και «πραγματικά» χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής είναι "ενδιάμεσες" μεταβλητές σε αυτή τη διαδικασία. Οποιοσδήποτε στατιστικές πληροφορίες, σχετικά με τις διαφορές μεταξύ τους, είναι περιορισμένης αξίας και πιθανώς παραπλανητικές.

5.6 Κατανεμημένη ταξινόμηση γήινου αναγλύφου

5.6.1 Γενικά

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, στην Υδρολογία, τα μοντέλα, ανάλογα με την χωρική κλίμακα, μπορεί να είναι αδιαμέριστα ή κατανεμημένα. Στην περίπτωση της αδρομερούς χωρικής κλίμακας, η λεκάνη απορροής μοντελοποιείται ως μια ενιαία μονάδα, η οποία στο σύνολό της αποκρίνεται ομοιόμορφα και, επομένως, η δομή του μοντέλου αποτελεί απλοποιημένη αναπαράσταση της πολυπλοκότητας των υδρολογικών διεργασιών του γήινου αναγλύφου. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση της κατανεμημένης μοντελοποίησης των υδρολογικών διεργασιών, η λεκάνη απορροής εξετάζεται ως σύνολο υποπεριοχών ή μονάδων υδρολογικής απόκρισης (Hydrological Response Units). Η χρήση κατανεμημένων μοντέλων στις υδρολογικές προσομοιώσεις στηρίζει την υπόθεση της ετερογένειας του τοπογραφικού αναγλύφου ή των υδρολογικών συνθηκών που επικρατούν εντός της λεκάνης απορροής. Η επιλογή των κριτηρίων σύμφωνα με τα οποία γίνεται ο διαχωρισμός των μονάδων υδρολογικής απόκρισης αφορά το σκοπό της μελέτης, ενώ τα κριτήρια ποικίλουν. Βιβλιογραφικά, απαντάται η χρήση τοπογραφικών κριτηρίων, γεωλογικών και χρήσεων γης, καθώς, επίσης, έχουν διατυπωθεί οι λόγοι που ωθούν στην επιλογή της αδιαμέριστης έναντι της κατανεμημένης προσέγγισης ή αντίστροφα (Nalbantis et al., 2011). Τα κριτήρια επιλέγονται κατάλληλα ανάλογα με τον σκοπό της μοντελοποίησης (Savenije, 2010).

Η έννοια του υδρολογικού τοπίου (hydrologic landscape) βασίζεται στην ιδέα ότι μια ενιαία, απλή, φυσική οντότητα τοπίου είναι το θεμελιώδες στοιχείο όλων των τοπίων. Αυτή η οντότητα ονομάζεται θεμελιώδης υδρολογική μονάδα τοπίου (fundamental hydrologic landscape unit) (Winter, 2001) και ορίζεται ως ο τόπος ενός υψιπέδου δίπλα σε πεδινή περιοχή από την οποία διαχωρίζεται από μια πλαγιά μιας κοιλάδας (Σχήμα 5-6).



Σχήμα 5-6: Η θεμελιώδης υδρολογική μονάδα τοπίου (πηγή: Winter, 2001)

Οι υδρολογικές διεργασίες μιας θεμελιώδους μονάδας υδρολογικού τοπίου περιλαμβάνει κίνηση των επιφανειακών υδάτων, η οποία ελέγχεται από τις κλίσεις του εδάφους και την διαπερατότητα αυτού, την κίνηση του υπόγειου νερού, η οποία ελέγχεται από τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του γεωλογικού υπόβαθρου και την ανταλλαγή ποσοτήτων νερού με την ατμόσφαιρα, η οποία ελέγχεται από το κλίμα (Winter, 2001). Σύμφωνα με την παραπάνω προσέγγιση, δημιουργούνται είκοσι θεμελιώδεις μονάδες υδρολογικού τοπίου. Στον Πίνακα 5-1 παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις μονάδες υδρολογικού τοπίου και η υπόθεση του υδρολογικού καθεστώτος, δηλαδή, ο μηχανισμός με τον οποίο οι μονάδες αλληλοεπιδρούν.

Πίνακας 5-1: Οι 20 θεμελιώδεις μονάδες υδρολογικού τοπίου (πηγή: Wolock et al., 2004).

α/α ΘΜΥΤ	Περιγραφή	Κυρίαρχοι μηχανισμοί απορροής		
		Επίγεια ροή	Υπο- δερμική ροή	Υπόγεια ροή
1	Ήπια υγρές πεδιάδες με διαπερατά εδάφη και βραχώδες υπόστρωμα		x	x
2	Υγρές πεδιάδες με διαπερατά εδάφη και βραχώδες υπόστρωμα		x	x
3	Ήπια υγρές πεδιάδες με αδιαπέρατα εδάφη και διαπερατό υπόστρωμα	x		x
4	Υγρές πεδιάδες με διαπερατά εδάφη και βραχώδες υπόστρωμα		x	x
5	Ξηρές πεδιάδες με διαπερατά εδάφη και βραχώδες υπόστρωμα		x	x
6	Ήπια υγρές πεδιάδες με αδιαπέρατα εδάφη και βραχώδες υπόστρωμα	x		
7	Υγρές πεδιάδες με διαπερατά εδάφη και αδιαπέρατο βραχώδες υπόστρωμα		x	
8	Ημίξηρες πεδιάδες με αδιαπέρατα εδάφη και βραχώδες υπόστρωμα	x		
9	Υγρά υψίπεδα (plateaus) με αδιαπέρατα εδάφη και διαπερατό υπόστρωμα	x		
10	Ξηρά υψίπεδα (plateaus) με αδιαπέρατα εδάφη και διαπερατό υπόστρωμα	x		
11	Υγρά υψίπεδα (plateaus) με αδιαπέρατα εδάφη και βραχώδες υπόστρωμα	x		
12	Ημίξηρα υψίπεδα (plateaus) με διαπερατά εδάφη και αδιαπέρατο υπόστρωμα		x	
13	Ημίξηρα υψίπεδα (plateaus) με αδιαπέρατα εδάφη και υπόστρωμα	x		
14	Ξηρές παραλίες (playas) με διαπερατά εδάφη και υπόστρωμα		x	x
15	Ημίξηρα βουνά με αδιαπέρατα εδάφη και διαπερατό υπόστρωμα	x		x
16	Υγρά βουνά με διαπερατά εδάφη και αδιαπέρατο υπόστρωμα		x	
17	Ημίξηρα βουνά με αδιαπέρατα εδάφη και υπόστρωμα	x		
18	Ημίξηρα βουνά με διαπερατά εδάφη και αδιαπέρατο βραχώδες υπόστρωμα		x	
19	Πολύ υγρά βουνά με διαπερατά εδάφη και αδιαπέρατο υπόστρωμα		x	
20	Υγρά βουνά με διαπερατά εδάφη και αδιαπέρατο υπόστρωμα		x	

Σχετικά πρόσφατες μελέτες που χρησιμοποιούν την ταξινόμηση τοπίου έχουν εφαρμοστεί σε κλίμακα λεκάνης απορροής (Patil et al., 2014· Leibowitz et al., 2016· Todd et al., 2017). Η ταξινόμηση τοπίου έχει εφαρμοστεί στις Η.Π.Α. μέσω της χρήσης μεθόδων ταξινόμησης (clustering) σε 20 μη συνεχόμενες ευρύτερες περιοχές (Πίνακας 5-1), οι οποίες δεν ακολουθούν το γεωμορφολογικά όρια της λεκάνης απορροής (Wolock et al., 2004). Με αφετηρία εκείνη την προσπάθεια έχουν εφαρμοστεί ταξινομήσεις σε επίπεδο λεκάνης απορροής στο Όρεγκον (Leibowitz et al., 2016· Patil et al., 2014· Wigington et al., 2013), στη Νεβάδα (Maurer et al., 2004), στον βορειοδυτικό Ειρηνικό (Leibowitz et al., 2016), και στο Bristol Bay της Αλάσκα (Todd et al., 2017), ενώ, επίσης, μια σειρά από παρεμφερείς μεθοδολογίες έχουν χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της επίδρασης του κλίματος στην υδρολογική συμπεριφορά (Luce and Holden, 2009· Safeeq et al., 2014· Vano et al., 2015).

5.6.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η ταξινόμηση των γήινων επιφανειών, μέσω της οποίας αξιοποιούνται τα πλεονεκτήματα της χωρικής ανάλυσης δεδομένων, αποτελεί την προτεινόμενη μέθοδο για την μείωση της πολυπλοκότητας των σχέσεων μεταξύ των δεδομένων. Μια τέτοιου είδους ταξινόμηση, είναι προφανές ότι εμπλέκει τις παρατηρήσεις και ερμηνείες των χαρακτηριστικών των εδαφικών προτύπων (Bailey, 2004). Στόχος της ομαδοποίησης ετερογενών γήινων επιφανειών είναι η δυνατότητα, η οποία προκύπτει από τη διαδικασία της κατανόησης μιας ή περισσότερων μεταβλητών που συσχετίζονται με τις φυσικές διεργασίες.

Γενικά, οι μέθοδοι ταξινόμησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη φύση του αντικείμενου: (α) σε αυστηρές, αν κάθε αντικείμενο ανήκει αυστηρά σε μια μόνον κλάση, και (β) σε ευέλικτες ή ασαφείς μεθόδους, αν κάθε αντικείμενο μπορεί να ανήκει σε παραπάνω από μια κλάσεις με κάποιο βαθμό συμμετοχής σε αυτές (Güler and Thyne, 2004). Οι αλγόριθμοι ασαφούς ταξινόμησης στηρίζονται στη θεωρία των ασαφών συνόλων και αρκετοί στον αλγόριθμο fuzzy c-means (FCM) που προτάθηκε αρχικά από τον Dunn (1974) και βελτιώθηκε από τον Bezdek et al. (1984). Ο πυρήνας της θεωρίας των ασαφών συνόλων είναι η συνάρτηση συμμετοχής, η οποία εκφράζει, με αριθμητικό τρόπο, το βαθμό συμμετοχής ενός στοιχείου σε κάποιο σύνολο ή μια κλάση.

Η αβεβαιότητα, στον φυσικό κόσμο, έχει ως αποτέλεσμα, η διαδικασία προσομοίωσης ενός φυσικού συστήματος για λήψη μιας απόφασης, να επηρεάζεται σημαντικά από την εμπειρία του ερευνητή και τις πληροφορίες τις οποίες αυτός διαθέτει και μπορεί να αξιολογήσει. Στην προσέγγιση του πραγματικού κόσμου με την κλασική Αριστοτελική λογική, κάθε πρόταση μπορεί να είναι είτε αληθής είτε ψευδής, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα ενδιάμεσα ενδεχόμενα όπως, περίπου αληθές, ή μερικώς ψευδές. Αντίθετα, στην ασαφή λογική η τελική απόφαση είναι ορθή ή αληθής με κάποιο βαθμό βεβαιότητας, σύμφωνα με την άποψη του Zadeh (1965), κατά την οποία τα πάντα είναι θέμα βαθμού αληθείας.

Οι κλασικές μέθοδοι ταξινόμησης γήινων επιφανειών περιέχουν μη στατιστικές μεθόδους αλλά και στατιστικά μοντέλα. Οι κυριότερες μέθοδοι, μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης, είναι η στατιστική ταξινόμηση και η ασαφής ταξινόμηση. Η πιο συνήθης, από τις μη επιβλεπόμενες ταξινομήσεις, που χρησιμοποιείται, είναι η στατιστική. Η στατιστική ταξινόμηση έχει αρκετά μειονεκτήματα, με κυριότερο από αυτά την αδυναμία της να διαχειριστεί δεδομένα τα οποία προέρχονται από διαφορετικές κλίμακες. Στις στατιστικές μεθόδους συγκαταλέγεται και η παραμετρική μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Classifier) που συνήθως χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις δεδομένων πολλών μεταβλητών, όπως, για παράδειγμα, τα πολυφασματικά τηλεπισκοπικά δεδομένα.

Επιγραμματικά, στις στατιστικές μεθόδους ανήκουν επίσης ο αλγόριθμος k-means, η πολλαπλή παλινδρόμηση, και η ιεραρχική μέθοδος ταξινόμησης κατά Ward, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στην ταξινόμηση των γήινων επιφανειών (Bolliger, 2005· Bolliger and Mladenoff, 2005· Wardrop et al., 2005).

Μια μέθοδος επιβλεπόμενης ταξινόμησης είναι τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (βλ. 5.1.3), τα οποία εντάσσονται στο πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης. Ως μέθοδος επιβλεπόμενης ταξινόμησης, τα νευρωνικά δίκτυα έχουν αρκετά πλεονεκτήματα, με βασικότερα το ότι χρησιμοποιούν μη γραμμικές σχέσεις, διαχειρίζονται τον θόρυβο των αρχικών δεδομένων, και εκτελούν διαδικασίες με υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης (Upal and Neufeld, 1996), ενώ, επιπλέον, υπάρχει εμπειρία στη χρήση τους για ταξινόμηση των γήινων επιφανειών (Bacao et al., 2005· Crossman and Bryan, 2006· Papageorgaki and Nalbantis, 2013· Guo et al., 2021· Papageorgaki and Nalbantis, 2022· Ehsani, 2007· Hilbert and Ostendorf, 2001· Hsieh and Jourdan, 2006· Olden et al., 2004· Lenz and Peters, 2006· Park et al., 2001· Park and van de Giesen, 2004), αν και εφαρμόζονται σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με τις προαναφερόμενες στατιστικές τεχνικές. Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής των τεχνικών νευρωνικών δικτύων αξιοποιούνται στη μελέτη των ελληνικών λεκανών απορροής, η οποία διεξάγεται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής και της οποίας τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 9. Το μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο προτείνεται για τη ημικατανεμημένη ταξινόμηση της λεκάνης απορροής σε κατηγορίες τοπίου παρουσιάζεται στο επόμενο εδάφιο (βλ. 5.6.3).

5.6.3 Η προτεινόμενη μεθοδολογία

Τα μοντέλα βροχόπτωσης-απορροής εξελίχθηκαν από απλές σε πιο λεπτομερείς δομές που μοντελοποιούν τις φυσικές διεργασίες που εκτελούνται εσωτερικά σε μια λεκάνη απορροής σε διάφορες χωρικές κλίμακες: από την κλίμακα της λεκάνης απορροής μέχρι σχεδόν την μικροκλίμακα. Η προσπάθεια περιγραφής των διεργασιών σε μικρή χωρική κλίμακα οδήγησε σε περίπλοκα κατανεμημένα μοντέλα με επακόλουθο την αρνητική επίδραση της αυξημένης αβεβαιότητας στην πρόγνωση. Από την άλλη πλευρά, τα αδιαμέριστα μοντέλα ενδέχεται να αποτύχουν να αναπαραστήσουν τις διεργασίες στη λεκάνη απορροής λόγω της απλότητάς τους. Ανάμεσα στις δύο προσεγγίσεις βρίσκεται η ημικατανεμημένη μοντελοποίηση που αναζητά το βέλτιστο επίπεδο πολυπλοκότητας για επίτευξη υψηλής προγνωστικής ακρίβειας. Η πρόβλεψη της επιφανειακής απορροής σε μη μετρούμενες λεκάνες απαιτεί τη μεταφορά υδρολογικών πληροφοριών στο χώρο, η οποία διευκολύνεται σημαντικά με τη χρήση φυσικά παρατηρούμενων ποσοτήτων, όπως τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Αυτά επιτρέπουν την ταξινόμηση του τοπίου για τον προσδιορισμό των περιοχών που είναι διακριτές σε σχέση με τους κυρίαρχους μηχανισμούς παραγωγής απορροής.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία αφορά στην κατανεμημένη μοντελοποίηση των γήινων κατηγοριών τοπίου. Στο πλαίσιο της προσέγγισης των ημικατανεμημένων μοντέλων βροχόπτωσης-απορροής υιοθετείται η έννοια της ταξινόμησης τοπίου σε κατηγορίες υδρολογικών τοπίων, οι οποίες, αργότερα, αποτελούν τις χωρικές ενότητες για την ημικατανεμημένη μοντελοποίηση. Για την εκτίμηση της απορροής, εφαρμόζεται μια τροποποιημένη εκδοχή του μοντέλου FLEX–Topo που προτάθηκε από τον Savenije (2010). Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται σε ελληνικές λεκάνες με ενθαρρυντικά αποτελέσματα (βλ. Κεφάλαιο 9). Η βασική ιδέα για τη χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου προέρχεται από το γεγονός ότι το ίδιο το μοντέλο είναι κατασκευασμένο ώστε να είναι ευέλικτο και να τροποποιείται ανάλογα με τις κατηγορίες τοπίου. Το FLEX–Topo αποτελεί μια απλή προσέγγιση μοντέλου, το οποίο συνδυάζει την απόδοση της πολυπλοκότητας και της ετερογένειας του τοπίου με την απλότητα ενός αδιαμέριστου μοντέλου το οποίο αποδίδει το

κυρίαρχο καθεστώς απορροής στο σύνολο μιας λεκάνης απορροής. Η επιβλεπόμενη ταξινόμηση τοπίου πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας, εκτός των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών, ορθοφωτογραφίες κατάλληλης κλίμακας και δεδομένα για τη χρήση γης για τη συλλογή ποιοτικής πληροφορίας. Η πληροφορία αυτή εισάγεται ως δείγμα εκπαίδευσης σε ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο, το οποίο χρησιμοποιείται για την εκτέλεση της ταξινόμησης του υπόλοιπου τμήματος της λεκάνης απορροής. Συνολικά, εντοπίζονται τέσσερις κατηγορίες τοπίου (landscape classes) με βάση πέντε γεωμορφολογικά κριτήρια, τα οποία υπολογίζονται από την πληροφορία που αντλείται από ΨΜΕ για το υψόμετρο του εδάφους, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο Υποκεφάλαιο 3.2. Η προσέγγιση του FLEX–Topo είναι κατασκευασμένη να ανταποκρίνεται σε ένα περιορισμένο αριθμό κατηγοριών τοπίου, στις οποίες τα χαρακτηριστικά του εδάφους που περιγράφονται από την τοπογραφία παίζουν τον κύριο ρόλο, ενώ, παράλληλα, περιλαμβάνεται και πληροφορία σχετική με την γεωλογία, και τις χρήσεις γης.

Επίσης, υιοθετείται η προσέγγιση του Winter (2001) ως προς τον ορισμό της «θεμελιώδους υδρολογικής μονάδας τοπίου» (Fundamental Hydrologic Landscape Unit). Σύμφωνα με τον Winter (2001), στην κλίμακα της λεκάνης απορροής εντοπίζονται μοτίβα με εντυπωσιακά απλή συμπεριφορά, και, επομένως, χρησιμοποιώντας τοπογραφικά κριτήρια, μπορεί να γίνει υδρολογική διάκριση των κατηγοριών τοπίου. Εξ άλλου, όπως ήδη αναφέρθηκε, ο ίδιος πρότεινε τον ορισμό της θεμελιώδους υδρολογικής μονάδας τοπίου, ως τη χωρική αλληλουχία ενός υψιπέδου (plateau) διαχωριζόμενου από μια περιοχή χαμηλού υψομέτρου (παρόχθια περιοχή) με μια ενδιάμεση έντονης κλίσης πλαγιά (hillslope).

Για την ταξινόμηση του τοπίου υιοθετούνται οι βασικές αρχές της μεθοδολογίας που προτάθηκε από τους Gharari et al. (2011) και, επομένως, η επιφάνεια του εδάφους της λεκάνης απορροής ταξινομείται σε κατηγορίες τοπίου σύμφωνα με τα πέντε κριτήρια ταξινόμησης που επιλέχθηκαν.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία (Σχήμα 5-7) αποτελείται από τρία βασικά βήματα:

Στο Βήμα 1 εκτελούνται διαδικασίες στηριζόμενες στην ανάλυση της πληροφορίας από κλασικούς τοπογραφικούς χάρτες ή ΨΜΕ, και γίνεται εκτίμηση της ΑΣΕ, εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου και υπολογισμός των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών τα οποία θα αποτελέσουν τα κριτήρια στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση.

Στο Βήμα 2, γίνεται συλλογή των δεδομένων του δείγματος εκπαίδευσης του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου, η εκπαίδευσή αυτού, και, τελικά, η ταξινόμηση ολόκληρης της λεκάνης απορροής σε κατηγορίες τοπίου.

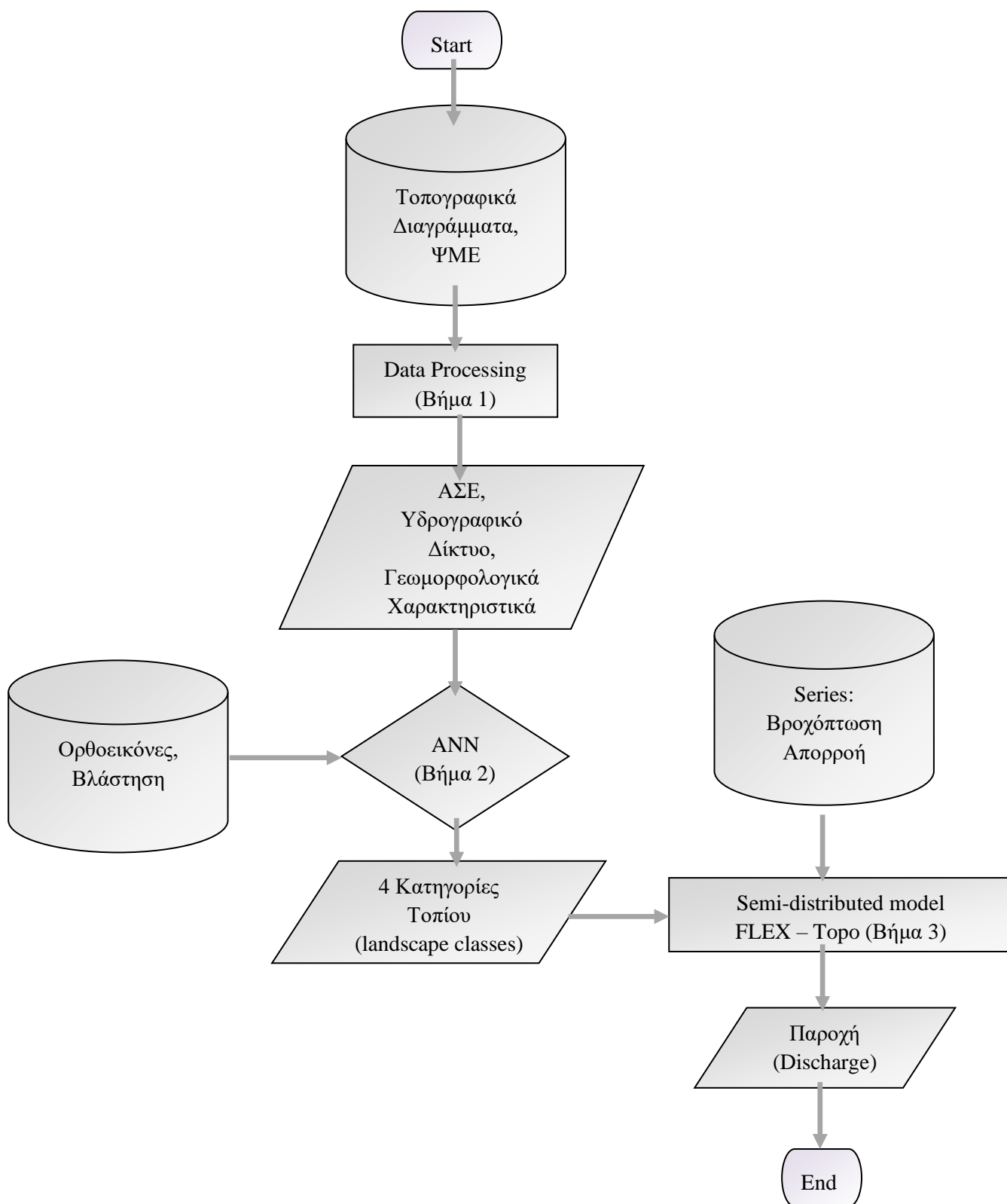
Στο τελευταίο βήμα της προταθείσας προσέγγισης, (Βήμα 3), εκτελείται η ημικατανεμημένη υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής με χρήση του μοντέλου FLEX–Topo και η εκτίμηση της παροχής στο στόμιο εξόδου της λεκάνης απορροής.

Στα κριτήρια που επιλέχθηκαν για την ταξινόμηση ανήκουν η υψομετρική διαφορά του κάθε κελιού της λεκάνης απορροής από το εγγύτερο κελί που χαρακτηρίζεται ως υδρογραφικό δίκτυο (από προηγούμενη διαδικασία), η οποία αποτελεί το δείκτη HAND (Nobre et al., 2011), η κλίση του εδάφους, ο προσανατολισμός του κάθε κελιού της λεκάνης απορροής, η απόσταση κάθε κελιού της λεκάνης απορροής από το εγγύτερο κελί που χαρακτηρίζεται ως υδρογραφικό δίκτυο, θεωρημένη κατά μήκος της διαδρομής της διεύθυνσης ροής, και η κατηγορία της χρήσης γης κάθε κελιού όπως αυτή είναι αποθηκευμένη στα δεδομένα Corine Land Cover (2020).

Ο υπολογισμός του δείκτη HAND και της απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο έγινε σύμφωνα με το προταθέν αντίστοιχο μεθοδολογικό πλαίσιο που περιγράφεται στο εδάφιο 3.2.5, ενώ οι τότε αλγόριθμοι επικυρώθηκαν και ελέγχθηκαν και με χρήση άλλων εξωτερικών συναρτήσεων του MatLab (Parageorgaki and Nalbantis, 2018). Επίσης, για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου και την μετέπειτα χρήση του στον υπολογισμό των δύο παραπάνω δεικτών, υιοθετήθηκε η μεθοδολογία της ΑΣΕ (Parageorgaki and Nalbantis, 2017). Σύμφωνα με τη μεθοδολογία, η ΑΣΕ υπολογίζεται από τις κεφαλές όπως αυτές κατανέμονται χωρικά σε τοπογραφικούς χάρτες κλίμακας 1/ 50000, για τρεις διαφορετικές συνθήκες υγρασίας: την υγρή περίοδο (wet), την ξηρή περίοδο (dry), και την ενδιάμεση περίοδο (intermediate). Επομένως, για κάθε μία από τις παραπάνω τρεις κατηγορίες υδρολογικών συνθηκών, εξάγεται το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής και υπολογίζεται ο δείκτης HAND και η απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο. Έλεγχος ως προς τη συμβολή στην ταξινόμηση των παραπάνω περιόδων γίνεται με ανάλογη εφαρμογή του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου στα αντίστοιχα δεδομένα κάθε φορά.

Οι ορθοφωτογραφίες χρησιμοποιούνται ως ποιοτική πληροφορία για την οπτική ταξινόμηση επιλεγμένων σημείων -που αναφέρονται ως σημεία αναφοράς εντός της λεκάνης απορροής- σε τέσσερις κατηγορίες, όσες επιλέχθηκαν να είναι και οι τελικές κατηγορίες τοπίου. Από την οπτική ταξινόμηση των σημείων αναφοράς συλλέγεται το δείγμα των δεδομένων εκπαίδευσης που θα χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία εκπαίδευσης και αξιολόγησης του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου. Αργότερα, το δείγμα δεδομένων εκπαίδευσης εισήχθη σε ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο με ένα κρυφό επίπεδο για την ταξινόμηση όλων των κελιών της λεκάνης απορροής (Ehsani, 2007). Το TNΔ εκπαιδεύεται χρησιμοποιώντας το 70% του δείγματος εκπαίδευσης των σημείων αναφοράς (training), ενώ το υπόλοιπο 30% αφιερώνεται σε δοκιμές (testing) και επικύρωση (validation).

Στη συνέχεια της μεθοδολογίας, μιας και οι τέσσερις κατηγορίες τοπίου συσχετίζονται με τις αντίστοιχες κατηγορίες των ταξινομήσεων των Winter (2001) και Scherrer and Naef (2003), χρησιμοποιείται η προηγούμενη γνώση και καθεμία από τις τέσσερις κατηγορίες τοπίου συνδέεται με καθέναν από τους τέσσερις κυρίαρχους μηχανισμούς απορροής των Freer et al. (2002). Η παραπάνω διαδικασία επιτρέπει τη χρήση των μηχανισμών απορροής, μέσω των οποίων επιλέγεται το αντίστοιχο αδιαμέριστο (lumped) μοντέλο εντός του ημικαταναμημένου μοντέλου FLEX-Topo.



Σχήμα 5-7: Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

5.6.4 Μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής FLEX-Topo

Το μοντέλο FLEX – Topo, το οποίο προτάθηκε από τον Savenije (2010) είναι ένα ευέλικτο εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο βασισμένο στην τοπογραφική πληροφορία, το οποίο εκμεταλλεύομενο την γνώση που αντλείται από τις τοπογραφικές υπογραφές για το σχεδιασμό των εννοιολογικών μοντέλων, χρησιμοποιεί τους μηχανισμούς γένεσης της απορροής για κάθε κατηγορία τοπίου ως μέσο για την προσέγγιση ενός απλούστερου τρόπου αναπαράστασης της πολυπλοκότητας και της ετερογένειας των υδρολογικών διεργασιών εντός μιας λεκάνης απορροής. Το μοντέλο ουσιαστικά αποτελεί μια μέση οδό σαφώς βελτιωμένη, μεταξύ των φειδωλών αδιαμέριστων και των πολύπλοκων κατανεμημένων μοντέλων.

Πριν την περιγραφή της δομής του μοντέλου FLEX – Topo, είναι ενδιαφέρον να τονιστεί πως πρακτικά το FLEX – Topo μπορεί να θεωρηθεί, ως ένα ενιαίο μεθοδολογικό πλαίσιο μοντελοποίησης, το οποίο έχει στόχο την εξαντλητική αξιοποίηση της τοπογραφικής πληροφορίας εντός ενός υδρολογικού μοντέλου, και της πρακτικής χρήσης αυτής της πληροφορίας εντός κάθε αδιαμέριστου μοντέλου, παρά ως ένα ακόμη εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο. Η παραπάνω συνθήκη αποτέλεσε και τον κύριο λόγο επιλογής και χρήσης αυτού του μοντέλου έναντι οποιοδήποτε άλλου εννοιολογικού μοντέλου. Η γενικότερη φιλοσοφία του μοντέλου FLEX – Topo βασίζεται στο γεγονός ότι η δομή του εξαρτάται από έναν καθορισμένο αριθμό κατηγοριών τοπίου, οι οποίες περιλαμβάνουν πληροφορία σχετική με την γεωλογία, τις χρήσεις γης και την γεωμορφολογία του εδάφους της λεκάνης απορροής και ταυτόχρονα αντιστοιχίζονται στον κυρίαρχο μηχανισμό γένεσης της απορροής σε κάθε κατηγορία τοπίου. Επομένως, κάθε κατηγορία τοπίου παρουσιάζεται ως ένα αδιαμέριστο μοντέλο, που εκτελείται παράλληλα σε ένα ευρύτερο ημικατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο.

Κατά την εφαρμογή του μοντέλου FLEX – Topo, η τοπογραφική πληροφορία αποτελεί κυρίαρχο δείκτη στον εντοπισμό των κατηγοριών τοπίου και την αντιστοίχιση σε αυτές ενός κυρίαρχου υδρολογικού μηχανισμού. Για τον εντοπισμό των κατηγοριών τοπίου, χρησιμοποιείται το πολύτιμο κριτήριο στον εντοπισμό υδρολογικά σημαντικών κλάσεων τοπίου, ο δείκτης HAND (Rennó et al., 2008· Nobre et al., 2011· Gharari et al., 2011· Papageorgaki and Nalbantis, 2013· 2016), ο οποίος αποτελεί την άμεση αντανάκλαση της κεφαλής του υδρογραφικού δικτύου στον πλησιέστερο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου. Το μοντέλο FLEX – Topo, χρησιμοποιώντας το ευέλικτο πλαίσιο μοντελοποίησης (Fenicia et al., 2008· 2011), μπορεί να αποδώσει διαφορετική δομή μοντέλου για να αναπαραστήσει κάθε διαφορετική κυρίαρχη υδρολογική διεργασία, για τις διαφορετικές κατηγορίες τοπίου εντός μιας λεκάνης απορροής.

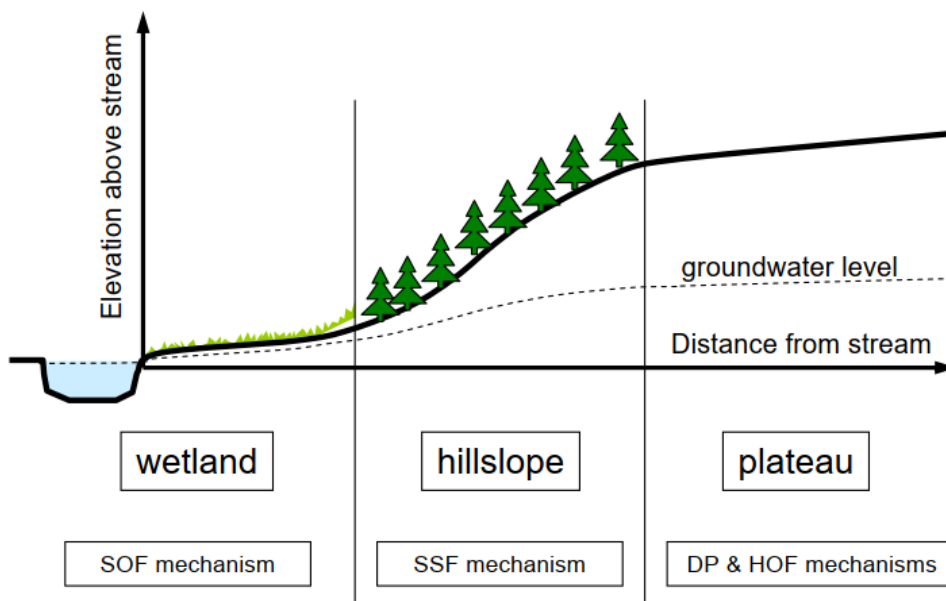
Αναλυτικότερα, το μοντέλο προσπαθεί να βρει τη χρυσή τομή ανάμεσα στη χρήση του απλοϊκού τοπογραφικού μοτίβου τοπίου σύμφωνα με τον Winter (2001), δηλαδή, της θεμελιώδους υδρολογικής μονάδας τοπίου που αποτελείται από τα τρία στοιχεία «παρόχθια περιοχή – πλαγιά – υψίπεδο» (wetland–hill slope–plateau), και μεταξύ, της ετερογένειας που εμφανίζει η πραγματικότητα, ώστε να οδηγηθεί στην αναπαράσταση της τελευταίας με απλότητα εντός ενός αδιαμέριστου υδρολογικού μοντέλου.

Επομένως, το μοντέλο βασίζεται σε ένα σύστημα ταξινόμησης του τοπίου, τα οποία λογικά βασίζονται στην τοπογραφία, καθώς πρόσφατα η χρήση τοπογραφικών υπογραφών (χαρακτηριστικών) αποδείχθηκε αξιόπιστη στον προσδιορισμό κατηγοριών τοπίου. Μέχρι σήμερα πολλές μέθοδοι ταξινόμησης χρησιμοποιούσαν την τοπογραφική πληροφορία, όπως για παράδειγμα χαρακτηριστικά όπως το υψόμετρο, την κλίση, τον προσανατολισμός και την καμπυλότητα, αλλά λιγότερες χρησιμοποιούσαν τον δείκτη HAND. Το υψόμετρο και η κλίση

του εδάφους δεν είναι κατάλληλα κριτήρια για να διακρίνουν μεταξύ τους τις παρόχθιες περιοχές από τις πλαγιές και το υψίπεδο, ενώ ο δείκτης HAND μπορεί. Ο δείκτης HAND πλησιάζει τον Τοπογραφικό Δείκτη Υγρασίας, TWI των Beven and Kirkby (1997), όμως, ο τελευταίος είναι ένας δείκτης εντοπισμού της πιθανότητας κορεσμού κάθε σημείου μιας λεκάνης απορροής, λαμβάνοντας υπόψιν την επιρροή της τοπογραφίας στην ύπαρξη κορεσμένης επιφανειακής απορροής (Saturated Overland Flow, SOF). Ο ισχυρισμός όμως του δείκτη TWI μπορεί να μην αποδειχθεί σωστός ισχυρισμός για κάθε περιοχή της λεκάνης απορροής. Από την άλλη πλευρά, ο δείκτης HAND (Renno et al., 2008) χρησιμοποιεί τοπογραφική πληροφορία από SRTM DEM για να εξάγει χωρική πληροφορία σχετική με την υψομετρική διαφορά κάθε κελιού της λεκάνης απορροής από τον εγγύτερο πρώτης τάξης κλάδου του υδρογραφικού δικτύου, και επομένως μπορεί να εκτιμηθεί η συνάρτηση που συσχετίζει την τοπογραφία με τους κλάδους πρώτης τάξης. Μέσω της χρήσης του δείκτη HAND μπορούν να διακριθούν μεταξύ τους οι παρόχθιες περιοχές από τις πλαγιές και το υψίπεδο. Εκ του αποτελέσματος κρίνεται ότι ο δείκτης HAND είναι ένα ισχυρό εργαλείο για τη διάκριση του υδρολογικού τοπίου και ένα αναγκαίο κριτήριο για την ταξινόμηση τοπίου για υδρολογικούς σκοπούς.

Πριν την περιγραφή της δομής του μοντέλου FLEX – Topo, είναι αναγκαίο να οριστούν οι παρακάτω κατηγορίες τοπίου, ώστε να είναι κατανοητός ο τρόπος με τον οποίον λαμβάνονται υπόψη εντός του μοντέλου βροχόπτωσης απορροής FLEX – Topo. Ως παρόχθια περιοχή (wetland) θεωρείται εκείνο το στοιχείο υδρολογικού τοπίου, στο οποίο ο κυρίαρχος μηχανισμός επιφανειακής απορροής είναι η κορεσμένη επιφανειακή απορροή (SOF). Ως πλαγιά (hill slope) θεωρείται εκείνο το στοιχείο υδρολογικού τοπίου, στο οποίο ο κυρίαρχος μηχανισμός επιφανειακής απορροής είναι η κορεσμένη υπεδάφια απορροής (ή storage excess subsurface flow, SSF). Ως υψίπεδο θεωρείται εκείνο το στοιχείο υδρολογικού τοπίου, με μέτρια κλίση εδάφους στο οποίο ο κυρίαρχος μηχανισμός επιφανειακής απορροής είναι η εξάτμιση - βαθιά διήθηση (ή evaporation excess deep percolation, DP). Ενώ να σημειωθεί ότι ο όρος *excess*, αντιστοιχεί στην εφαρμογή ενός κατωφλίου.

Παρακάτω ακολουθεί η σχηματική δομή του μοντέλου FLEX – Topo (Σχήμα 5-8). Το περιεχόμενο του σχήματος βασίζεται στο δείκτη HAND, ο οποίος διακρίνει τις τρεις κατηγορίες τοπίου της λεκάνης απορροής όταν αυξάνεται το υψόμετρό τους από το υψόμετρο του υδρογραφικού δικτύου, ενώ ταυτόχρονα οι απόστασή τους από το υδρογραφικό δίκτυο μεγαλώνει.



Σχήμα 5-8: Η δομή του μοντέλου FLEX – Toro (πηγή: Savenije, 2010).

Εντός του μοντέλου FLEX – Toro, καθεμία από τις κατηγορίες τοπίου αντιστοιχεί σε ένα υποσύστημα και περιγράφεται από τη δική της εννοιολογική δομή μοντέλου. Στην περίπτωση κατά την οποία είναι διαθέσιμη πληροφορία για τη γεωλογία του υπεδάφους, αυτή χρησιμοποιείται για την εκτίμηση παραμέτρων όπως η περατότητα (permeability), η αποθηκευτική ικανότητα, η διηθητική ικανότητα του εδάφους (infiltration capacity), ο χρόνος παραμονής του νερού (residence time) και άλλες.

Η παραπάνω ταξινόμηση είναι παρόμοια με την ταξινόμηση κατά Winter (2001), η οποία αναφέρθηκε προηγουμένα, και συνδέεται με τους τέσσερις μηχανισμούς των Scherrer and Naef (2003), οι οποίοι είναι:

- η κορεσμένη επιφανειακή απορροή - Saturation Overland Flow (SOF) στις επίπεδες περιοχές,
- η υπόγεια ροή - SubSurface Flow (SSF) στις πλαγιές με μικρή περατότητα,
- η βαθιά διήθηση - Deep Percolation (DP) σε διαπερατά εδάφη, και
- η επίγεια ροή Horton - Hortonian Overland Flow (HOF) στις περιοχές στις οποίες η ένταση της βροχόπτωσης υπερβαίνει την αποθηκευτική ικανότητα.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι απλή, καθώς διαχειρίζεται μόνο τρεις κατηγορίες τοπίου που τις θεωρεί ως τρία αδιαμέριστα μοντέλα σε παράλληλες διαδικασίες, καθώς οι τέσσερις μηχανισμοί αποδίδονται στις τρεις κατηγορίες τοπίου: παρόχθια περιοχή – πλαγιά – υψίπεδο. Παρόμοιες γεωμορφολογικές ταξινομήσεις έχουν γίνει στο παρελθόν (Park and Van de Giesen, 2004), όμως η σύνδεση κάθε κατηγορίας τοπίου με ένα αδιαμέριστο εννοιολογικό μοντέλο αποτελεί πρωτότυπο σημείο στην οργάνωση του μοντέλου FLEX – Toro.

Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή καθενός από τα αδιαμέριστα εννοιολογικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν καθεμία από τις κατηγορίες τοπίου. Η περιγραφή αφορά κυρίως τα χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας και τις παραμέτρους του μοντέλου.

Η παρόχθια περιοχή χαρακτηρίζεται από επίπεδες εκτάσεις, οι οποίες είναι καλυμμένες από υγροτόπους και βοσκοτόπους. Στην περιοχή ευνοούνται οι συνθήκες για απορροή. Ο κυρίαρχος μηχανισμός γένεσης της απορροής είναι η κορεσμένη επιφανειακή απορροής (SOF).

Η πλαγιά χαρακτηρίζεται από απότομες κλίσεις, και συνήθως καλύπτεται από δάσος. Στην περιοχή ευνοούνται οι συνθήκες για επιφανειακή απορροή. Ο κυρίαρχος μηχανισμός γένεσης της απορροής είναι η storage excess sub-surface flow (SSF).

Το υπίπεδο χαρακτηρίζεται από εκτάσεις με ήπιο ανάγλυφο, ενώ οι συνήθεις χρήσεις γης είναι βοσκότοποι και αγροτικές εκτάσεις. Στην περιοχή ευνοούνται οι συνθήκες για εξάτμιση και αποθήκευση νερού. Ο κυρίαρχος μηχανισμός γένεσης της απορροής είναι η evaporation excess deep percolation (DF).

Στον Πίνακα 5-2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι παράμετροι του μοντέλου της κάθε κατηγορίας τοπίου. Αναλυτικότερα, σε κάθε κατηγορία τοπίου χρησιμοποιούνται οι παρακάτω παράμετροι.

Πίνακας 5-2: Οι παράμετροι των αδιαμέριστων μοντέλων της κάθε κατηγορίας τοπίου.

Κατηγορία Τοπίου	Wetland	Hill slope	Plateau
Μηχανισμός	Saturation overland flow	Rapid sub-surface flow	Groundwater flow
Παράμετροι	D_w [L/T], c_c , $S_{w,max}$ [L], f_c , β_w [-], f_c	D_h [L/T], c_c , $S_{h,max}$ [L], f_c , β_h [-], f_c , a [-], f_c , T_h [T], f_c	D_p [L/T], est, $S_{u,max}$ [L], est, S_{wp} [L], est, p [-], est, K_p [T], m_c
Υποστήριξη από τον Μηχανισμό	Groundwater flow	Groundwater flow	Infiltration excess flow (during high intensity rainfall)
Παράμετροι	K_w [T], m_c	K_h [T], m_c , C [L/T], est	F_{max} [L/T], est, T_p [T], est

Για την παρόχθια περιοχή χρησιμοποιούνται οι παρακάτω 4 παράμετροι (Σχήμα 5-9):

- κατώφλι παρεμπόδισης - interception threshold D_w [L/T],
- μέγιστη αποθηκευτική ικανότητα της ακόρεστης ζώνης του εδάφους - maximum moisture storage before the wetland is fully saturated $S_{w,max}$ [L],
- μια παράμετρος, δύναμη - power of the beta-function β_w , και
- ο χρόνος παραμονής του νερού - slow groundwater seepage residence time K_w [T].

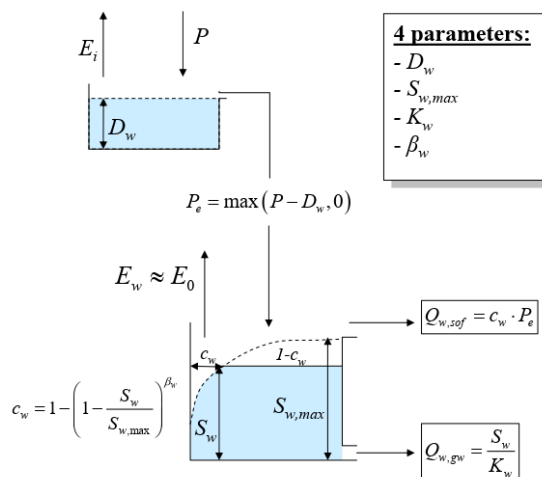
Ως προς την εκτίμηση του τελευταίου, είναι δύσκολος ο προσδιορισμός ξεχωριστά κάθε χρόνου για κάθε κατηγορία, επομένως προτείνεται ο υπολογισμός του χρόνου παραμονής όλων των κατηγοριών μαζί (K_w [T], K_h [T], K_p [T]).

Η παράμετρος D_w [L/T], η οποία αφορά την παρόχθια περιοχή, αποτελεί το ημερήσιο κατώφλι παρεμπόδισης που πρέπει να αφαιρεθεί ως ποσότητα από την βροχόπτωση σε ημερήσια χρονική κλίμακα (De Groen and Savenije, 2006). Στη βιβλιογραφία για συγκεκριμένη κατηγορία τοπίου υπάρχει εκτίμηση της τιμής της παραμέτρου. Από την άλλη πλευρά, η συνολική ποσότητα της βροχόπτωσης που αφαιρείται λόγω του κατωφλίου παρεμπόδισης δεν επηρεάζεται από τη τιμή του κατωφλίου. Τα ίδια ισχύουν και για τις τιμές των κατωφλίων παρεμπόδισης για την πλαγιά και το plateau (D_h [L/T] και D_p [L/T]).

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι για την παρόχθια περιοχή παραμένουν δύο σημαντικές παράμετροι, η μέγιστη αποθηκευτική ικανότητα της ακόρεστης ζώνης του εδάφους και η δύναμη β_w , οι οποίες μπορούν να εκτιμηθούν μέσω της βαθμονόμησης από τις αιχμές αμέσως

μετά την έναρξη της βροχόπτωσης, από την κορεσμένη επιφανειακή απορροής της παρόχθιας ζώνης (riparian zone).

Wetland



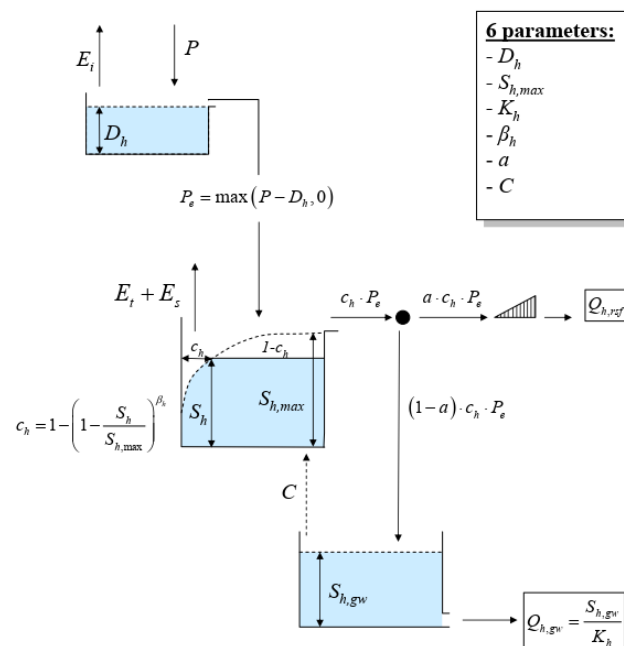
Σχήμα 5-9: Το εννοιολογικό μοντέλο για την παρόχθια περιοχή.

Για την πλαγιά απαιτούνται να προσδιοριστούν οι παρακάτω 6 παράμετροι (Σχήμα 5-10):

- κατώφλι παρεμπόδισης - interception threshold D_h [L/T],
- μέγιστη αποθηκευτική ικανότητα της ακόρεστης ζώνης του εδάφους - maximum moisture storage before the wetland is fully saturated $S_{h,max}$ [L],
- μια παράμετρος, δύναμη -power of the beta-function β_h ,
- the separator between rapid subsurface flow and groundwater recharge a [-],
- η τριχοειδής ικανότητα - amount of capillary rise C [L/T], και
- ο χρόνος παραμονής του νερού - slow groundwater seepage residence time K_h [T].

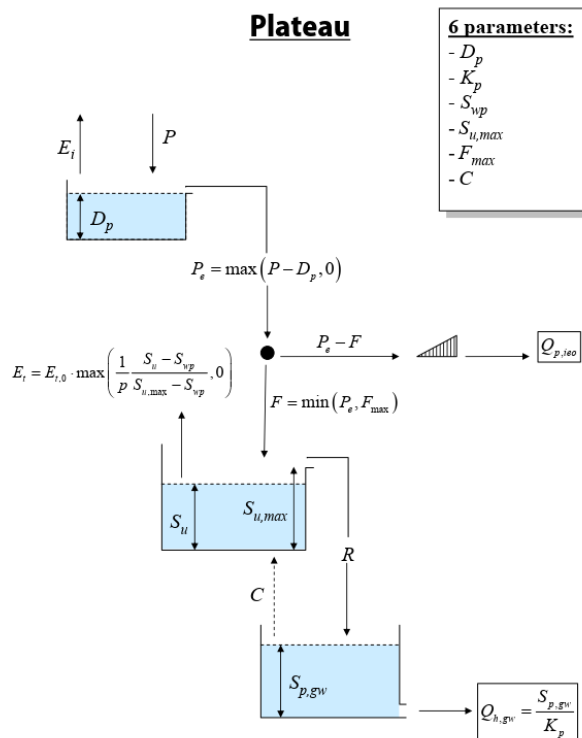
Για την πλαγιά απομένουν να προσδιοριστούν οι παρακάτω 4 παράμετροι, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, η μέγιστη αποθηκευτική ικανότητα της ακόρεστης ζώνης του εδάφους $S_{h,max}$ [L], η δύναμη β_h , ο δείκτης a [-] και ο χρόνος υστέρησης της υποδερμικής ροής (rapid subsurface flow) T_h [T]. Μιας και δεν υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ αυτών των παραμέτρων, που απομένουν, εάν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα απορροής, αυτές οι παράμετροι πρέπει να προσδιοριστούν. Η τριχοειδής ικανότητα C [L/T], πρέπει να εκτιμηθεί με βάση το υδατικό ισοζύγιο της πλαγιάς, αν και δεν είναι μια παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά. Παρόλα αυτά, αν εκτιμηθεί ως συνάρτηση του αποθέματος της εδαφικής υγρασίας της πλαγιάς (S_h), τότε συμβάλλει απλώς για να διατηρεί τη δυνατότητα εξάτμισης της δασικής έκτασης που καταλαμβάνει την πλαγιά.

Hillslope



Σχήμα 5-10: Το εννοιολογικό μοντέλο για την πλαγιά.

Δεδομένου ότι σύμφωνα με την συγκεκριμένη εννοιολογική προσέγγιση, δεν υπάρχει ουσιαστική απορροή στο plateau αναμένεται, οι παράμετροι του μοντέλου για το υψίπεδο να εκτιμηθούν με βάση την εδαφική υγρασία ή μέσω μετρήσεων των υπόγειων υδάτων (Σχήμα 5-11). Εάν δεν είναι διαθέσιμα δεδομένα όπως αυτά που αναφέρθηκαν, οι παράμετροι πρέπει να εκτιμηθούν διαφορετικά. Στην περίπτωση κατά την οποία υπάρχουν διαθέσιμες στάθμες των υπόγειων υδάτων, τότε μέσω της βαθμονόμησης της δυναμικής των διακυμάνσεων της στάθμης των υπόγειων υδάτων, είναι δυνατός ο περιορισμός του μέγιστου του αποθέματος της εδαφικής υγρασίας $S_{p,max}$ [L].



Σχήμα 5-11: Το εννοιολογικό μοντέλο για το υψίπεδο.

Από τη στιγμή που οι μηχανισμοί γένεσης της απορροής έχουν συνδεθεί με τις κατηγορίες τοπίου, εύλογο είναι το ερώτημα αν υπάρχει σύνδεση μεταξύ των κατηγοριών τοπίου ως προς το υδρολογικό καθεστώς. Η απάντηση στο ερώτημα δεν είναι ξεκάθαρη, ή καλύτερα το αν υπάρχει σημαντική σύνδεση μεταξύ των κατηγοριών τοπίου ή όχι, εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες που ισχύουν σε κάθε λεκάνη απορροής. Από τον TWI φαίνεται ότι οι πλαγιές συμβάλλουν με την απορροή τους στις παρόχθιες περιοχές, με αποτέλεσμα να διευρύνονται οι τελευταίες και επομένως οι περιοχές οι οποίες συνδέονται σε SOF, μεγαλώνουν. Η παραδοχή αυτή πρέπει να ελεγχθεί στην υπό εξέταση λεκάνη και επομένως, διαφορετικά εννοιολογικά μοντέλα πρέπει να ελεγχθούν επίσης.

Η προσέγγιση του μοντέλου FLEX – Torro δεν πρέπει να θεωρηθεί ως ένα ακόμα εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο, αλλά ως ένα πλαίσιο σύμφωνα με το οποίο αναπτύσσεται μια κατάλληλη δομή μοντέλου, η οποία μέσω της χρήσης της τοπογραφικής πληροφορίας θα διακρίνει περιοχές με διαφορετικά κυρίαρχα υδρολογικά καθεστώτα εντός της λεκάνης απορροής. Το μοντέλο FLEX – Torro διατηρεί την ευελιξία της προσέγγισης των δομών των μοντέλων όπως προτάθηκαν από τους Fenicia et al. (2008, 2011). Να σημειωθεί ότι μέσω ενός ευέλικτου εννοιολογικού μοντέλου μπορούν να αναπτυχθούν διαφορετικές κλιματικές και γεωλογικές συνθήκες και διαφορετικές συνθήκες χρήσεις γης, μέσω της διαθέσιμης τοπογραφικής πληροφορίας για το ανάγλυφο του εδάφους.

Καταληκτικά να σημειωθεί ότι κατά τη διαδικασία της υδρολογικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς μιας λεκάνης απορροής μέσω της εφαρμογής ενός υδρολογικού μοντέλου, είναι αναγκαίο το στάδιο της βαθμονόμησης του μοντέλου με τη χρήση ενός μέρους των δεδομένων χρονοσειρών. Κατά τη βαθμονόμηση ουσιαστικά προσδιορίζονται οι παράμετροι του υδρολογικού μοντέλου, έτσι ώστε να ανταποκρίνονται με τον πιο αξιόπιστο τρόπο στη αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών του συστήματος της λεκάνης απορροής. Λόγω της βελτιστοποίησης των παραμέτρων, χρησιμοποιούνται δείκτες, οι οποίοι ποσοτικοποιούν την προσαρμογή του μοντέλου, συγκρίνοντας τα εξαγόμενα από την εφαρμογή του υδρολογικού

μοντέλου με τα αντίστοιχα ιστορικά δεδομένα. Οι πιο γνωστοί συντελεστές είναι ο συντελεστής των Nash και Sutcliffe (NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970· Sutcliffe, 1978), το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) και το μέσο σφάλμα. Συνήθως, στην προσομοίωση των λεκανών απορροής μέσω υδρολογικών μοντέλων, για την εκτίμηση παρόμοιων δεικτών χρησιμοποιούνται οι χρονοσειρές των μετρημένων και των προσομοιωμένων παροχών στην διατομή μελέτης κάθε λεκάνης ή στατιστικά αυτών των χρονοσειρών.

Η καταλληλότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου εκτιμάται με το δείκτη NSE (Nash-Sutcliffe, 1970) ορίζεται από την Εξίσωση 5.14 ως εξής:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ist, i} - Q_{m, i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{ist, i} - \bar{Q}_{ist, i})^2} \quad (5.14)$$

όπου $Q_{ist, i}$ οι ημερήσιες καταγεγραμμένες παροχές (ιστορικές)

$\bar{Q}_{ist, i}$ ο μέσος όρος των ημερήσιων καταγεγραμμένων παροχών (ιστορικές)

$Q_{m, i}$ οι ημερήσιες εκτιμημένες παροχές (modeled).

Να αναφερθεί ότι όταν η τιμή του δείκτη πλησιάζει τη μονάδα, οι μοντελοποιημένες παροχές πλησιάζουν τις καταγεγραμμένες παροχές, που είναι το ζητούμενο. Στην περίπτωση κατά την οποία ο δείκτης λάβει αρνητικές τιμές, θεωρείται ότι το βαθμονομημένο μοντέλο είναι αναξιόπιστο. Λόγω της δομής του δείκτη, ο οποίος λαμβάνει υπόψη εκτός από την απόκλιση των δύο χρονοσειρών και τη διασπορά του δείγματος, εισάγοντας την απόκλιση των τιμών της ιστορικής χρονοσειράς από την μέση τιμή του ιστορικού δείγματος. Αν το δείγμα των ιστορικών δεδομένων έχει μεγάλη διασπορά, η τιμή του δείκτη πλησιάζει τη μονάδα.

Ο συντελεστής NSE εξετάζει την απόκλιση των τιμών των δύο χρονοσειρών, ενώ μπορεί να εκτιμηθεί είτε για το συνολικό μήκος των δύο χρονοσειρών, είτε για ένα επιλεγμένο χρονικό παράθυρο. Ο συντελεστής εκτιμά με ακρίβεια την απόκλιση μεταξύ των τιμών των μοντελοποιημένων παροχών από τις ιστορικά παρατηρούμενες παροχές.

5.7 Κατάρτιση Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος με βάση ελλιπή δεδομένα

5.7.1 Συνθετικά Μοναδιαία Υδρογραφήματα

Η παροχή των υδατορευμάτων αποτελεί το κύριο δεδομένο για τον υπολογισμό των υδρολογικών υπογραφών. Με τον όρο παροχή υδατορεύματος εννοείται η μεταβολή του όγκου του νερού που καταγράφεται στην μονάδα του χρόνου και αφορά συγκεκριμένη διατομή επί του υδατορεύματος. Το σχήμα του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος αποτελεί πρότυπο για κάθε λεκάνη απορροής και ουσιαστικά αποτυπώνει την απόκριση της λεκάνης απορροής σε μια βροχή μικρής σχετικά διάρκειας που καλύπτει το σύνολο της επιφάνειας της λεκάνης απορροής. Στις μετρούμενες λεκάνες απορροής, η μέτρηση ή η εκτίμηση των χρονοσειρών επιτρέπει την κατάρτιση Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων για την εξεταζόμενη λεκάνη, μέσω επίλυσης βασισμένης στη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (Newton and Vinyard, 1967), γραμμικού προγραμματισμού (linear programming) (Eagleson et al, 1966) ή, αλλιώς, γραμμικής βελτιστοποίησης, ή μέσω εφαρμογής πιο πρόσφατων μεθόδων, όπως, για παράδειγμα, η μέθοδος First Differenced Transfer Function (FDTF) (Guillot and Duband, 1980), η οποία αποτελεί μια πιο αντικειμενική προσέγγιση επίλυσης του προβλήματος.

Από την άλλη πλευρά, η κατάρτιση Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων στις μη μετρούμενες λεκάνες απορροής είναι αδύνατη, με αποτέλεσμα το ενδιαφέρον να στρέφεται στην κατάρτιση

συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (ΣΜΥ) (Snyder, 1938). Στην περίπτωση αυτή, σε μια μελέτη, το θέμα συνήθως αντιμετωπίζεται με χρήση εμπειρικών σχέσεων, που συνδέουν τα χαρακτηριστικά του υδρογραφήματος όπως, η παροχή αιχμής, ο χρόνος ανόδου, ο χρόνος υστέρησης, με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, όπως, η έκταση της λεκάνης, η μέση κλίση του εδάφους της λεκάνης, το μέγιστο μήκος υδατορεύματος, με την εφαρμογή ενός μεθοδολογικού πλαισίου βασισμένου σε τεχνικές περιοχοποίησης (Haan et al., 1994· Fernandez et al., 2000· Lee et al., 2005) και με την εφαρμογή ενός υδρολογικού μοντέλου βροχοπτώσης απορροής σε συνδυασμό με τεχνικές περιοχοποίησης. Συχνά, όταν εφαρμόζεται η δεύτερη προσέγγιση, χρησιμοποιείται πληροφορία σε τοπικό επίπεδο, σχετική με την εξεταζόμενη λεκάνη απορροής και το υδρογραφικό δίκτυο αυτής, ενώ κινηματικές παράμετροι, όπως, οι ταχύτητες ροής, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν μέσω τεχνικών περιοχοποίησης.

Να σημειωθεί ότι η εφαρμογή εμπειρικών σχέσεων, δεν μπορεί να αναπαράγει τη διακύμανση των παρατηρημένων παροχών μιας χρονοσειράς και την ετερογένεια που συναντάται σε μια λεκάνη. Παρ' όλα αυτά, η εφαρμογή τέτοιων σχέσεων είναι μονόδρομος, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα ταυτόχρονα δεδομένα βροχοπτώσης και απορροής για την εξεταζόμενη λεκάνη απορροής. Όταν υπάρχουν διαθέσιμες βροχοπτώσεις μιας λεκάνης απορροής, η χρήση ενός μοντέλου βροχοπτώσης απορροής είναι μια κοινή πρακτική, η οποία σε συνδυασμό με την υιοθέτηση των παραμέτρων μίας άλλης παρόμοιας λεκάνης, επιτρέπει την αναπαράσταση της απόκρισης της λεκάνης, λαμβάνοντας, επίσης, υπόψη την πολύτιμη πληροφορία που μπορεί να εξαχθεί από ένα ΨΜΕ. Για την υιοθέτηση των παραμέτρων από μια άλλη παρόμοια λεκάνη απορροής, είναι αυτονόητο, ότι σε μια λεκάνη απορροής με ταυτόχρονες μετρήσεις βροχοπτώσης και απορροής, έχουν υπολογιστεί οι παράμετροι του μοντέλου, μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης και επαλήθευσης και, στη συνέχεια, μεταφέρονται στο χώρο, στην μη μετρούμενη λεκάνη απορροής.

Όπως είναι γνωστό, στις περισσότερες λεκάνες απορροής, στις οποίες εκπονούνται μελέτες νέων υδραυλικών έργων ή και αναβάθμισης υφιστάμενων υδραυλικών έργων, δεν υφίστανται μετρήσεις κατάλληλες, που να επιτρέπουν την άμεση εκτίμηση της απορροής για μια μακρά σειρά ετών όπως θα ήταν επιθυμητό. Στην πλειονότητα μάλιστα των περιπτώσεων, οι μετρήσεις λείπουν παντελώς. Υπό τις συνθήκες αυτές, ο σχεδιασμός των έργων ασφάλειας, όπως, είναι οι υπερχειλιστές και τα έργα εκτροπής, βασίζεται, αναγκαστικά, σε μορφομετρικά και άλλα δεδομένα της υπό μελέτη λεκάνης, για την παραγωγή των απαραίτητων υδρογραφήματων σχεδιασμού. Το θεωρητικό πλαίσιο για την κατάρτιση συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος παρουσιάζεται εδώ.

Η μελέτη των υδρολογικών διεργασιών που συμβαίνουν σε μια λεκάνη απορροής είναι πολύπλοκη διαδικασία, κυρίως λόγω της πολυπλοκότητας του φυσικού περιβάλλοντος (πολυπλοκότητα λεκανών απορροής), των συνθηκών που επικρατούν σε αυτό, της επίδρασης της τοπογραφίας, μέσω του αναγλύφου και των ιδιοτήτων του, στις υδρολογικές διεργασίες με διαφορετικούς χρόνους δράσης και της διαφορετικότητας των φαινομένων που επικρατούν. Η επιφανειακή απορροή (Ward and Robinson, 1975· Mosley and McKerchar, 1993) παρουσιάζεται σε προηγούμενο κεφάλαιο, καθώς και οι τοπογραφικοί παράγοντες που την επηρεάζουν. Η επίδραση αυτών φαίνεται στη μορφή του σχήματος του υδρογραφήματος κάθε λεκάνης απορροής. Μερικοί από τους παράγοντες είναι το μέγεθος και το σχήμα της λεκάνης απορροής, η κλίση του εδάφους, η διαφορά του μέσου υψόμετρου της λεκάνης απορροής με το ελάχιστο υψόμετρο της λεκάνης, τα μήκη του υδρογραφικού δικτύου και, επομένως, η χωρική κατανομή του, οι κοιλότητες (βυθίσματα) που υπάρχουν στην επιφάνεια του εδάφους της λεκάνης απορροής, καθώς αυτές είναι υπεύθυνες για τη συγκράτηση ποσοτήτων νερού και, επομένως, για την ενίσχυση της διήθησης και άλλοι. Να σημειωθεί ότι το ελάχιστο υψόμετρο

μιας λεκάνης απορροής αφορά είτε το υψόμετρο του σταθμού σε μια συγκεκριμένη διατομή, στην οποία, συνήθως, είναι εγκατεστημένος υδρομετρικός σταθμός, είτε το υψόμετρο εδάφους της εξόδου της λεκάνης απορροής.

Ως προς τα φαινόμενα που επικρατούν σε μία λεκάνη απορροής, οι βασικοί κλιματικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απορροή ως προς τον όγκο και την κατανομή της στο χώρο, είναι οι παρακάτω: (1) η ένταση, η διάρκεια και η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης στην λεκάνη απορροής, (2) η διεύθυνση με την οποία κινείται το φαινόμενο της βροχόπτωσης, (3) η μορφή του κατακρημνίσματος, μιας και η βροχή έχει άμεσο αποτέλεσμα στη διαμόρφωση του υδρογραφήματος, αλλά δεν ισχύει το ίδιο με το χιόνι, και (4) ο τύπος της βροχόπτωσης.

Οι γεωλογικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απορροή, ουσιαστικά δρουν έμμεσα καθώς είναι υπεύθυνοι για την κίνηση του νερού λίγο πριν αυτό φτάσει στο υδρογραφικό δίκτυο, και, επομένως, επηρεάζουν είτε με τη μορφή της ενδιάμεσης απορροής, είτε με τη μορφή της υπόγειας ροής. Τα γεωλογικά χαρακτηριστικά των επιφανειακών εδαφικών στρώσεων και εκείνα των βαθύτερων γεωλογικών σχηματισμών επηρεάζουν το σχήμα του υδρογραφήματος. Το είδος των εδαφών της λεκάνης απορροής επηρεάζει ιδιαίτερα τα υδρολογικά ελλείμματα, άρα και την επιφανειακή απορροή. Επιπλέον, οι μηχανικές ιδιότητες των εδαφών, καθορίζουν το ρυθμό της διήθησης και, κατά συνέπεια, επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή. Η χημική σύσταση των εδαφών, σε συνδυασμό με τις μηχανικές ιδιότητές τους, καθορίζει τη φυτοκάλυψη και τους επικρατούντες τύπους χλωρίδας, και συνεπώς, επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή. Επομένως, η φυτοκάλυψη σε μια λεκάνη απορροής επηρεάζει την επιφανειακή απορροή με δύο τρόπους που συμβάλλουν σε διαφορετικό χρόνο στην επιφανειακή απορροή, αφενός με τη συγκράτηση του νερού της βροχής από τα φυτά (η ύπαρξη των φυτών εννοείται λόγω της φυτοκάλυψης) το οποίο, στη συνέχεια, εξατμίζεται και επιστρέφει στην ατμόσφαιρα, και αφετέρου, με τη διαπνοή. Η φυτοκάλυψη, συνήθως, λαμβάνεται υπόψιν ως ποσοστό επί της εκτάσεως της λεκάνης απορροής, επομένως, είναι σημαντικό αυτό να είναι γνωστό. Εκτός από το ποσοστό είναι σημαντικό να είναι γνωστό και το είδος των φυτών / δένδρων που υπάρχουν εντός της λεκάνης απορροής. Έτσι, οι λεκάνες απορροής που έχουν μεγάλο ποσοστό φυτοκάλυψης από δένδρα με πυκνό φύλλωμα, δίνουν ομαλό υδρογράφημα με χαμηλή αιχμή και μεγάλη χρονική βάση (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Η άμεση κατάρτιση μοναδιαίων υδρογραφημάτων δεν είναι δυνατή στην περίπτωση των λεκανών απορροής χωρίς καταγεγραμμένες μετρήσεις βροχόπτωσης και απορροής για την ίδια περίοδο, και, επομένως η έλλειψη υδρομετρικών ή σταθμημετρικών και βροχομετρικών δεδομένων, οδηγεί στην κατάρτιση συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων.

Η διαδικασία εκτίμησης των πλημμυρών σχεδιασμού, δηλαδή, τόσο της αιχμής της απορροής, όσο και της κατανομής της απορροής, που προκαλεί μια βροχή, μπορεί να βασιστεί στο Μοναδιαίο Υδρογράφημα. Κατά τον Sherman (1949), Μοναδιαίο Υδρογράφημα (ΜΥ) είναι το υδρογράφημα που προκαλείται από ενεργό βροχόπτωση ύψους ίσου με τη μονάδα (π.χ. 1 cm), που είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στην λεκάνη απορροής και έχει ομοιόμορφη ένταση.

Το Μοναδιαίο Υδρογράφημα μιας λεκάνης απορροής επιτρέπει τον άμεσο προσδιορισμό της απορροής για οποιαδήποτε βροχόπτωση. Υπάρχουν τρεις τρόποι με τους οποίους προσδιορίζεται το Μοναδιαίο Υδρογράφημα μιας λεκάνης απορροής και αυτοί είναι οι εξής: (1) με ταυτόχρονη καταγραφή της βροχής και της παροχής στην έξοδο της λεκάνης απορροής, για ένα χρονικό διάστημα τουλάχιστον λίγων ετών, (2) στην περίπτωση των μη μετρούμενων λεκανών απορροής, το Μοναδιαίο Υδρογράφημα μπορεί να εκτιμηθεί συνθετικά από τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, όπως από το ανάγλυφο, τις κλίσεις του

εδάφους, το υδρογραφικό δίκτυο κλπ., και (3) με βάση τα τυπικά μοναδιαία υδρογραφήματα και τον χωρισμό της λεκάνης απορροής σε υπολεκάνες.

Σε μη μετρούμενη λεκάνη απορροής, είναι δυνατή η κατασκευή Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Με αφορμή την πρωτοβουλία PUB, η χρήση γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού της δικτύου εδραιώνεται στη μοντελοποίηση των υδρολογικών διεργασιών, μέσω μοντέλων βροχόπτωσης-απορροής.

Από τα πιο γνωστά συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα είναι αυτό που ακολουθεί την μεθοδολογία του Snyder, που προτάθηκε από το σώμα μηχανικών του στρατού των ΗΠΑ, σύμφωνα με το οποίο προσδιορίζονται η χρονική βάση, η παροχή αιχμής και τέσσερα άλλα σημεία του υδρογραφήματος συναρτήσει των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής.

Στο πλαίσιο της διατριβής, γίνεται εφαρμογή του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (Institute of Hydrology, IH), καθώς αποτελεί μια μορφή ΣΜΥ που έχει τύχει ευρείας εφαρμογής στο σχεδιασμό έργων. Σύμφωνα με τη μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου προτείνεται ένα τριγωνικό συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα για διάρκεια βροχής μίας ώρας. Η μορφή του Τριγωνικού Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (Chow et al., 1988) που επιλέχθηκε, αποδίδεται μέσα από τις παρακάτω εξισώσεις, καθώς για την κατάρτιση του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος είναι απαραίτητος ο καθορισμός των παρακάτω παραμέτρων, όπως ο χρόνος ανόδου T_p σε h, ο χρόνος βάσης T σε h και η παροχή αιχμής U_{max} σε m^3/s .

Ο χρόνος ανόδου T_p (Εξίσωση 5.15) εκτιμάται σύμφωνα με το Βρετανικό Ινστιτούτο Υδρολογίας (Sutcliffe, 1978) ως εξής:

$$T_p = \frac{46 * L^{0.14}}{S_{1085}^{0.38} * (1 + URBAN)^{1.99} * RMSD^{0.4}} (h) \quad (5.15)$$

όπου L είναι το μήκος του κυρίου υδατορέμματος σε m, URBAN ο λόγος που δείχνει το ποσοστό αστικής ανάπτυξης (των αστικών περιοχών) στη λεκάνη απορροής, RMSD το ύψος βροχόπτωσης για διάρκεια εικοσιτεσσάρων ωρών και περίοδο επαναφοράς 5 έτη σε mm (αν αφαιρεθεί η ποσότητα που αναφέρεται στο εδαφικό έλλειμμα) και S_{1085} η κλίση της κύριας μισγάγγειας σε m/km μεταξύ του 10% και του 85% του μήκους αυτής. Ο χρόνος βάσης T του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (Εξίσωση 5.16):

$$T = 2.67 * T_p \quad (5.16)$$

Τέλος, η παροχή αιχμής U_{max} , δίνεται από την εξίσωση (Εξίσωση 5.17):

$$U_{max} = \frac{5.56 * A}{T} \quad (5.17)$$

όπου A είναι το εμβαδόν της λεκάνης σε km^2 . Να σημειωθεί ότι η κλίση S_{1085} δίνεται από την εξίσωση (Εξίσωση 5.18):

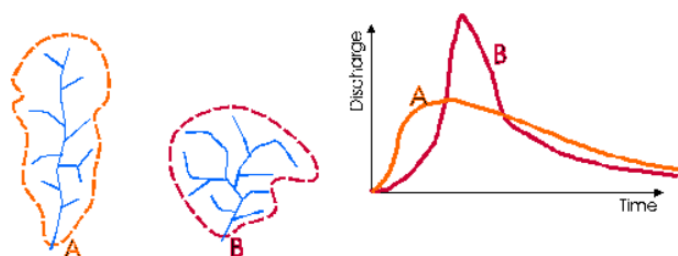
$$S_{1085} = \frac{Z_{10\%L} - Z_{85\%L}}{0.75 * L} \quad (5.18)$$

όπου $Z_{10\%L}$ και $Z_{85\%L}$ είναι τα υψόμετρα στο 10% και 85% του μήκους του κύριου υδατορέμματος, αντίστοιχα. Οι παραπάνω εξισώσεις αφορούν σε διάρκεια βροχόπτωσης ίση με 1 ώρα. Σε περίπτωση που το δοθέν υετόγραμμα έχει διαφορετικό χρονικό βήμα το Μοναδιαίο Υδρογράφημα πρέπει να υποστεί αναγωγή.

Ο σχεδιασμός πολλών υδραυλικών έργων, βασίζεται στη χρήση του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος. Επίσης πολλές είναι οι προσεγγίσεις που συναντώνται βιβλιογραφικά και επιχειρούν να συσχετίσουν το σχήμα και επομένως τα χαρακτηριστικά μεγέθη του ΣΜΥ, με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Η χρήση του Στιγμαίου Υδρογραφήματος προτιμάται σε σχέση με το Μοναδιαίο Υδρογράφημα κάποιας τυπικής διάρκειας βροχής, καθώς απαλείφονται οι αβεβαιότητες που οφείλονται στην εισαγωγή της εν λόγω διάρκειας στις εκτιμήσεις των παραμέτρων.

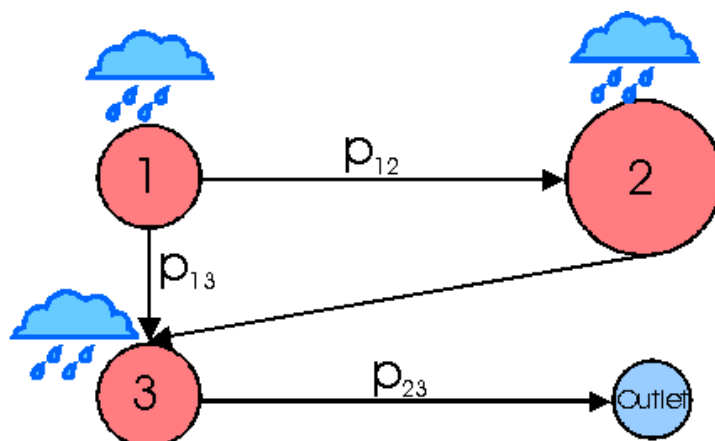
Η έννοια του Γεωμορφολογικού Στιγμαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος διατυπώθηκε πρώτη φορά από τους Rodriguez-Iturbe and Valdes (1979) και εξακολουθεί να αποτελεί πρόσφορο πεδίο έρευνας (Gupta et al., 1980· Snell and Sivapalan, 1994· Rinaldo and Rodriguez-Iturbe, 1996· Bhaskar et al., 1997· Jain et al., 2000· Kumar et al., 2007· Grimaldi et al., 2012c, Ναλμπάντης και Παπαγεωργάκη, 2015, 2022· Nalbantis and Papageorgaki, 2023).

Η συνάρτηση που συνδέει τη βροχόπτωση με την απορροή κάθε λεκάνης, είναι άμεσα επηρεαζόμενη με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της ίδιας της λεκάνης και του υδρογραφικού δικτύου (Σχήμα 5-12), και, ως εκ τούτου, ο ορισμός ενός γεωμορφολογικού υδρογραφήματος είναι καθοριστικής σημασίας. Η μορφολογία και η τοπολογία του υδρογραφικού δικτύου, όπως περιγράφεται από τον Strahler και από τους λόγους του Horton and Schumm, αποτελούν τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά τα οποία χρησιμοποιήσαν είναι οι λόγοι του Horton (λόγος διχασμού R_B , λόγος μηκών R_L , λόγος εμβαδών R_A), το μήκος μέγιστης τάξης υδατορεύματος L_J , καθώς και η μέση ταχύτητα ροής κατά μήκος των υδατορευμάτων u .



Σχήμα 5-12: Η επίδραση του λόγου διχασμού του Horton στο υδρογράφημα

Οι Rodrigues-Iturbe and Valdes (1979) ανέπτυξαν το «ανάλογο» της λεκάνης απορροής (Σχήμα 5-13), βασισμένοι στις τάξεις του υδρογραφικού δικτύου που εμφανίζονται σε κάθε λεκάνη. Ο κάθε κύκλος αναπαριστά την τάξη του υδρογραφικού δικτύου, ενώ τα p_{ij} ορίζουν την πιθανότητα μια σταγόνα βροχής να διανύσει διαδρομή μέσω του i -οστής κλάσης υδρογραφικού δικτύου και να φτάσει στο j -οστής κλάσης υδρογραφικό δίκτυο ($p_{ij} = 0$ όταν $j < i$). Ενώ ταυτόχρονα ορίζεται η πιθανότητα p_{0i} , ως η πιθανότητα μία σταγόνα βροχής να πέσει σε υδρογραφικό δίκτυο i κλάσης (αρχικό στάδιο τυχαία ορισμένο) και μετέπειτα να ξεκινήσει η μετάβασή της προς την έξοδο της λεκάνης απορροής, ακολουθώντας τη ροή του νερού.



Σχήμα 5-13: Σχηματική αναπαράσταση του «ανάλογου» της λεκάνης απορροής 3ης τάξης.

Οι υποθέσεις που ακολουθήθηκαν είναι οι εξής: (1) η ενεργός βροχόπτωση (effective rain) πέφτει μόνο πάνω στη λεκάνη απορροής και όχι στο υδρογραφικό δίκτυο, (2) η ενεργός βροχόπτωση που πέφτει πάνω σε ένα υδρογραφικό δίκτυο συγκεκριμένης τάξης, απορρέει αποκλειστικά και μόνο μέσω υδρογραφικού δικτύου της ίδιας τάξης, (3) η μετάβαση από το ένα στάδιο στο άλλο επιτυγχάνεται με την προϋπόθεση ότι η τάξη του νέου σταδίου είναι μεγαλύτερη από την τάξη του προηγούμενου σταδίου και ότι όλες οι σταγόνες ρέουν προς την έξοδο της λεκάνης απορροής, και (4) η μετάβαση από το ένα στάδιο στο άλλο εξαρτάται μόνο από την περιοχή στην οποία θα βρεθεί η σταγόνα βροχής. Με άλλα λόγια, η σταγόνα δεν «θυμάται» τη διαδρομή που ακολούθησε μέχρι να βρεθεί εντός του υδρογραφικού δικτύου.

Η παραπάνω αναλογία μεταξύ του μοντέλου των Rodrigues-Iturbe and Valdes και της λεκάνης απορροής επιτρέπει την ανάπτυξη ενός Μοναδιαίου Υδρογραφήματος με τη χρήση των παραπάνω αναφερόμενων χαρακτηριστικών. Παρόλα αυτά, δεν υπάρχει σαφώς ορισμένη συνάρτηση του γεωμορφολογικού μοναδιαίου υδρογραφήματος (geomorphologic unit hydrograph), διότι η συνάρτηση μεταβάλλεται ανάλογα με την τάξη της λεκάνης απορροής. Το γεωμορφολογικό μοναδιαίο υδρογράφημα είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου παραμονής μιας σταγόνας νερού, στη λεκάνη απορροής (Berod, 1995).

Ακολουθούν οι εξισώσεις 5.19 και 5.20 για τον υπολογισμό δύο βασικών παραμέτρων: της παροχής αιχμής, Q_p (peak discharge), και του χρόνου ανόδου, t_p (time-to-peak):

$$Q_p = \frac{1.31}{L} * R_L^{0.45} * v \quad (5.19)$$

και

$$t_p = \frac{0.44 * L}{v} * R_A^{-0.55} * R_L^{-0.38} \quad (5.20)$$

όπου L είναι το μήκος του κύριου υδατορεύματος, v η μέση ταχύτητα ροής του κύριου υδατορεύματος και R_L , R_B , R_A τα βασικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής που αναφέρθηκαν προηγουμένως (λόγοι). Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι το γεωμορφολογικό μοναδιαίο υδρογράφημα δεν είναι γραμμικό, καθώς οι δύο βασικές παράμετροι, δηλαδή, η παροχή αιχμής και ο χρόνος ανόδου διαφοροποιούνται συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ροής του κύριου υδατορεύματος.

Η μέθοδος του Γεωμορφολογικού Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος βασίζεται στις ακόλουθες υποθέσεις: ο χρόνος που χρειάζεται μια σταγόνα για να διανύσει έναν κλάδο τάξης i είναι ανεξάρτητος από την τάξη του κατάντη κλάδου, οι χρόνοι παραμονής της σταγόνας

στους κλάδους τάξης i ακολουθούν εκθετική κατανομή, και, η ταχύτητα ροής κατά μήκος των υδατορευμάτων παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως της τάξης τους.

Όπως αναφέρθηκε, το μοναδιαίο υδρογράφημα δεν είναι σταθερό για μια λεκάνη απορροής αλλά μεταβάλλεται μέσα στο χρόνο, δηλαδή και κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου βροχόπτωσης και κατά το ευρύτερο χρονικό διάστημα που αφορά διάφορα ανεξάρτητα επεισόδια βροχοπτώσεων (π.χ. έτος, μήνας). Αυτή η μη μονοσήμαντη σχέση που συνδέει κάθε λεκάνη απορροής με το στιγμιαίο μοναδιαίο υδρογράφημα μπορεί να ληφθεί υπόψη με το μέγεθος της μέσης ταχύτητας ροής u . Έτσι, το Γεωμορφολογικό Στιγμιαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα (ΓΣΜΥ) μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο συνιστώσες η μία των οποίων σχετίζεται με τη γεωμορφολογία της λεκάνης απορροής και η άλλη με την υδραυλική θεώρηση και την περιγραφή της κίνησης του νερού κατά μήκος των υδατορευμάτων της λεκάνης απορροής.

Το Γεωμορφολογικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα δημιουργήθηκε για να συσχετίσει το Στιγμιαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα μιας λεκάνης απορροής με την δομή του υδρογραφικού δικτύου και με ορισμένες εκφράσεις της ταχύτητας πλημμύρας ή του μήκους του υδρογραφικού δικτύου. Αποτέλεσμα είναι το Στιγμιαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα να γίνει συνθετικό από τις πληροφορίες που παρέχονται από έναν τοπογραφικό χάρτη. Η ιδέα παρουσιάστηκε ως εναλλακτική από την παραδοσιακή μέθοδο επιδιώκοντας τον καθορισμό μιας εμπειρικής σχέσης ανάμεσα στο υπολογισμένο Στιγμιαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα και στα κατάλληλα χαρακτηριστικά της λεκάνης. Οι γεωμορφολογικές σχέσεις δεν περιέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες για να εξάγουν την κλίμακα του Μοναδιαίου Στιγμιαίου Υδρογραφήματος, η οποία κλίμακα είναι σαφώς πιο σημαντική από την μορφή του. Η κλίμακα δεν μπορεί να υπολογιστεί χωρίς στοιχεία μετρημένης ταχύτητας ή παρατηρήσεις του χρόνου υστέρησης της λεκάνης απορροής (Efstratiadis et al., 2012). Σε σύγκριση με τις άλλες προσεγγίσεις για την παραγωγή του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος μιας λεκάνης απορροής, η μέθοδος του Γεωμορφολογικού Στιγμιαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος χειρίζεται το πρόβλημα πιθανοτικά.

Για την κατασκευή του υδρογραφήματος σχεδιασμού με έμμεσο τρόπο (όχι βάσει μετρήσεων παροχής) είναι γνωστό ότι απαιτείται πληροφορία σχετικά με: (1) την μέγιστη ετήσια ένταση βροχόπτωσης για διάφορες τιμές της περιόδου επαναφοράς και της διάρκειας, (2) τις χρήσεις γης και την εδαφοκάλυψη για την εκτίμηση του περισσέυματος βροχόπτωσης, (3) το Μοναδιαίο Υδρογράφημα της λεκάνης.

Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στο τρίτο από τα παραπάνω στοιχεία, για το οποίο η παραδοσιακή προσέγγιση είναι αυτή του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (Chow et al., 1988). Η θεωρία του Γεωμορφολογικού Στιγμιαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph, GIUH) (Rodriguez-Iturbe and Valdez, 1979· Rinaldo and Rodriguez-Iturbe, 1996), αν και αποτελεί μια σύγχρονη απάντηση στο πρόβλημα της σύνθεσης του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος, δεν έχει μέχρι σήμερα συμβάλει ουσιαστικά στον υδρολογικό σχεδιασμό, παρόλο που επιτρέπει την ανίχνευση της επίδρασης στην απορροή, της ετερογένειας του γήινου αναγλύφου μιας λεκάνης απορροής.

Με δεδομένη την διαθεσιμότητα ΨΜΕ πιστεύεται ότι η προσέγγιση του Γεωμορφολογικού Στιγμιαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος μέσω της Συνάρτησης Πλάτους είναι μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση και έχει τη δυνατότητα να συμβάλει στη σύνθεση αξιόπιστων Μοναδιαίων Υδρογραφήμάτων. Για τον λόγο αυτό, επιλέγεται, στο πλαίσιο της εν λόγω θεωρίας, η προσέγγιση της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους (Rescaled Width Function, RWF) (Rinaldo et al. 1995), η οποία είναι βασισμένη στη Συνάρτηση Πλάτους (Gupta et al., 1986),

και η οποία αποτελεί έκφραση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των μηκών ροής της λεκάνης απορροής – το μήκος ροής μεταξύ κάθε κελιού της λεκάνης μέχρι το στόμιο αυτής – σε δύο εκδοχές αυτής:

(1) την κλασική εκδοχή (cRWF) (βλ. εδάφιο 5.7.3), και

(2) την τροποποιημένη από τους Di Lazzaro et al. (2015) εκδοχή, γνωστή ως Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους, σταθμισμένη κατά την πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, ddRWF (βλ. εδάφιο 5.7.4.), η οποία λαμβάνει υπόψη την πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου (drainage density, ή dd) κατά τις διεργασίες γένεσης της απορροής.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας γίνεται σε λεκάνες απορροής του ελλαδικού χώρου και τα αποτελέσματα αυτής παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 8. Σημειώνεται ότι, πέραν της πρόσφατης δημοσίευσης των Di Lazzaro et al. (2015) δεν έχει εντοπιστεί άλλη εφαρμογή της μεθόδου ddRWF σε νέες λεκάνες και, κυρίως, δεν υπάρχει καμία εφαρμογή προσανατολισμένη προς τον υδρολογικό σχεδιασμό υδραυλικών έργων, γεγονός που επιβεβαιώνει το βαθμό πρωτοτυπίας της συγκεκριμένης εφαρμογής.

5.7.2 Η Συνάρτηση Πλάτους

Με αφορμή το ερώτημα που έθεσαν οι Rinaldo et al. (1995), δηλαδή, αν είναι δυνατόν, με κάποιο τρόπο, μέσω της υδρολογικής απόκρισης μιας μετρημένης λεκάνης απορροής, να προσδιοριστούν τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των θεωριών του Γεωμορφολογικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (Rodrigues-Iturbe and Valdes, 1979) και της πρωτοεμφανιζόμενης τότε ιδέας του Kirkby (1976) για τη σύνδεση μεταξύ της τοπογραφίας και της απόκρισης της λεκάνης, προέκυψε η συνάρτηση πλάτους (Gurta et al., 1986). Η απόκριση της λεκάνης μετριέται με όρους χρόνου και προσδιορίζεται ως η κατανομή του χρόνου διαδρομής μιας στιγμιαίας μοναδιαίας σταγόνας ενεργού βροχόπτωσης ομοιόμορφα κατανεμημένης στο χώρο.

Στο πλαίσιο της θεωρίας του Γεωμορφολογικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (Rodriguez-Iturbe and Valdez, 1979· Rinaldo et al., 1995· Rinaldo and Rodriguez-Iturbe, 1996) προτάθηκε η Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους (Rescaled Width Function, ή RWF) ως προσέγγιση του Στιγμαιαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (Rinaldo et al., 1995). Η συνάρτηση αυτή αντιπροσωπεύει την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του χρόνου διαδρομής του νερού από το κάθε σημείο της λεκάνης απορροής μέχρι το στόμιο εξόδου αυτής.

Η λεκάνη απορροής διακριτοποιείται και θεωρείται ότι αποτελείται από ένα σύνολο N εικονοστοιχείων με το καθένα να αντιστοιχεί σε στοιχειώδες εμβαδόν ΔA . Από το κέντρο (σημείο) του κάθε εικονοστοιχείου i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) θεωρείται μια και μοναδική διαδρομή του νερού μέχρι το στόμιο εξόδου της λεκάνης απορροής. Κατά μήκος αυτής της διαδρομής λαμβάνουν χώρα πολλές υδρολογικές διεργασίες μεταφοράς. Οι διεργασίες αυτές θεωρούνται, απλοποιητικά, ότι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: (1) στις διεργασίες που σχετίζονται με την κίνηση του νερού σε πλαγιά (hillslope) ως επίγεια ροή (overland flow), και (2) στις διεργασίες που συνδέονται με την κίνηση του νερού εντός του υδρογραφικού δικτύου (channel). Στην πρώτη κατηγορία διεργασιών αποδίδεται ένα μήκος κίνησης του νερού επί πλαγιάς, $L_{h,i}$, ενώ στη δεύτερη κατηγορία το μήκος διαδρομής εντός των αγωγών του υδρογραφικού δικτύου συμβολίζεται με $L_{c,i}$. Προφανώς, για το συνολικό μήκος της διαδρομής από το σημείο i μέχρι το στόμιο εξόδου, L_i , ισχύει (Εξίσωση 5.21):

$$L_i = L_{h,i} + L_{c,i} \quad (5.21)$$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των μηκών L_i ορίζεται ως η Συνάρτηση Πλάτους (Width Function) της λεκάνης. Θεωρώντας το μήκος ως συνεχή μεταβλητή, η Συνάρτηση πλάτους δίνεται από τη σχέση στην Εξίσωση 5.22:

$$WF(L) = \frac{\sum_{i \in \gamma(L)} \Delta A}{\sum_{i \in [1,N]} \Delta A} \quad (5.22)$$

όπου $\gamma(L)$ είναι το δεικτοσύνολο των στοιχείων που βρίσκονται σε απόσταση L από το στόμιο εξόδου της λεκάνης απορροής. Το εμβαδόν του κάθε στοιχείου στην Εξίσωση 5.22 προφανώς απλοποιείται, αλλά τοποθετήθηκε για να δοθεί έμφαση στο ότι η Συνάρτηση Πλάτους εκτιμάται με ποσοστά εμβαδού της λεκάνης.

5.7.3 Η κλασική Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους

Η απόκριση μιας λεκάνης απορροής μετριέται σε όρους χρόνου διαδρομής, όπως αναφέρθηκε ήδη, και όχι σε όρους μήκους διαδρομής. Ξεκινώντας από την Εξίσωση 5.21, η κάθε συνιστώσα του μήκους διαδρομής διαιρείται με την κατάλληλη ταχύτητα ροής του νερού, η οποία προφανώς είναι πολύ διαφορετική στις πλαγιές από ό,τι εντός των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου.

Κατά την εφαρμογή της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους, υιοθετήθηκαν σταθερές τιμές της ταχύτητας ροής σε πλαγιά, u_h , και σε υδατορεύματα, u_c , με σταθερό λόγο:

$$\theta = \frac{u_c}{u_h} \quad (5.23)$$

Με θεώρηση σταθερής ταχύτητας ροής σε υδατορεύματα, u_c και σταθερής ταχύτητας ροής σε πλαγιά u_h , ο συνολικός χρόνος διαδρομής του νερού από το σημείο i μέχρι το στόμιο εξόδου της λεκάνης, T_i , υπολογίζεται από την παρακάτω Εξίσωση 5.24:

$$T_i = \frac{L_{h,i}}{u_h} + \frac{L_{c,i}}{u_c} \quad (5.24)$$

ή, σε συνδυασμό με την Εξίσωση 5.23:

$$T_i = \frac{1}{u_c} (\theta L_{h,i} + L_{c,i}) \quad (5.25)$$

Η κλασική Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους (Rinaldo et al. 1995) δίνεται από μια σχέση απολύτως ανάλογη της Εξίσωσης 5.22 και συγκεκριμένα, με τη θεώρηση του χρόνου διαδρομής ως συνεχούς μεταβλητής (Εξίσωση 5.26)

$$cRWF(T) = \frac{\sum_{i \in \gamma(T)} \Delta A}{\sum_{i \in [1,N]} \Delta A} \quad (5.26)$$

όπου $\gamma'(T)$ είναι το δεικτοσύνολο των στοιχείων με χρόνο διαδρομής T μέχρι το στόμιο εξόδου της λεκάνης.

5.7.4 Σταθμισμένη μέσω της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους

Πρώτος ο Horton (1945) πρότεινε ως δείκτη της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου το αντίστροφο της διπλάσιας απόστασης που διανύει το νερό από ένα σημείο μιας λεκάνης απορροής μέχρι να συναντήσει το πλησιέστερο υδατόρευμα. Η απόσταση αυτή έχει οριστεί ήδη, στο Κεφάλαιο 3, ως το μήκος διαδρομής επί πλαγιάς $L_{c,i}$ για κάθε σημείο i . Με βάση το μέγεθος αυτό, η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου σε κάθε σημείο i ορίζεται ως

$$dd_i = \frac{1}{2L_{h,i}} \quad (5.27)$$

Οι Di Lazzaro et al. (2015) θεώρησαν ότι η απορροή είναι αύξουσα συνάρτηση μιας δύναμης της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου και απέδωσαν σε κάθε εικονοστοιχείο i έναν παράγοντα στάθμισης της έκτασης του εικονοστοιχείου ΔA_i που εκφράζει την θεώρηση της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου dd_i κατά Horton (1945) (Εξίσωση 5.27). Ο παράγοντας στάθμισης, που πρότειναν οι Di Lazzaro et al. (2015), δίνεται από την εξίσωση παρακάτω:

$$\phi_i = (dd_i)^\beta \propto (L_{h,i})^{-\beta} \quad (5.28)$$

Έτσι, από την Εξίσωση 5.29 λαμβάνεται η σταθμισμένη Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους (drainage-density Rescaled Width Function, ή ddRWF) ως εξής

$$ddRWF(T) = \frac{\sum_{i \in \gamma''(T)} \Delta A (L_{h,i})^{-\beta}}{\sum_{i \in [1, N]} \Delta A (L_{h,i})^{-\beta}} \quad (5.29)$$

όπου $\gamma''(T)$ είναι δεικτοσύνολο των εικονοστοιχείων με χρόνο διαδρομής T , ανάλογο του $\gamma'(T)$ της Εξίσωσης 5.26 και β μία παράμετρος.

Οι Di Lazzaro et al. (2015) πρότειναν την χρήση τυπικών τιμών για τις ταχύτητες ροής του νερού και συγκεκριμένα, $u_c = 1$ m/s, και $u_h = 0.01$ m/s. Στην εφαρμογή της παρούσα μεθοδολογίας σε λεκάνες απορροής εκτιμήθηκε η τιμή $u_h = 0.04$ m/s για όλες τις λεκάνες λαμβάνοντας αρχικά μια συντηρητική τιμή κατά τον Wanielista (1978), και στη συνέχεια εφαρμόζονται μια σχέση περιοχοποίησης που προτάθηκε από τον Di Lazzaro (2009) όπως αυτή περιγράφεται στο εδάφιο που ακολουθεί. Η ταχύτητα u_c θεωρήθηκε παράμετρος της εξεταζόμενης λεκάνης. Αυτή για μεν την λεκάνη του Ευήνου εκτιμήθηκε έτσι ώστε ο χρόνος ανόδου και η παροχή αιχμής του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από την μέθοδο RWF να πλησιάζουν στις τιμές από το Μοναδιαίο Υδρογράφημα με βάση μετρήσεις βροχοπτώσεων και απορροής. Το τελευταίο είχε εκτιμηθεί σε παλαιότερη εργασία από τον Nalbantis (1995). Για τις υπόλοιπες λεκάνες απορροής έγινε προσαρμογή της τιμής για τον Ευήνο με βάση τον λόγο των τετραγωνικών ριζών της μέσης κλίσης των διαδρομών ροής μέχρι την έξοδο της λεκάνης.

5.7.5 Εκτίμηση κινηματικών παραμέτρων μέσω περιοχοποίησης

Και οι δύο αναλυτικές εκδοχές της WFIUH περιλαμβάνουν κινηματικές παραμέτρους, τις ταχύτητες ροής επί της πλαγιάς (u_h) και εντός του υδρογραφικού δικτύου (u_c). Όσον αφορά την κλασική εκδοχή της RWF, ο Di Lazzaro (2009) χρησιμοποίησε δεδομένα βροχοπτώσεων και απορροής από 12 μετρημένες λεκάνες απορροής στην Κεντρική Ιταλία, για να εκτιμήσει τις κινηματικές παραμέτρους, με βάση μια διαδικασία προσαρμογής στατιστικών ροπών (moment fitting procedure). Για το λόγο αυτό, πρότεινε αναλυτικές σχέσεις μεταξύ των κινηματικών παραμέτρων και της πρώτης και δεύτερης τάξης ροπής της WFIUH, λαμβάνοντας υπόψη την συσχέτιση που υπάρχει μεταξύ των μηκών επί πλαγιάς και αυτών εντός του υδρογραφικού δικτύου. Σε ένα δεύτερο στάδιο, πραγματοποίησε μια τοπική περιοχική ανάλυση (regional analysis) αυτών των παραμέτρων για να τις συσχετίσει με μορφομετρικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής. Αποτέλεσμα των παραπάνω, είναι ο εντοπισμός της Εξίσωσης 5.30, η οποία δίνει την ταχύτητα ροής εντός του υδρογραφικού δικτύου (u_c)

$$u_c = aS^m \quad (5.30)$$

όπου, S είναι η μέση κλίση του εδάφους της λεκάνης, που υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των λόγων της υψομετρικής διαφοράς του υψομέτρου κάθε κελιού της λεκάνης απορροής με το υψόμετρο του στομίου της λεκάνης, προς το αντίστοιχο συνολικό μήκος ροής, και a και m είναι σταθερές παράμετροι, που ισούνται με 5.83 m/s και 0.275, αντίστοιχα.

Η ταχύτητα επί πλαγιάς (u_h) βρέθηκε να μην συσχετίζεται με την μέση κλίση του εδάφους της λεκάνης και μετά από σύγκριση με την ταχύτητα σε άλλες λεκάνες, βρέθηκε μικρότερη στις λεκάνες με ασβεστολιθικούς σχηματισμούς. Επομένως, η κινηματική παράμετρος της ταχύτητας επί πλαγιάς (u_h) σε m/s δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$u_h = -0.0227C + 0.03 \quad (5.31)$$

όπου, C είναι το ποσοστό της συνολικής έκτασης της λεκάνης απορροής, που καλύπτεται από ανθρακικούς σχηματισμούς.

5.7.6 Προταθείσα μεθοδολογία

Στο πλαίσιο της επικύρωσης της μεθοδολογίας σε λεκάνες απορροής, είναι απαραίτητη η εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου των εξεταζόμενων λεκανών απορροής. Από την ανάλυση, που παρουσιάστηκε σε προηγούμενες υποενότητες, αναδεικνύει το πρόβλημα του ορισμού του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης, καθώς ο ορισμός του υδρογραφικού δικτύου επιτρέπει την ταξινόμηση όλων των κελιών του ΨΜΕ της λεκάνης απορροής είτε σε κελιά που ορίζουν πλαγιά (hillslope), είτε σε κελιά που ορίζουν το υδρογραφικό δίκτυο (channel).

Όπως, ήδη παρουσιάστηκε, για αυτό, στο παρελθόν έχουν προταθεί διαφορετικά κριτήρια (βλ. Κεφάλαιο 4). Εδώ εξετάζεται η προσέγγιση των Tucker et al. (2001), οι οποίοι προτείνουν έναν συνδυασμό δύο κριτηρίων, δηλαδή, ενός κατωφλίου ανάντη έκτασης και ενός κατωφλίου κλίσης. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε επίσης, από τους Di Lazzaro et al. (2015) στο πλαίσιο του Στιγμιαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος μέσω της Συνάρτησης πλάτους (WFIUH).

Επίσης, γίνεται εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας, που παρουσιάζεται στο εδάφιο 5.5.2 του παρόντος κεφαλαίου, και της εφαρμογής της ΑΣΕ στο ΨΜΕ της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής. Η μεθοδολογία εκτίμησης της ΑΣΕ (Parageorgaki and Nalbantis, 2018) προτείνει την διάμεση τιμή της έκτασης των ανάντη λεκανών των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου, όμως, για τον λόγο ότι δεν είναι εφικτή η απόδοση της χρονικής μεταβλητότητας του υδρογραφικού δικτύου, εντός του αδιαμέριστου μοντέλου βροχόπτωσης απορροής, και, επί πλέον, δίνεται έμφαση στο σχεδιασμό υδραυλικών έργων, επιλέγεται η ΑΣΕ για την υγρή περίοδο. Η ΑΣΕ για την υγρή περίοδο λαμβάνει υπόψιν τους μόνιμους και εφήμερους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου, και, επιπλέον, επιλέγεται ως η διάταξη του υδρογραφικού δικτύου που συμβάλλει στη δυσμενέστερη μορφή του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος, με την μεγαλύτερη παροχή αιχμής.

Το υδρογραφικό δίκτυο, που εξάγεται με την ΑΣΕ για την υγρή περίοδο, συγκρίνεται με το υδρογραφικό δίκτυο, όπως προτείνεται από τους Tucker et al. (2001), και επομένως με την εφαρμογή ενός κατωφλίου επί του γινομένου της ανάντη έκτασης A_i επί το τετράγωνο της τοπικής κλίσης του εδάφους του κελιού S_i . Το κατώφλι για το μέγεθος $A_i S_i^2$ εδώ ορίζεται ίσο με 4000 m² (Di Lazzaro, 2009).

Η επικύρωση του μεθοδολογικού πλαισίου της εφαρμογής της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους, σταθμισμένης κατά την πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, ddRWF, σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής, ολοκληρώνεται μέσω των 7 παρακάτω βημάτων:

1. Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής εξάγεται μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας των Papageorgaki and Nalbantis (2018), που περιγράφεται στο εδάφιο 5.4.
2. Οι χωρικά κατανομημένες μεταβλητές του μήκους επί πλαγιάς και του μήκους εντός του υδρογραφικού δικτύου υπολογίζονται για κάθε κελί της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής, σύμφωνα με το εξαχθέν υδρογραφικό δίκτυο. Σημειώνεται ότι τα μήκη είναι διαφορετικά για την υγρή και την ξηρή περίοδο του έτους.
3. Το γεγονός ότι οι εξεταζόμενες λεκάνες απορροής και οι λεκάνες απορροής που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη του Di Lazzaro (2009) στην κεντρική Ιταλία είναι παρόμοιες κλιματολογικά, και η παραδοχή της υγρής περιόδου, κατά την οποία τα μήκη επί πλαγιάς παίζουν μικρό ρόλο στη μεταφορά ποσοτήτων νερού εντός της λεκάνης, επιτρέπουν την υιοθέτηση της Εξίσωσης 5.31 για τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας επί πλαγιάς.
4. Η μέση ταχύτητα ροής εντός του υδρογραφικού δικτύου είναι η πιο σημαντική παράμετρος της ddRWF και εκτιμάται μέσω βαθμονόμησης, χρησιμοποιώντας το ωριαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα μιας μετρούμενης λεκάνης απορροής, που υπάρχει στο δείγμα των εξεταζόμενων λεκανών απορροής.
5. Υιοθετώντας την Εξίσωση 5.32 και ξεκινώντας από την ταχύτητα ροής του κύριου κλάδου $u_{c,b}$ του προηγούμενου βήματος, η ταχύτητα ροής εντός του υδρογραφικού δικτύου για κάθε μη μετρούμενη λεκάνη απορροής i του δείγματος των λεκανών, δίνεται από την εξίσωση:

$$u_{c,i} = u_{c,b}(S_{c,i} / S_{c,b})^m \quad (5.32)$$

όπου, $S_{c,b}$ και $S_{c,i}$ είναι η μέση κλίση του εδάφους για την λεκάνη αναφοράς και την εξεταζόμενη λεκάνη απορροής αντίστοιχα. Επιπλέον, η τιμή του συντελεστή m διατηρείται όπως προτάθηκε από τον Di Lazzaro (2009).

6. Οι τιμές των μεταβλητών του μήκους επί πλαγιάς και του μήκους εντός του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ddRWF της λεκάνης απορροής.
7. Ξεκινώντας από την ddRWF, υπολογίζεται το D -ώρο Μοναδιαίο Υδρογράφημα, το οποίο αποτελεί το τελικό προϊόν της εφαρμογής του μεθοδολογικού πλαισίου. Η διάρκεια D εξαρτάται από την απόκριση του εξεταζόμενου συστήματος. Να σημειωθεί ότι ο στόχος του πλαισίου ολοκληρώνεται σε έναν βαθμό, από την χρονική κλίμακα των διαθέσιμων δεδομένων βροχόπτωσης.

5.8 Εκτίμηση της επίδρασης της ακρίβειας των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους στα όρια των κατακλυζόμενων περιοχών λόγω πλημμύρας

5.8.1 Γενικά

Οι πλημμύρες είναι οι πιο δαπανηρές και οι πιο συχνά εμφανιζόμενες φυσικές καταστροφές παγκοσμίως, γεγονός που οδήγησε στην αναζήτηση μεθόδων πρόβλεψης και προστασίας. Ωστόσο, παρά το γεγονός των εκτεταμένων προσπαθειών για διαχείριση των πλημμυρών σε εθνικό ή σε τοπικό επίπεδο, οι ζημιές από αυτές συνεχίζουν να αυξάνουν, με απώλειες

ανθρώπων και καταστροφές σε υποδομές και στο φυσικό περιβάλλον (Pielke et al., 2002· Brody et al., 2007). Κλειδί στην αντιμετώπιση, για την πρόληψη και την μείωση των απωλειών και των επιπτώσεων του φαινομένου είναι η παροχή αξιόπιστης πληροφορίας σε όλα τα στάδια μελέτης και διαχείρισης του φαινομένου (EU Flood Directive 2007/60/EC· FEMA, 2001). Για να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητη η ακριβής πρόβλεψη του μεγέθους της πλημμύρας αλλά και των περιοχών που πρόκειται να πλημμυρίσουν, καθώς επίσης και η διάδοση και ενημέρωση των διαχειριστών σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, αλλά και του κοινού, που πιθανά πλήττεται.

Ως προς την επίλυση του προβλήματος τεχνικά, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός των ορίων των πλημμυρικών πεδίων με ακρίβεια. Στη διαδικασία αυτή εμπλέκονται υδρολογικά μοντέλα για τη διαχείριση των αρχικών δεδομένων και τον καθορισμό των μεγεθών σχεδιασμού και ακολουθεί η υδραυλική ανάλυση για τον καθορισμό του πλάτους του ορίου του πλημμυρικού πεδίου και του υψομέτρου της επιφάνειας του νερού της κατακλυζόμενης ζώνης, ανάλογα με το ανάγλυφο του εδάφους (Anderson, 2000· Robayo et al., 2004· Knebl et al., 2005· Nalbantis et al., 2017).

Μιας και χρησιμοποιούνται μοντέλα υδρολογικά και υδραυλικά, είναι επόμενο να υπάρχει ανάγκη ικανής ποσότητας και ποιότητας δεδομένων ώστε να εφαρμοστούν οι διαδικασίες της βαθμονόμησης, της αξιολόγησης και της επικύρωσης των μοντέλων. Η έλλειψη των δεδομένων και η αβεβαιότητα των προβλέψεων αυτών είναι θέματα, στα οποία δίνεται ιδιαίτερη προσοχή καθώς η επίδραση της αβεβαιότητας στο τελικό εξαγόμενο αποτέλεσμα, πρέπει να ελέγχεται.

Στόχος του Υποκεφαλαίου είναι η παρουσίαση της μεθοδολογίας που εφαρμόζεται για τη διερεύνηση της επίδρασης της αβεβαιότητας του ΨΜΕ, που χρησιμοποιείται ως υπόβαθρο, στην αβεβαιότητα του ορίου της κατακλυζόμενης έκτασης, λόγω πλημμύρας. Έμφαση δίνεται στον καθορισμό των πηγών αβεβαιότητας και την επίδραση αυτών των πηγών σφαλμάτων του ΨΜΕ στο όριο της κατακλυζόμενης έκτασης, παρά το γεγονός ότι το τελικό εξαγόμενο αποτέλεσμα της διαδικασίας επηρεάζεται από διάφορες άλλες πηγές αβεβαιότητας, όπως η αβεβαιότητα στα υδρογραφήματα και η αβεβαιότητα στη βροχόπτωση, που όμως δεν λαμβάνονται υπόψιν στην παρούσα διατριβή.

Συμπερασματικά, προτείνεται κατάλληλη μεθοδολογία για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των διαφόρων πηγών σφαλμάτων παραγωγής του ΨΜΕ, και επομένως, ελέγχονται οι τεχνικές με τις οποίες δημιουργείται ένα ΨΜΕ. Οι φωτογραμμετρικές μέθοδοι είναι πρόσφορες τεχνικές για την συλλογή των δεδομένων και τη διαμόρφωση των ψηφιακών μοντέλων αναπαράστασης του αναγλύφου. Η διερεύνηση της αξιοπιστίας των μεθόδων παραγωγής ψηφιακών μοντέλων αναπαράστασης του αναγλύφου και ο εντοπισμός και η αλγοριθμική ποσοτικοποίηση των επιδράσεων των διαφόρων πηγών σφαλμάτων ενός ΨΜΕ, αποτελούν επιμέρους στόχους της μελέτης. Έτσι, εξετάζονται οι μέθοδοι δημιουργίας του ΨΜΕ και γίνεται αξιοποίηση της υπάρχουσας γνώσης σχετικά με την αβεβαιότητα του ΨΜΕ. Η ποσοτικοποίηση της επίδρασης των διαφόρων πηγών σφαλμάτων ενός ΨΜΕ στο όριο της κατακλυζόμενης ζώνης γίνεται με τη βοήθεια στατιστικών δεικτών, ενώ για την εξασφάλιση ικανού δείγματος ΨΜΕ, εφαρμόστηκε η διαδικασία παραγωγής εσφαλμένων ΨΜΕ, τα οποία ακολουθούν τα χαρακτηριστικά των ΨΜΕ που συνήθως χρησιμοποιούνται σε αυτού του αντικειμένου τις μελέτες. Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας που ακολουθεί έγινε σε δύο λεκάνες απορροής του ελλαδικού χώρου.

5.8.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στην πραγματικότητα, και παρά τις παραδοχές της κλασικής μεθόδου, η παροχή αιχμής καθώς και το χρησιμοποιούμενο ΨΜΕ ενέχουν αβεβαιότητα. Παρά την εκρηκτική αύξηση της

έρευνας σε υδρολογικά θέματα τις περασμένες τέσσερις δεκαετίες, το θέμα αυτό έχει ουσιαστικά αγνοηθεί. Μόνον οι Merwade et al. (2008) επιχείρησαν να παρουσιάσουν συνθετικά όλες τις παραπάνω πηγές αβεβαιότητας πραγματοποιώντας μια εφαρμογή σε λεκάνη απορροής στη Βόρεια Καρολίνα των ΗΠΑ.

Αν θεωρηθούν οι διάφορες πηγές αβεβαιότητας μεμονωμένα, υπάρχει μεν διεθνής βιβλιογραφία, όχι όμως ιδιαίτερα εκτεταμένη. Η μεγαλύτερη αβεβαιότητα απαντάται στα μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης. Αυτή οφείλεται σε επί μέρους παράγοντες, όπως τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης, η διήθηση και οι συνθήκες αρχικής εδαφικής υγρασίας. Η επίδραση αυτής της αβεβαιότητας έχει διερευνηθεί πολύ περιορισμένα (Crosetto et al., 2000· Carpenter and Georgakakos, 2004· Chaubey et al., 2005· Huang and Liang, 2005· Wilby, 2005).

Σε ό,τι αφορά την επίδραση της αβεβαιότητας του ΨΜΕ, την τελευταία δεκαετία έχει διερευνηθεί η επίδρασή της στην αβεβαιότητα της εκτίμησης της παροχής αιχμής (Brasington and Richards, 1998· Valeo and Moin, 2000· Hancock, 2005· Chaubey et al., 2005) και στην αβεβαιότητα στα βάθη ροής και την κατακλυζόμενη έκταση (Marks and Bates, 2000· Werner, 2001· Vazquez et al., 2002· Colby et al., 2000· Tate et al., 2002· Bates et al., 2003· Omer et al., 2003· Werner, 2004· Wang and Zheng, 2005).

Σε ό,τι αφορά στην παραγωγή, χρήση και αξιοπιστία των ΨΜΕ, υφίσταται ήδη ένα σώμα γνώσεων γενικής αποδοχής (Maune, 2007· Li et al., 2005) αλλά παραμένουν πολλά ερευνητικά θέματα ανοιχτά και σχετικές ερευνητικές δράσεις, οι οποίες αφορούν την μέθοδο λήψης των πρωτογενών δεδομένων και τις παραμέτρους των μεθόδων αυτών (π.χ., σε σχέση με τον χρησιμοποιούμενο αισθητήρα), την μέθοδο επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων ώστε να παραχθεί το ζητούμενο ΨΜΕ (δευτερογενής πληροφορία) και την μέθοδο επεξεργασίας του παραπάνω ΨΜΕ για την παραγωγή πληροφορίας υδρολογικού ενδιαφέροντος. Η παραπάνω πληροφορία αφορά τις λεκάνες απορροής με το υδρογραφικό δίκτυό τους καθώς και ποικιλία μορφομετρικών χαρακτηριστικών.

Σε ό,τι αφορά γενικά στην ολοκλήρωση πολλών κατηγοριών πληροφορίας στην εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου, αξίζει να αναφερθεί το κοινό ερευνητικό πρόγραμμα ΕΕ-Λαϊκής Δημοκρατίας της Κίνας γνωστό ως ANFAS (data fusioN for Flood Analysis and decision Support) που είχε ως στόχο τη δημιουργία ενός Συστήματος Λήψης Αποφάσεων για την πρόληψη και αντιμετώπιση των πλημμυρών, ενοποιώντας τις πλέον σύγχρονες τεχνικές επεξεργασίας και διαχείρισης δεδομένων. Στο έργο εκείνο η έμφαση δόθηκε στο αντικείμενο της Πληροφορικής και το στενό αντικείμενο της αβεβαιότητας που ενέχουν τα ΨΜΕ ήταν εκτός των επιδιωχθέντων στόχων.

Διεθνώς είναι γνωστές οι ακόλουθες ερευνητικές πρωτοβουλίες:

1. Πρωτοβουλία FRMRC (Flood Risk Management Research Consortium) στο Ηνωμένο Βασίλειο με στόχο τη σύνδεση ακαδημαϊκής και βιομηχανικής έρευνας. Συμμετείχαν σε αυτή 15 Πανεπιστήμια, οργανισμοί που ασχολούνται με τις πλημμύρες, ερευνητικές μονάδες και μελετητικά γραφεία. Όπως αναφέρεται στην ιστοσελίδα του FRMRC, το πρώτο ερευνητικό θέμα που αφορά τη συμβολή του Πανεπιστημίου Herriot-Watt είναι η μελέτη της επίδρασης των σφαλμάτων ΨΜΕ από LiDAR στα υδραυλικά

χαρακτηριστικά μιας πλημμύρας. Στόχος του FRMRC ήταν η ανάληψη προγραμμάτων έρευνας αιχμής.

2. Διεθνής πρωτοβουλία PUB (Predictions in Ungauged Basins) που είχε αναληφθεί από την Διεθνή Ένωση Υδρολογικών Επιστημών (IAHS) για την δεκαετία 2003-2012 και στην οποία η ανάλυση αβεβαιότητας αποτελεί τον θεματικό άξονα 3 από την φάση του αρχικού σχεδιασμού της πρωτοβουλίας. Η πρωτοβουλία PUB αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

5.8.3 Προταθείσα μεθοδολογία

Για την κάθε λεκάνη απορροής που επιλέγεται, αναζητείται ένα ΨΜΕ, κατά το δυνατόν υψηλής ακρίβειας, ώστε αυτό να αποτελεί τη βάση για τους περαιτέρω υπολογισμούς. Η μέθοδος παραγωγής του ΨΜΕ ασφαλώς επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα της έρευνας. Υπενθυμίζονται οι παρακάτω τυπικές μέθοδοι, όπως από ισοϋψείς καμπύλες υπαρχόντων χαρτών, με φωτογραμμετρικές μεθόδους (π.χ. αεροφωτογραφίες, LiDAR, SAR) σε συνδυασμό με διαδικασίες μετασχηματισμού της πρωτογενούς πληροφορίας σε ΨΜΕ. Από το ΨΜΕ αυτό που αναφέρεται ως ΨΜΕ αναφοράς παράγεται μεγάλος αριθμός «εσφαλμένων» ΨΜΕ που αντιστοιχούν σε συνθήκες φτωχότερης πληροφορίας.

Το μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο ακολουθήθηκε συνίσταται στα παρακάτω στάδια ή ενότητες:

Στο πρώτο στάδιο έγινε η παραγωγή των εναλλακτικών ή «εσφαλμένων» ΨΜΕ. Για την ολοκλήρωση του σταδίου αυτού είναι απαραίτητη η παραγωγή ενός ΨΜΕ αναφοράς ή η απευθείας χρήση ενός έτοιμου υψηλής ακρίβειας ΨΜΕ. Γενικά, συνηθίζεται η χρήση διαφορετικού ΨΜΕ για τα ανάντη τμήματα της λεκάνης απορροής μελέτης σε σχέση με τα κατάντη πεδινά τμήματα (περιοχές των κατακλυζόμενων εκτάσεων) στα οποία είναι απαραίτητη η υψηλή ανάλυση για τη χάραξη του ορίου της κατακλυζόμενης ζώνης. Ακολουθούν η παραγωγή των εναλλακτικών «εσφαλμένων» ΨΜΕ και ο υπολογισμός των μορφομετρικών χαρακτηριστικών υδρολογικού ενδιαφέροντος, από κάθε «εσφαλμένο» ΨΜΕ.

Στο δεύτερο στάδιο εκτελούνται οι υδρολογικοί – υδραυλικοί υπολογισμοί, και, πιο συγκεκριμένα, γίνεται συλλογή και έλεγχος ποιότητας των υδρολογικών δεδομένων, κατάρτιση μεγάλου αριθμού πραγματοποιήσεων υετογράμματος της χωρικά μέσης βροχόπτωσης εισόδου με στοχαστική προσομοίωση για διάφορες τιμές της περιόδου επαναφοράς και το στάδιο ολοκληρώνεται με τους κύριους υδρολογικούς –υδραυλικούς υπολογισμούς. Το στάδιο αυτό αποτελεί μέρος της γενικότερης προτεινόμενης μεθοδολογίας, αλλά η διεκπεραίωσή του δεν αφορά την παρούσα διατριβή.

Για κάθε «εσφαλμένο» ΨΜΕ (και τα αντίστοιχα μορφομετρικά χαρακτηριστικά) και κάθε υετόγραμμα χωρικά μέσης βροχόπτωσης εισόδου (στη συνέχεια, θα αναφέρεται ως σενάριο) γίνεται υπολογισμός υετογραμμάτων περισσέματος βροχόπτωσης με βάση γνωστές μεθόδους (εδώ, τη μέθοδο SCS), υπολογισμός του υδρογραφήματος άμεσης απορροής με βάση Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα, και διόδευση του παραπάνω υδρογραφήματος στο θεωρούμενο πεδίο πλημμυρών με βάση το μονοδιάστατο υδραυλικό μοντέλο NWS Dam-Break Flood Forecasting Model (DAMBRK) (Fread, 1977· 1988).

Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο εκτελούνται οι τελικοί υπολογισμοί, στους οποίους εντάσσονται ο εντοπισμός, για κάθε σενάριο, των ορίων της κατακλυζόμενης ζώνης, ο υπολογισμός, για κάθε σενάριο, των μορφομετρικών χαρακτηριστικών της κατακλυζόμενης ζώνης, και, η στατιστική επεξεργασία των παραπάνω μαζί με την εξαγωγή χρήσιμων σχέσεων

(π.χ. στατιστικών δεικτών) που εκφράζουν την αβεβαιότητα των χαρακτηριστικών της κατακλυζόμενης ζώνης.

5.8.4 Ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας στο Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας

Για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας στο ΨΜΕ (Skarlatos and Georgopoulos, 2004· Wechsler and Kroll, 2006· Ioannidis et al., 2014) έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές:

1. Το ΨΜΕ που λήφθηκε από πραγματικά πρωτογενή δεδομένα θεωρήθηκε ως το ΨΜΕ αναφοράς με απόλυτα σφάλματα που έχουν γνωστή και σταθερή τυπική απόκλιση σ_r . Το ΨΜΕ αναφοράς είναι υψηλής ακρίβειας ως προς την υψομετρική πληροφορία.
2. Θεωρήθηκε ένα πλήθος «εσφαλμένων» ΨΜΕ –τα οποία νοούνται ως πιο εσφαλμένα από το ΨΜΕ αναφοράς – με ποιότητα πληροφορίας κατώτερη του ΨΜΕ αναφοράς, ή αλλιώς, με απόλυτα σφάλματα που έχουν γνωστή και σταθερή τυπική απόκλιση $\sigma_e > \sigma_r$.
3. Τα πρόσθετα σφάλματα (διαφορές σφαλμάτων «εσφαλμένου» ΨΜΕ και ΨΜΕ αναφοράς) θεωρήθηκαν ότι ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση σ . Επιπλέον, αυτά είναι ασυσχέτιστα, τόσο μεταξύ τους όσο και τα σφάλματα των ΨΜΕ.

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, ισχύει

$$\sigma = \sqrt{\sigma_e^2 - \sigma_r^2} \quad (5.33)$$

Για την παραγωγή των εσφαλμένων ΨΜΕ παράγονται, με την μέθοδο Monte Carlo, πρόσθετα σφάλματα για το υψόμετρο του κάθε φατνίου τα οποία έχουν μέση τιμή 0.0 και τυπική απόκλιση σ (αυτή της Εξίσωσης 5.33).

Η τυπική απόκλιση των πρόσθετων σφαλμάτων προκύπτει μέσω της Εξίσωσης 5.33, με γνωστή σ_r και υποθετικό σ_e . Το τελευταίο επιλέγεται για να αντιπροσωπεύει τη δυσμενέστερη υψομετρική πληροφορία που πιθανά μελετάται σε πραγματικές περιπτώσεις. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται ένα σύνολο από 500 «εσφαλμένα» ΨΜΕ. Κατά τη μελέτη αυτών, αποφεύγεται η εφαρμογή φίλτρων, τα οποία είναι γνωστό ότι αλλάζουν τα στατιστικά στοιχεία των σφαλμάτων. Εάν, ωστόσο, ανιχνευθεί μη ρεαλιστικό έδαφος στο ΨΜΕ για ορισμένα σ , το σύνολο αυτών των ΨΜΕ απορρίπτεται.

Σχετικά με την επιλογή της τυπικής απόκλισης των απόλυτων σφαλμάτων πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα που κατέληξε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, ή, αλλιώς, η τυπική απόκλιση, των απόλυτων σφαλμάτων, ή το τυπικό σφάλμα των υψομέτρων στο ΨΜΕ της περιοχής της λεκάνης του Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων, όπως αυτό προέκυψε φωτογραμμετρικά από στερεοαπόδοση, είναι περίπου 0.75 m (Tsakiris et al., 2007).
2. Στην περίπτωση που το ΨΜΕ προέρχονταν από χάρτες 1:5000 της ΓΥΣ, το τυπικό σφάλμα θα ήταν 1.5 ως 2.0 m (Kraus, 2003).
3. Εφόσον το ΨΜΕ συμμορφώνονταν με τις τεχνικές προδιαγραφές της Κτηματολόγιο ΑΕ (Greek Land Register SA., 2005) για παραγωγή ψηφιακών ορθοφωτογραφιών μεγάλης κλίμακας (LSO), τότε, το τυπικό σφάλμα δεν θα υπερέβαινε τα 0.98 m.

4. Για παραγωγή ορθοφωτογραφιών κλίμακας 1:1.000, σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές της Κτηματολόγιο ΑΕ (Greek Land Register SA., 2005) για παραγωγή ψηφιακών ορθοφωτογραφιών πολύ μεγάλης κλίμακας (VLSO), το τυπικό σφάλμα δεν θα υπερέβαινε τα 0.295 m.

Επίσης, χρησιμοποιούνται δεδομένα SRTM για να ληφθούν υπόψη οι πραγματικές πηγές αβεβαιότητας. Το SRTM DEM είναι ένα από τα ελεύθερα διαθέσιμα παγκόσμια ψηφιακά μοντέλα με υψόμετρα της επιφάνειας της Γης, το οποίο κυκλοφόρησε την τελευταία δεκαετία και είναι διαθέσιμο σε ανάλυση τόξου ενός δευτερολέπτου της μοίρας με παγκόσμια κάλυψη (~30 μέτρα), ενώ σε προηγούμενη παγκόσμια έκδοση, εκτός των ΗΠΑ, η ανάλυση ήταν πιο χονδροειδής (της τάξης του τόξου τριών δευτερολέπτων της μοίρας ή περίπου 90 μέτρων). Αυτό το προϊόν έχει χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση της απορροής ποταμών σε μεγάλα ποτάμια συστήματα με αραιά δεδομένα ή χωρίς μέτρηση της απορροής (Neal et al., 2012· Andreadis et al., 2013· Schumann et al., 2014). Ωστόσο, είναι γνωστό ότι το συγκεκριμένο ΨΜΕ πάσχει από σφάλματα, τα οποία είναι πιο έντονα σε περιοχές με έντονη τοπογραφία και πυκνή βλάστηση. Οι εκτιμήσεις του μεγέθους αυτών των σφαλμάτων σε παγκόσμιο και περιφερειακό επίπεδο είναι άφθονες (π.χ. LeFavour and Alsdorf, 2005· Berry et al., 2007). Όσον αφορά τις δύο λεκάνες απορροής που μελετήθηκαν και στις οποίες ελέγχθηκε το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο, εκτιμήθηκαν στατιστικά στοιχεία του σφάλματος, όπως η μέση τιμή της υψομετρικής διαφοράς και η τυπική απόκλιση με βάση τα ΨΜΕ αναφοράς.

5.8.5 Ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας στην κατακλυζόμενη ζώνη λόγω πλημμύρας

Αρχικά, η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας στην κατακλυζόμενη ζώνη λόγω πλημμύρας πραγματοποιήθηκε με στατιστικό τρόπο. Έστω ότι, μετά την εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo, διατίθενται M πραγματοποιήσεις του υδρογραφήματος σε κάθε διατομή και άρα ισάριθμες «συνθετικές» κατακλυζόμενες περιοχές.

Η μελέτη για την εκτίμηση της κατακλυζόμενης ζώνης συνέχισε ακολουθώντας την παρακάτω μεθοδολογία η εφαρμογή της οποίας οδήγησε στα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 10.

Για την απόδοση της κατάστασης μιας πλημμυρισμένης περιοχής χρησιμοποιούνται οι παρακάτω πρωτότυπες παράμετροι: το χρονικά μέγιστο εμβαδόν της κατακλυζόμενης ζώνης, A , και τα χρονικά μέγιστα τριών ποσοτήτων, οι τιμές των οποίων ποικίλλουν ανάλογα με τη διατομή i . Αυτές είναι το βάθος του νερού στον άξονα ροής, d_i , η μέση ταχύτητα νερού στη διατομή, V_i και το πλάτος της κατακλυζόμενης ζώνης στη διατομή W_i . Οι ποσότητες d_i και V_i λαμβάνονται από την έξοδο του μοντέλου, ενώ το W_i υπολογίζεται με βάση το d_i και τη γεωμετρία διατομής. Το W_i σε συνδυασμό με τις αποστάσεις επί της διατομής επιτρέπουν τον υπολογισμό του εμβαδού της κατακλυζόμενης ζώνης, A . Η χρήση μόνο πλατών συνεπάγεται την αγνόηση της ακριβούς θέσης του ορίου της κατακλυζόμενης ζώνης στην εγκάρσια διεύθυνση ως προς τον άξονα της ροής.

Στην περίπτωση κατά την οποία χρησιμοποιείται το ΨΜΕ αναφοράς, όλες οι παραπάνω ποσότητες παίρνουν συγκεκριμένες τιμές, ενώ, στην περίπτωση των λανθασμένων ΨΜΕ, χρησιμοποιούνται τα ποσοστιαία σημεία 90% των παραμέτρων, του εμβαδού της κατακλυζόμενης ζώνης, A , του βάθους του νερού στον άξονα ροής, d_i , της ταχύτητας ροής, V_i ,

και του πλάτους της κατακλυζόμενης ζώνης στη διατομή, W_i , που συμβολίζονται αντίστοιχα ως A_{90} , d_{90i} , V_{90i} και W_{90i} για κάθε διατομή i . Τέλος, η επιλογή της πιθανότητας γίνεται με βάση τις δύο αντικρουόμενες απαιτήσεις (Candela et al., 2005· Nalbantis and Lymperopoulos, 2012): την επιθυμία ύπαρξης ενός υψηλού βαθμού ασφάλειας και μιας αποδεκτής ακρίβειας, οι οποίες μπορούν να επιτευχθούν αν χρησιμοποιηθούν λογικά μεγέθη δείγματος στις προσομοιώσεις Monte Carlo.

Από τα γραφήματα του W_{90i} σε σχέση με την απόσταση κατά μήκος του άξονα ροής γίνεται αντιληπτή η διακύμανση του πλάτους της κατακλυζόμενης ζώνης. Παρόμοια γραφήματα για τα d_{90i} , και V_{90i} παρέχουν περαιτέρω πληροφορίες για την κατακλυζόμενη ζώνη. Το μέγιστο βάθος νερού μπορεί, ωστόσο, να είναι περιορισμένης χρησιμότητας, καθώς αυτό μπορεί να μην αντιπροσωπεύει βάθη ροής και ανωμαλίες σε κρίσιμες θέσεις μακριά από τον άξονα ροής. Το ίδιο ισχύει και για την ταχύτητα ροής. Για το λόγο αυτό οι δύο ποσότητες δεν συζητούνται λεπτομερώς.

Για να περιγραφεί ένα πλημμυρικό γεγονός στο σύνολό του, εκτός από το εμβαδόν της κατακλυζόμενης ζώνης, A , χρησιμοποιούνται και τα ακόλουθα μεγέθη: η χωρική διάμεση τιμή του ποσοστιαίου σημείου 90% του πλάτους της κατακλυζόμενης ζώνης, W_{90med} , η οποία αντιπροσωπεύει το χωρικό μέσο πλάτος της κατακλυζόμενης ζώνης, και η μέγιστη τιμή του ποσοστιαίου σημείου 90% του πλάτους της κατακλυζόμενης ζώνης, W_{90max} , που αποδίδει το μέγιστο πλάτος της κατακλυζόμενης ζώνης.

Τα μεγέθη του ποσοστιαίου σημείου 90% του εμβαδού της κατακλυζόμενης ζώνης, A_{90} , της χωρικά διάμεσης τιμής του ποσοστιαίου σημείου 90% του πλάτους της κατακλυζόμενης ζώνης, W_{90med} , και της χωρικά μέγιστης τιμής του ποσοστιαίου σημείου 90% του πλάτους της κατακλυζόμενης ζώνης, W_{90max} , αναφέρονται σε υδρολογικά ακραία μεγέθη και, ως εκ τούτου, μεταβάλλονται γραμμικά σε σχέση με τον λογάριθμο της περιόδου επαναφοράς, T . Το γεγονός αυτό, οδήγησε στην υιοθέτηση της παρακάτω γραμμικής σχέσης (ή του γραμμικού μοντέλου).

$$y = c_2 + c_1 \log_{10} T \quad (5.34)$$

όπου y είναι η ποσότητα που εξετάζεται, το $\log_{10}(T)$ είναι ο λογάριθμος δεκαδικής βάσης της περιόδου επαναφοράς, T , και τα c_1 , c_2 είναι παράμετροι. Η αποτίμηση της ποιότητας της Εξίσωσης 5.34 δίνεται από τον συντελεστή, R^2 . Εφόσον, έχει επιλεγθεί οι τιμές του T να είναι πολλαπλάσιες του 10, η παράμετρος c_1 της Εξίσωσης 5.35 είναι ο μέσος όρος (σε όλες τις περιόδους επαναφοράς) αύξησης του y για κάθε δεκαπλάσια αύξηση του T .

Όλες οι ποσότητες που συζητήθηκαν μέχρι τώρα αναφέρονται σε σημειακές εκτιμήσεις (point estimates) του εμβαδού της κατακλυζόμενης ζώνης, ενώ πληροφορίες για την αβεβαιότητα αυτών των εκτιμήσεων είναι επίσης απαραίτητες. Η ανάλυση περιορίζεται στην αβεβαιότητα του W_{90i} για κάθε διατομή i . Χρησιμοποιήθηκε η γνωστή στατιστική μέθοδος Bootstrap (Efron, 1979a, b). Για κάθε W_{90i} λαμβάνεται το μήκος του διαστήματος εμπιστοσύνης 95% , το οποίο διαιρείται με την αντίστοιχη σημειακή εκτίμηση για να παρέχει το σχετικό εύρος του W_{90i} που, εδώ, υποδηλώνεται ως RR_{90i} . Το τελευταίο εκφράζει τη σχετική αβεβαιότητα της εκτίμησης «σημείου» του W_{90i} . Στη συνέχεια του κείμενου, ο δείκτης i παραλείπεται όταν δεν υπάρχει ανάγκη αναφοράς σε μια συγκεκριμένη διατομή. Οι ποσότητες που ορίζονται σε αυτό το εδάφιο παίζουν το ρόλο των κριτηρίων και παρουσιάζονται υπό τη μορφή διαγραμμάτων και σχημάτων, στο Κεφάλαιο 10 των αποτελεσμάτων

Ως συνέπεια του καθορισμού των παραπάνω κριτηρίων εγείρεται ένα πρόσθετο ζήτημα: Πώς επηρεάζεται η αβεβαιότητα των ποσοστιαίων ελευθέρων πλατών της κατακλυζόμενης ζώνης από το μέγεθος του δείγματος που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις Monte Carlo. Αυτό

διερευνάται μεταβάλλοντας τον αριθμό των προσομοιώσεων, N , ως είσοδο στη μέθοδο Bootstrap. Όταν χρησιμοποιούνται λανθασμένα ΨΜΕ λαμβάνονται υπόψη οι πρώτες 100, 250 και 500 προσομοιώσεις από το πλήρες δείγμα (με μέγεθος 500).

6 Αδιαμέριστη ταξινόμηση λεκανών απορροής

6.1 Γενικά

Η ομοιότητα των λεκανών απορροής ως προς την υδρολογική τους συμπεριφορά, είναι η βάση για την ταξινόμηση αυτών σε κλάσεις υδρολογικά όμοιων λεκανών. Η υδρολογική ομοιότητα αφορά στην ομοιότητα μεταξύ λεκανών σε ό,τι αφορά στην απόκρισή τους στην βροχόπτωση, απόκριση εκφραζόμενη με την απορροή στο στόμιο εξόδου της λεκάνης. Στόχος της ταξινόμησης είναι η εξασφάλιση της δυνατότητας μεταφοράς πληροφοριών μεταξύ των λεκανών της ίδιας κλάσης, η γενίκευση, δηλαδή, της υδρολογικής γνώσης και του επιπέδου κατανόησης των υδρολογικών διεργασιών, καθώς και η κατανόηση των δυνητικών επιπτώσεων των διαφόρων περιβαλλοντικών αλλαγών στην υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών απορροής.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, τίθεται το ερώτημα του πόσο μπορεί να συμβάλει η διαθέσιμη υδρολογική πληροφορία (δεδομένα κατακρημνίσεων, θερμοκρασίας αέρα και απορροής) στη δημιουργία ενός συστήματος αδιαμέριστης ταξινόμησης των λεκανών απορροής σε κλάσεις υδρολογικά όμοιων λεκανών. Με αφετηρία την παραπάνω διαπίστωση, μελετάται η περίπτωση της ταξινόμησης των λεκανών απορροής του ελλαδικού χώρου, για τις οποίες είναι διαθέσιμη η απαραίτητη υδρολογική πληροφορία.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφεται στο Υποκεφάλαιο 5.6 αφορά ένα δείγμα 24 λεκανών απορροής του ελλαδικού χώρου το οποίο, μέσω της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε και προτείνεται, ταξινομήθηκε σε 4 υδρολογικές κλάσεις. Αναλυτικότερα, αναπτύχθηκε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο ταξινόμησης των 24 λεκανών απορροής, χρησιμοποιώντας, ως κριτήρια ταξινόμησης, τη διαθέσιμη κλιματική παράμετρο που είναι η βροχόπτωση και τέσσερις υδρολογικές υπογραφές σε συνδυασμό με 13 γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά των λεκανών. Τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά υπολογίζονται ή εξάγονται με απλούς υπολογισμούς στο χώρο, καθώς, ως δεδομένο εισόδου στη διαδικασία του υπολογισμού τους, χρησιμοποιείται τοπογραφική χωρική πληροφορία που είναι διαθέσιμη από ένα ΨΜΕ. Ο συνδυασμός υδρολογικών υπογραφών και γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής για την υδρολογικού τύπου ταξινόμησή τους, αποτελεί πρωτότυπη προσέγγιση, καθώς βιβλιογραφικά εντοπίστηκε αποκλειστικά και μόνον η χρήση κλιματικών παραγόντων ή/και υδρολογικών υπογραφών. Η περιγραφή των κλάσεων καθώς και των χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής που ανήκουν σε κάθε κλάση, επιτρέπει την οργάνωση της υδρολογικής πληροφορίας και τον καθορισμό ενός συστήματος ταξινόμησης λεκανών απορροής με γεωμορφολογικά κριτήρια.

Η προταθείσα μεθοδολογία ταξινόμησης αποτελείται από δύο γενικότερα βήματα. Στο πρώτο βήμα πραγματοποιείται μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση μέσω της μεθόδου ασαφούς λογικής (fuzzy c-means) για την αναγνώριση των κλάσεων λεκανών απορροής, οι οποίες χρησιμεύουν ως κλάσεις αναφοράς στο δεύτερο βήμα της μεθοδολογίας. Στο δεύτερο βήμα πραγματοποιείται επιβλεπόμενη ταξινόμηση μέσω της μεθόδου εγγύτερου γείτονα (k-Nearest Neighbor), η οποία δίνει την προβλεπόμενη κλάση της κάθε λεκάνης απορροής. Τέλος, γίνεται ο υπολογισμός του δείκτη επιτυχίας καθώς και αξιολόγηση της επιτυχίας της ταξινόμησης, με εφαρμογή της μεθόδου επαναδειγματοληψίας jack-knife (jack-knife re-sampling).

Σε συνέχεια της αδιαμέριστης ταξινόμησης, επιλέχθηκαν δύο λεκάνες απορροής, οι οποίες ανήκουν στην ίδια κλάση, και χρησιμοποιούνται ως ζεύγος όμοιων λεκανών απορροής. Η μια λεκάνη απορροής χρησιμοποιείται ως δότρια λεκάνη απορροής (δότρια των παραμέτρων αυτής από βαθμονόμηση), ενώ η δεύτερη είναι η λεκάνη απορροής στην οποία ελέγχεται η επίδοση του μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής μέσω προσομοίωσης με χρήση των παραμέτρων της δότριας λεκάνης απορροής.

Κατά την παραπάνω διαδικασία, για τη δότρια λεκάνη (μετρούμενη λεκάνη απορροής) υπολογίζονται οι παράμετροι του αδιαμέριστου υδρολογικού μοντέλου με βαθμονόμηση, και αυτές μεταφέρονται μέσω της υδρολογικής ομοιότητας του ζεύγους των λεκανών. Η υδρολογική ομοιότητα συνίσταται στο ότι και οι δύο λεκάνες ανήκουν στην ίδια κλάση.

6.2 Ταξινόμηση λεκανών απορροής στον Ελλαδικό χώρο

Η ταξινόμηση των λεκανών απορροής σε κλάσεις με όμοια υδρολογική απόκριση στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, είναι μια τάση παγκοσμίως και φαίνεται να φέρνει ελπιδοφόρα αποτελέσματα στην πρόβλεψη της απορροής των μη μετρούμενων λεκανών, μέσω του καθορισμού ενός συστήματος ταξινόμησης λεκανών απορροής που επιτρέπει μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας μεταξύ των λεκανών της ίδιας κλάσης.

Στην παρούσα εφαρμογή ελέγχεται η δυνατότητα της αδιαμέριστης ταξινόμησης των μη μετρούμενων λεκανών απορροής χρησιμοποιώντας, ως παράγοντες πρόβλεψης, μεταβλητές, οι οποίες βασίζονται σε κλιματικές μεταβλητές και στο ανάγλυφο, όπως αντίστοιχα η βροχόπτωση και τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Η παραπάνω προσπάθεια αποτελεί μέρος της διαδικασίας υποκατάστασης των μετρήσεων απορροής. Η βροχόπτωση επιλέχθηκε ως η μετεωρολογική μεταβλητή η οποία θα χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο ταξινόμησης, διότι μετρήσεις της υπάρχουν συνήθως στην πλειονότητα των λεκανών παγκοσμίως. Τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν ως κριτήρια ταξινόμησης περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, στατιστικά στοιχεία για την κλίση του εδάφους και την τιμή του δείκτη HAND. Τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά, που χρησιμοποιήθηκαν, υπολογίζονται αποκλειστικά από το διαθέσιμο ΨΜΕ.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία, που χρησιμοποιείται και περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5, περιλαμβάνει, όπως αναφέρθηκε, δύο βήματα τα οποία περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω. Αρχικά επιλέγεται μια λεκάνη από τις λεκάνες απορροής του δείγματος και θεωρείται ως μη μετρούμενη λεκάνη, άρα χωρίς μετρήσεις απορροής, αλλά με μετρημένη τη βροχόπτωση και υπολογισμένα τα απαραίτητα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της από το ΨΜΕ. Στόχος είναι η ταξινόμηση, της μη μετρούμενης λεκάνης αυτής, στην κλάση με όμοιές της λεκάνες. Στο πρώτο βήμα της διαδικασίας, εκτελείται μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση (unsupervised classification) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Fuzzy c-means για να προσδιοριστούν οι κλάσεις των λεκανών (σε ποια κλάση ανήκει η κάθε λεκάνη και, δοκιμαστικά, το πλήθος των κλάσεων).

Αναλυτικότερα, στο πρώτο βήμα, για όλες τις λεκάνες, υπάρχουν μετρήσεις απορροής, και υπολογίζονται οι υδρολογικές τους υπογραφές. Αυτές είναι ο συντελεστής απορροής, ο δείκτης βασικής ροής, η κλίση της καμπύλης διάρκειας παροχής και η αναλογία των ημερών χιονιού. Οι λεκάνες ταξινομούνται σε συγκεκριμένο αριθμό κλάσεων. Το τελικό πλήθος των κλάσεων εκτιμάται με δοκιμές ως εξής: (α) Το πλήθος αυξάνεται προοδευτικά κατά μία μονάδα, δηλαδή λαμβάνοντας διαδοχικά τις τιμές 2, 3, 4, ... μέχρις ότου ο δείκτης ή το ποσοστό επιτυχίας δεν μειώνεται σημαντικά, και (β) λαμβάνεται υπόψη ότι για το μικρό πλήθος εξεταζόμενων λεκανών, το πλήθος των κλάσεων δεν μπορεί να ξεπερνά ένα όριο.

Στο δεύτερο βήμα εκτελείται επιβλεπόμενη ταξινόμηση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο k-Nearest Neighbour, η οποία αναζητά και αποδίδει μια σχέση μεταξύ των μορφολογικών χαρακτηριστικών των μετρούμενων λεκανών και των κλάσεων που έχουν δημιουργηθεί. Βάσει των μορφολογικών χαρακτηριστικών που αποδίδονται σε κάθε κλάση, γίνεται προσπάθεια ταξινόμησης της πρώτης λεκάνης που έχει θεωρηθεί ως μη μετρούμενη λεκάνη. Το ποσοστό επιτυχίας αφορά την επιτυχημένη κατάταξη της λεκάνης αυτής και ελέγχεται, καθόσον και η λεκάνη είναι γνωστό από το Βήμα 1, σε ποια κλάση ανήκει.

Τέλος, το ποσοστό επιτυχίας της ταξινόμησης αξιολογείται με χρήση της μεθόδου jack-knife. Επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν είκοσι τέσσερις (24) λεκάνες απορροής στην ηπειρωτική Ελλάδα, λεκάνες για τις οποίες είναι γνωστές μετρήσεις απορροής. Το πλήθος των κλάσεων προέκυψε ίσο με τέσσερα. Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο αποδείχθηκε επιτυχές σε περισσότερο από 95% των περιπτώσεων αναγνώρισης της κλάσης για τη μη μετρούμενη λεκάνη.

Να σημειωθεί ότι το υδρογραφικό δίκτυο που έχει χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση των μορφολογικών χαρακτηριστικών σε καθεμία από τις λεκάνες απορροής που μελετήθηκαν, έχει προκύψει μετά από την εφαρμογή κατάλληλης τιμής κατωφλίου επί της ανάντη έκτασης, έτσι ώστε να εξάγεται ένα υδρογραφικό δίκτυο, το οποίο να είναι οπτικά κοντά στο υδρογραφικό δίκτυο που απεικονίζεται στους τοπογραφικούς χάρτες. Επομένως, δεν ήταν δυνατόν να εφαρμοστεί η εκ των υστέρων αποκτηθείσα γνώση για την έννοια της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης. Αποτέλεσμα της μεθόδου εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου που εφαρμόστηκε, είναι η δυναμική συμπεριφορά του υδρογραφικού δικτύου λόγω την εποχικότητας να αγνοείται. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι το υδρογραφικό δίκτυο των λεκανών απορροής που συμμετέχουν στη μελέτη εξάγεται με την εφαρμογή της συνήθους τεχνικής μέσω ενός κατωφλίου επί της ανάντη έκτασης. Ο υπολογισμός των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών και των περιγραφικών ιδιοτήτων του κύριου υδατορεύματος, οι οποίες χρησιμοποιούνται στους υδρολογικούς υπολογισμούς, αφορά μια εκδοχή ενός χειμερινού υδρογραφικού δικτύου, μιας και ελήφθησαν υπόψιν εκτός από τις «γραμμές» των μόνιμων κλάδων, και οι διακεκομμένες «γραμμές» των εφήμερων ρεμάτων των τοπογραφικών χαρτών. Επισημαίνεται ότι όλοι οι υπολογισμοί έγιναν με χρήση του προγράμματος MatLab, με κώδικα ο οποίος εξυπηρετεί τις συγκεκριμένες ανάγκες, ενώ η παρουσίαση των αποτελεσμάτων υπό τη μορφή χαρτών έγινε με τη χρήση του προγράμματος ArcGIS.

6.3 Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά ως κριτήρια της αδιαμέριστης ταξινόμησης

Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιήθηκαν ως κριτήρια για την ταξινόμηση της μη μετρούμενης λεκάνης απορροής στο σύστημα των κλάσεων, όπως αυτό προέκυψε από το δεύτερο βήμα του μεθοδολογικού πλαισίου ταξινόμησης. Η απαιτούμενη πρωτογενής πληροφορία αντλείται από το ΨΜΕ και γίνεται προσπάθεια να συμπεριληφθεί το μέγιστο δυνατό μέρος της διαθέσιμης τοπογραφικής πληροφορίας. Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν για κάθε λεκάνη παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-1 και είναι 12 στο σύνολό τους. Επιπλέον αυτών, χρησιμοποιείται ως κριτήριο ταξινόμησης και η βροχόπτωση, καθώς αυτή αποτελεί την μετεωρολογική μεταβλητή που μετριέται στην πλειονότητα των λεκανών απορροής παγκοσμίως. Στον Πίνακα 6-1 παρέχονται λεπτομερείς πληροφορίες ως προς το σύμβολο, την περιγραφή, την εξίσωση υπολογισμού και την μονάδα μέτρησης του καθενός από τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά.

Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν δύο κατηγορίες μεταβλητών: είτε (α) χρησιμοποιούνται δείκτες, οι οποίοι λαμβάνουν μια συγκεκριμένη τιμή για κάθε λεκάνη απορροής ή το υδρογραφικό δίκτυο αυτής, είτε (β) χρησιμοποιούνται στατιστικά χαρακτηριστικά των χωρικά κατανεμημένων μεταβλητών στη λεκάνη απορροής. Στην τελευταία περίπτωση χρησιμοποιούνται μέσες τιμές, μέσω των οποίων αποδίδεται η γενική τάση της μεταβλητής, ενώ χρησιμοποιείται και η τιμή του διατεταρτημοριακού εύρους για να αποδώσει τη χωρική διακύμανση της μεταβλητής.

Πίνακας 6-1: Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν για την αδιαμέριστη ταξινόμηση.

α/α	Σύμβολο	Περιγραφή	Εξίσωση	Μονάδα
1	RC	Δείκτης κυκλικότητας	$RC = 4\pi A/P^2$	-
2	D_d	Πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου	$D_d = L/A$	km^{-1}
3	RN	Βαθμός τραχύτητας	$RN = D_d * H_{Bmax}$	-
4	S_M	Μέση κλίση εδάφους	-	-
5	S_IR	Κλίση εδάφους διατεταρτημοριακό εύρος	-	-
6	A_M	Μέσος Προσανατολισμός κελίων	-	deg
7	CPLAN_M	Μέση καμπυλότητα κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης	-	deg/m
8	TWI_M	Μέσος Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας (TWI)	$TWI = \ln(\alpha/\tan \beta)$	-
9	TWI_IR	Τοπογραφικός Δείκτης Υδρασίας (TWI) - διατεταρτημοριακό εύρος	-	-
10	HAND_M	Μέσος Δείκτης HAND	-	m
11	HAND_IR	Δείκτης HAND διατεταρτημοριακό εύρος	-	m
12	MCS	Κλίση του κύριου υδατορεύματος	$MCS = (Z_{85}-Z_{10})/0.75 L$	-

Η χρήση όλων των 13 χαρακτηριστικών της κάθε λεκάνης (12 γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του Πίνακα 6-1 συν την μέση ετήσια βροχόπτωση) πρέπει να συρρικνωθεί για δύο λόγους: (α) Το μέγεθος του δείγματος των λεκανών απορροής είναι μικρό (μόνο 24), και (β) τα χαρακτηριστικά είναι συσχετισμένα μεταξύ τους και επομένως, η περιεχόμενη σε αυτά πληροφορία μπορεί να συμπυκνωθεί χωρίς σημαντικές απώλειες.

Για την συμπύκνωση αυτή επιλέγεται η χρήση μιας μεθόδου πολυπαραμετρικής ανάλυσης και, συγκεκριμένα της πλέον διαδεδομένης από αυτές που είναι η μέθοδος PCA. Οι συστάσεις που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία σχετικά με την αναλογία του μεγέθους του δείγματος προς τον αριθμό των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στην πολυπαραμετρική ανάλυση (Bandalos and Boehm-Kaufman, 2009), φαίνεται να είναι αντιφατικές αν και σπάνια αναφέρονται σε τιμές κάτω από 5. Λόγω της παραπάνω συνθήκης, εφαρμόζεται η παραδοχή της μείωσης του δείγματος των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών, σύμφωνα με την παρακάτω συλλογιστική: (1) Η επίδραση στο αποτέλεσμα όλων των τιμών του διατεταρτημοριακού εύρους των χαρακτηριστικών αναμένεται να είναι μικρή σε σχέση με τις αντίστοιχες μέσες τιμές των χαρακτηριστικών, (2) αυτό ισχύει και για τη μέση τιμή της καμπυλότητας κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης (CPLAN_M), (3) ο βαθμός τραχύτητας (RN) αναμένεται να είναι

τουλάχιστον σε ένα βαθμό συσχετισμένος με την πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου (D_d), λόγω ορισμού, (4) η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου (D_d), η μέση κλίση του εδάφους της λεκάνης απορροής (S_M) και η μέση τιμή του προσανατολισμού (aspect) (A_M) είναι πιθανό να είναι εξαιρετικά κατατοπιστικά όσον αφορά την κατανομή της βροχόπτωσης μεταξύ των διαφόρων σταδίων του υδρολογικού κύκλου, (5) η πληροφορία που λαμβάνεται από τη μέση τιμή του δείκτη HAND ($HAND_M$) περιλαμβάνεται εν μέρει από την πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου (D_d) και εν μέρει από τη μέση κλίση του εδάφους (S_M), γεγονός που επιτρέπει την παράλειψη της μέσης τιμής του δείκτη ($HAND_M$), και (6) ο Δείκτης κυκλικότητας (RC), ο μέσος Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας (TWI_M) και η κλίση του κύριου υδατορεύματος (MCS), περιγράφουν διεργασίες που σχετίζονται με την απόκριση της λεκάνης απορροής σε λεπτή χρονική κλίμακα και επομένως μπορούν να παραλειφθούν, καθώς πληροφορίες για αυτές τις διεργασίες δεν περιγράφονται από καμία από τις υδρολογικές υπογραφές, που χρησιμοποιήθηκαν στο πρώτο βήμα της μεθοδολογίας. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, επιλέγονται εν τέλει τρία γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, τα εξής: D_d , S_M και A_M , στα οποία προστίθεται και η μέση ετήσια βροχόπτωση (P). Οι παραπάνω συστάσεις από τη βιβλιογραφία εξετάστηκαν και επιβεβαιώθηκαν με εμπειρικό τρόπο και συγκριμένα με εφαρμογή της μεθόδου PCA. Τα παραπάνω τέσσερα χαρακτηριστικά χρησιμεύουν ως βάση για τις δοκιμές. Πιθανός πλεονασμός λόγω διασταυρούμενης συσχέτισης αυτών των χαρακτηριστικών ελέγχεται μέσω της μεθόδου PCA.

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, η έλλειψη γνώσης, σχετικά με τον λόγο μεταξύ του μεγέθους του δείγματος προς τον αριθμό των μεταβλητών, οδήγησε στην υιοθέτηση ενός αντικειμενικού τρόπου αξιολόγησης της επίδρασης του μεγέθους του δείγματος στο αποτέλεσμα της ανάλυσης των χαρακτηριστικών, μέσω της PCA. Για αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκε εφαρμογή της γνωστής τεχνικής jack-knife. Η εφαρμογή της τεχνικής στην ταξινόμηση των λεκανών απορροής περιγράφεται στην εργασία των Tsakiris et al. (2011). Εστιάζοντας στα scores της μεθόδου PCA, ορίζεται το σφάλμα στις τιμές των scores ως εξής (Εξίσωση 6.1):

$$e_i = sf_i - sr_i \quad (6.1)$$

όπου e_i είναι το σφάλμα στο PCA score για την i -th λεκάνη απορροής, και sf_i και sr_i είναι οι τιμές του scores της PCA για την i -οστή λεκάνη, για το πλήρες δείγμα λεκανών και το μειωμένο δείγμα των λεκανών, αντίστοιχα. Ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση του μεγέθους e_i συγκρίνονται με τα scores της PCA του πλήρους δείγματος με σκοπό να εκτιμηθεί η αβεβαιότητα στα scores της PCA λόγω της δειγματοληψίας jack-knife.

6.4 Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης, αποτελείται από εικοσιτέσσερις (24) λεκάνες απορροής, που καλύπτουν τμήμα της ηπειρωτικής Ελλάδας. Η έκταση της κάθε μεμονωμένης λεκάνης κυμαίνεται από περίπου 50 km² έως περίπου 5000 km² (Πίνακας 6-2). Το στόμιο εξόδου της κάθε λεκάνης έχει ληφθεί στη θέση του είτε σημαντικότερου, ή περισσότερων του ενός, ή του μοναδικού υδρομετρικού σταθμού, πληροφορία που επισημαίνεται μέσω του κωδικού αριθμού αναγνώρισης (ID) της βάσης δεδομένων του Υδροσκοπίου.

Πίνακας 6-2: Οι 24 λεκάνες απορροής.

No	Κωδικός Υδροσκοπίου	Έκταση (km ²)	No	Κωδικός Υδροσκοπίου	Έκταση (km ²)
1	30055	920.7	13	30379	80.4
2	30091	202.3	14	30391	1541.6
3	30102	358.6	15	30399	362.5
4	30169	88.8	16	30403	1889.4
5	30312	538.0	17	30406	957.1
6	30315	217.9	18	30407	202.1
7	30317	1384.9	19	30408	636.4
8	30326	782.4	20	30435	66.8
9	30353	835.1	21	30549	5007.1
10	30366	245.5	22	30551	829.7
11	30372	299.2	23	30564	399.9
12	30378	170.0	24	30650	49.7

Το Υδροσκόπιο είναι μια βάση δεδομένων υδρολογικής και μετεωρολογικής πληροφορίας η οποία αποτελεί αποτέλεσμα μακροχρόνιων προσπαθειών πλήθους επιστημόνων του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ σε συνεργασία με διάφορους ιδιωτικούς και δημόσιους φορείς, παρέχοντας πρόσβαση σε υδρολογικά, μετεωρολογικά, υδρογεωλογικά και γεωγραφικά δεδομένα για την Ελλάδα, δεδομένα τα οποία προέρχονται από φορείς όπως το ΥΠΕΝ, η ΔΕΗ, η ΕΜΥ, το ΥΠΑΑΤ και το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών.

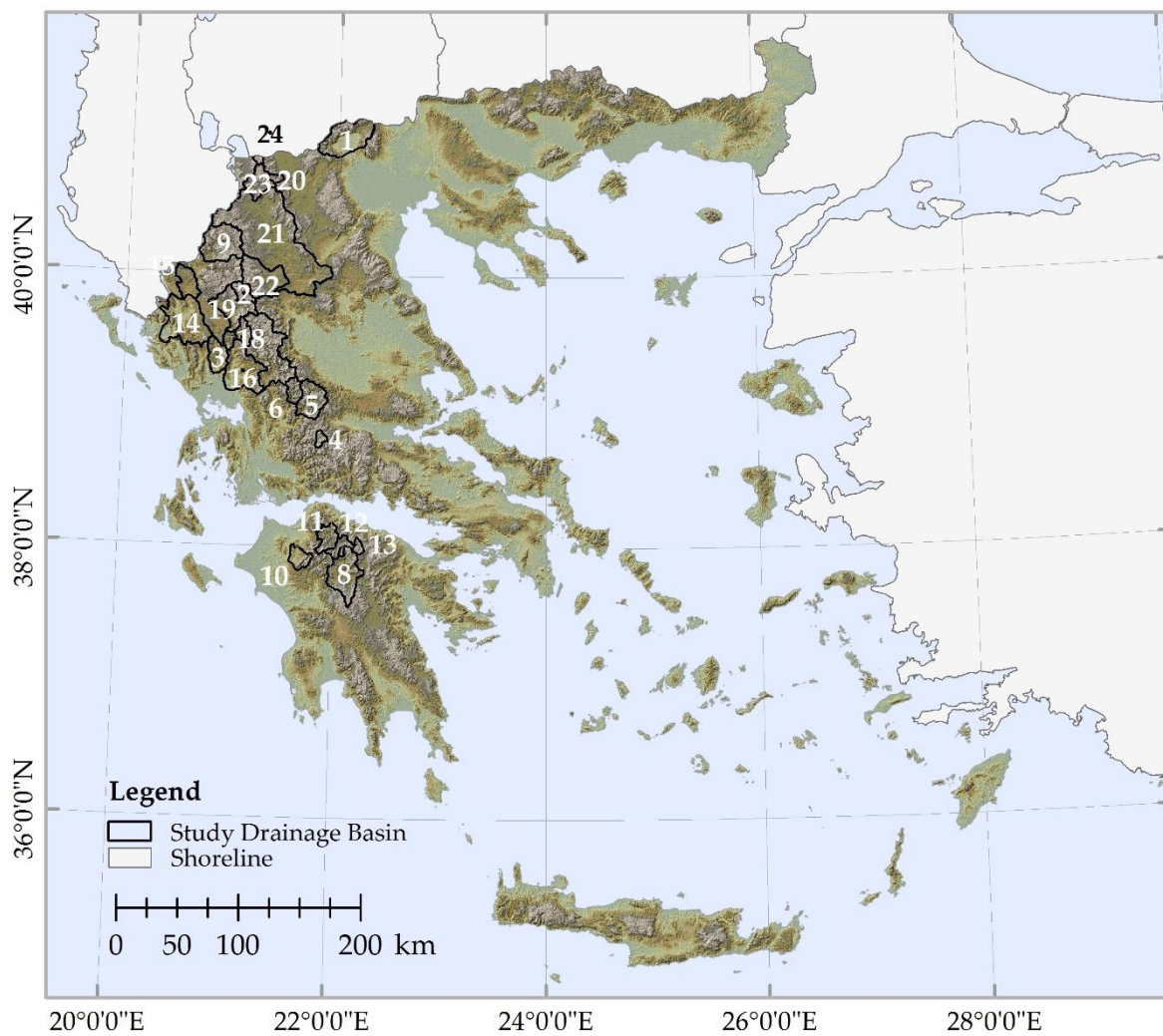
Το σύνολο των λεκανών απορροής καλύπτουν τον ελλαδικό χώρο, και για τον λόγο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να γίνει σύντομη αναφορά στη μορφολογία και στο κλίμα της χώρας. Το κλίμα της Ελλάδας είναι τυπικά μεσογειακό, δηλαδή, χαρακτηρίζεται από ήπιους και υγρούς χειμώνες, σχετικά θερμά και ξηρά καλοκαίρια και, γενικά, μακρές περιόδους ηλιοφάνειας κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους. Λεπτομερέστερα, στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας παρουσιάζεται μεγάλη ποικιλία κλιματικών τύπων λόγω της έντονης εναλλαγής του αναγλύφου, πάντα βέβαια μέσα στο πλαίσιο του Μεσογειακού κλίματος. Η έντονη διαφοροποίηση του αναγλύφου κατά μήκος της χώρας, από δυτικά προς ανατολικά, με την εναλλαγή θάλασσας και ξηράς και τις μεγάλες υψομετρικές διαφορές, λόγω των μεγάλων υψομέτρων στο κεντρικό ορεινό τμήμα της χώρας (οροσειρά της Πίνδου) αιτιολογούν την μετάπτωση από το υγρό κλίμα της Βόρειας και Δυτικής Ελλάδας, στο ξηρό κλίμα της Ανατολικής Ελλάδας.

Πίνακας 6-3: Μέση ετήσια βροχόπτωση P και απορροή Q στις λεκάνες απορροής μελέτης.

α/α	P (mm)	Q (mm)
1	351.3	183.7
2	1767.7	722.1
3	1548.0	1000.4
4	2167.0	1259.8
5	1386.9	789.7
6	1899.6	1076.7
7	1786.6	478.4
8	908.5	382.5
9	1949.2	1019.7
10	761.3	458.9
11	1144.5	470.2
12	1024.4	295.0
13	2041.1	1231.1
14	1667.5	440.6
15	1377.4	614.4
16	1453.3	332.0
17	1988.4	529.0
18	2143.7	986.2
19	1040.2	328.9
20	624.4	426.5
21	1605.3	499.1
22	1116.1	481.1
23	744.6	355.4
24	1212.6	836.9

Οι λεκάνες απορροής οι οποίες επιλέχθηκαν στην παρούσα εφαρμογή απεικονίζονται στο χάρτη του (Σχήμα 6-1).

Για το σύνολο των λεκανών απορροής υπάρχουν καταγεγραμμένες μετρήσεις απορροής στους υδρομετρικούς σταθμούς στην έξοδο κάθε λεκάνης, και, επομένως, με βάση όσα έχουν αναφερθεί στα πρώτα κεφάλαια της διατριβής, όλες οι λεκάνες απορροής που συμμετέχουν μπορούν να χαρακτηριστούν ως μετρούμενες. Όμως, στο πλαίσιο της εφαρμογής, για την ταξινόμηση της κάθε λεκάνης βάσει των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών (και της βροχόπτωσης), αποκρύπτεται η πληροφορία των υδρολογικών υπογραφών οι οποίες έχουν υπολογιστεί από μετρήσεις της απορροής και, επομένως, η λεκάνη απορροής θεωρείται μη μετρούμενη.



Σχήμα 6-1: Η χωρική κατανομή των λεκανών απορροής που χρησιμοποιήθηκαν. Ως υπόβαθρο έχει χρησιμοποιηθεί το ΨΜΕ ASTER GDEM2 (βλ. Εδάφιο 6.5)

Τα ονόματα των ποταμών των λεκανών απορροής καθώς και η ονομασία της θέσης του στομίου εξόδου αυτών, φαίνονται στον Πίνακα 6-4.

Πίνακας 6-4 Οι ποταμοί των λεκανών απορροής και η θέση εξόδου κάθε λεκάνης.

Κωδικός Υδροσκοπίου	Ποταμός	Θέση
1	30055 Αλμωπαίος	Άλωρος
2	30091 Αώος	Βοβούσα
3	30102 Λούρος	Φράγμα Λούρου
4	30169 Αχελώος (Κρικελλοπόταμος)	Δομνίστα
5	30312 Αχελώος (Ταυρωπός)	Βίνιανη
6	30315 Αχελώος (Αγραφιώτης)	Γεφ. Βαρβαριάδας
7	30317 Αχελώος	Αυλάκι
8	30326 Λάδωνας	ΥΗΣ Λάδωνα
9	30353 Σαραντάπορος	Γέφ. Κρεμαστής
10	30366 Πηνειός (Πελοποννήσου)	Γέφ. Κάλφα
11	30372 Σελινούς	Γεφ. Μελισσιών
12	30378 Βουραϊκός	Κερπινή
13	30379 Κράθις	Τσιβλός
14	30391 Καλαμάς	Κιοτέκι
15	30399 Καλαμάς	Γέφ. Αρετής
16	30403 Άραχθος	Γέφ. Άρτας
17	30406 Άραχθος	Γέφ. Πλάκας
18	30407 Άραχθος (Καλαρίτικος)	Γέφ. Γκόγκου
19	30408 Άραχθος	Γέφ. Τσίμοβου
20	30435 Αξιός (Υδρούσα)	Ρέμα Υδρούσσας
21	30549 Αλιάκμονας	Ιλαρίωνας
22	30551 Αλιάκμονας (Βενέτικος)	Ανάντη Γεφ. Γρεβενών
23	30564 Αλιάκμονας	Γεφ. Κορομηλιάς
24	30650 Στάρα Ριέκα	Άγ. Γερμανός

6.5 Δεδομένα

6.5.1 Γενικά

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εφαρμογή ανήκουν σε δύο κατηγορίες, τοπογραφικά δεδομένα γήινου αναγλύφου και μετεωρολογικά και υδρολογικά δεδομένα. Το ΨΜΕ από το οποίο αντλήθηκε πληροφορία για των υπολογισμό των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών και καλύπτει την περιοχή μελέτης, είναι η δεύτερη έκδοση του παγκόσμιου DEM (GD^{EM}²) που είναι γνωστό ως ASTER από το όνομα του αισθητήρα που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). Να σημειωθεί ότι η επεξεργασία των δεδομένων έγινε την περίοδο 2015- 2016, επομένως το συγκεκριμένο ΨΜΕ ήταν τότε σύγχρονο και διαθέσιμο.

6.5.2 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους ASTER

Το ASTER DEM είναι ένα παγκόσμιας κάλυψης ΨΜΕ. Η δεύτερη έκδοση του ASTER GD^{EM}² κυκλοφόρησε από τη NASA και το METI στα μέσα του Οκτωβρίου 2011, δύο χρόνια

μετά την εμφάνιση της πρώτης έκδοσης (ASTER GDEM Validation Team 2009). Οι βελτιώσεις στο GDEM² προκύπτουν από την απόκτηση 260.000 επιπλέον σκηνών για τη βελτίωση της κάλυψης, μια μικρότερη απόσταση συσχέτισης (correlation kernel) για την απόδοση υψηλότερης χωρικής ανάλυσης και βελτιωμένη αναγνώριση των επιφανειών του νερού. Όπως και με το GDEM¹, η επικύρωση του GDEM² πραγματοποιήθηκε από τις ΗΠΑ και την Ιαπωνία.

Η αξιολόγηση της ακρίβειας των υψομέτρων περιλάμβανε σύγκριση του GDEM² με τα υψόμετρα από απόλυτες γεωδαιτικές θέσεις αναφοράς του Conterminous US (CONUS), από εθνικά υψομετρικά δίκτυα των ΗΠΑ και της Ιαπωνίας, με το SRTM DEM χωρικής ανάλυσης ενός δευτερολέπτου, με τα υψόμετρα από 20 γνωστές θέσεις σε όλο τον κόσμο και με δορυφορικά δεδομένα υψομετρίας παγκοσμίως. Η αξιολόγηση της οριζοντιογραφικής ακρίβειας διεξήχθη ως μέρος των μελετών μεταξύ της Ιαπωνίας και των ΗΠΑ. Η απόλυτη ακρίβεια των υψομέτρων δείχνει το GDEM² να κυμαίνεται, κατά μέσο όρο, περίπου -0.20 m σε σύγκριση με τα υψόμετρα των 18000 γεωδαιτικών σημείων ελέγχου του CONUS, με ακρίβεια 17 m σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Η μελέτη της Ιαπωνίας σημείωσε ότι το GDEM² διέφερε από το εθνικό υψομετρικό δίκτυο των 10 m κατά -0.7 m σε γυμνό έδαφος και κατά 7.4 m σε δασικές περιοχές. Ομοίως, η μελέτη CONUS σημείωσε ότι το GDEM² είναι περίπου 8 m πάνω από το National Elevation Dataset (NED) τόξου ενός δευτερολέπτου στις περισσότερες δασικές περιοχές και περισσότερο από 1 m κάτω από το NED σε γυμνό έδαφος. Η μελέτη της Ιαπωνίας σημείωσε ότι η οριζόντια μετατόπιση στο GDEM¹ των 0.95 pixel μειώθηκε σε 0.23 pixel στο GDEM². Και οι δύο ομάδες σημείωσαν βελτιώσεις στην οριζόντια ανάλυση, μεταξύ 71 και 82 μέτρων, σε σύγκριση με το μοντέλο GDEM¹. Ο αριθμός των κενών περιοχών σε σχέση με το GDEM¹ μειώθηκε σημαντικά στο GDEM² και σε ορισμένες περιοχές εξαλείφθηκε. Με βάση αυτά τα παραπάνω, αν και το GDEM² έχει βελτιωθεί σημαντικά, εξακολούθησαν να υπάρχουν ορισμένα προβλήματα που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη χρησιμότητά του σε ορισμένες εφαρμογές.

Η ακρίβεια του ASTER DEM για την ελληνική επικράτεια είναι γνωστή μέσω της εργασίας των Ioannidis et al. (2014). Στην παρούσα εφαρμογή, το σύνολο των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών για όλες τις λεκάνες υπολογίστηκαν από το παραπάνω ΨΜΕ. Να σημειωθεί ότι αριθμητικά στοιχεία και προγενέστερα αποτελέσματα από προηγούμενη έρευνα στο πλαίσιο της διατριβής εκτιμήθηκαν εκ νέου με χρήση του ASTER DEM. Ο επανυπολογισμός των γεωχωρικών στοιχείων κρίθηκε απαραίτητος για λόγους ομογένειας των αποτελεσμάτων.

6.5.3 Υδρομετεωρολογικά δεδομένα

Τα υδρομετεωρολογικά δεδομένα προέρχονται από δύο πηγές: από την Εθνική Βάση του Υδροσκοπίου, και από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ). Η βάση δεδομένων του Υδροσκοπίου γνωστή και ως Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας (ΕΤΥΜΠ), παρέχει μετεωρολογικά, υδρογεωλογικά και γεωγραφικά δεδομένα. Τα βροχομετρικά δεδομένα αποτελούν σημαντικό στοιχείο για την ολοκληρωμένη υδρολογική μελέτη μιας λεκάνης απορροής. Ελήφθησαν δεδομένα από σταθμούς με χρονοσειρές σε ημερήσιο βήμα για το ύψος βροχής για ένα ορισμένο πλήθος υδρολογικών ετών. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη περιλαμβάνουν τα ακόλουθα: (1) Χρονοσειρές μέσης ημερήσιας απορροής για 31 υδρομετρικούς σταθμούς, (2) χρονοσειρές ημερήσιου ύψους βροχόπτωσης για 47 βροχομετρικούς σταθμούς, και (3) χρονοσειρές ημερήσιου ύψους χιονόπτωσης για τους 47 βροχομετρικούς σταθμούς που χρησιμοποιούνται και για τις βροχοπτώσεις. Κατά την επεξεργασία των δεδομένων των σταθμών, είναι σημαντικό να εντοπιστεί το κοινό χρονικό εύρος των χρονοσειρών των υδρολογικών και μετεωρολογικών

δεδομένων. Στις περισσότερες περιπτώσεις η συνολική διάρκεια των χρονοσειρών ήταν δέκα υδρολογικά έτη.

Να σημειωθεί ότι, πριν τη χρήση των υδρομετεωρολογικών δεδομένων, είναι απαραίτητη η κατάλληλη επεξεργασία τους (όπως, π.χ., έλεγχος ομογένειας βροχομετρικών δεδομένων, συμπλήρωση βροχομετρικών παρατηρήσεων, εκτίμηση χωρικά μέσης βροχόπτωσης, και αναγωγή στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής).

Ως προς τα δεδομένα απορροής, στον ελλαδικό χώρο, το μέγεθος αυτό μετράται κυρίως σε συγκεκριμένες λεκάνες, οι οποίες παρουσιάζουν ενδιαφέρον από την άποψη της διαχείρισης υδατικών πόρων. Οι παραπάνω περιορισμοί οδήγησαν αρχικά σε 31 και, μετά από επί πλέον ελέγχους, 24 λεκάνες απορροής, με ταυτόχρονες χρονοσειρές απορροής και ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχόπτωσης, χιονόπτωσης) μήκους 10 υδρολογικών ετών.

6.6 Αποτελέσματα

Με εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας (εδάφιο 5.5.2) οι 24 λεκάνες απορροής που περιγράφηκαν στο υποκεφάλαιο 6.5, ταξινομήθηκαν σε κλάσεις υδρολογικά όμοιων λεκανών. Για την επιλογή του αριθμού των κλάσεων εφαρμόστηκε η διαδικασία που περιγράφηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο θεωρώντας ότι ο αριθμός αυτός μεταβαλλόταν από δύο έως πέντε. Οι τιμές του συντελεστή συμμετοχής, VPC που εμφανίζονται στον Πίνακα 6-5 αποκαλύπτουν ότι η ταξινόμηση γίνεται προοδευτικά πιο ασαφής καθώς ο αριθμός των κλάσεων αυξάνεται, αλλά η μείωση του συντελεστή VPC για το συγκεκριμένο εύρος του αριθμού των κλάσεων, είναι μικρή.

Πίνακας 6-5: Ο δείκτης συμμετοχής VPC

Αριθμός κλάσεων	2	3	4	5
VPC	0.6425	0.5708	0.5330	0.5067

Παρά το γεγονός ότι τα αποτελέσματα του Πίνακα 6-5 οδηγούν στη διατήρηση μόνο δύο κλάσεων, η επιθυμία είναι να προκύψει μια πιο ουσιαστική ταξινόμηση, οπότε τελικά διατηρήθηκαν τέσσερις κλάσεις οι οποίες αναφέρονται ως Κλάση 1, Κλάση 2, Κλάση 3 και Κλάση 4. Οι λεκάνες που ανήκουν σε αυτές τις κλάσεις είναι οι ακόλουθες:

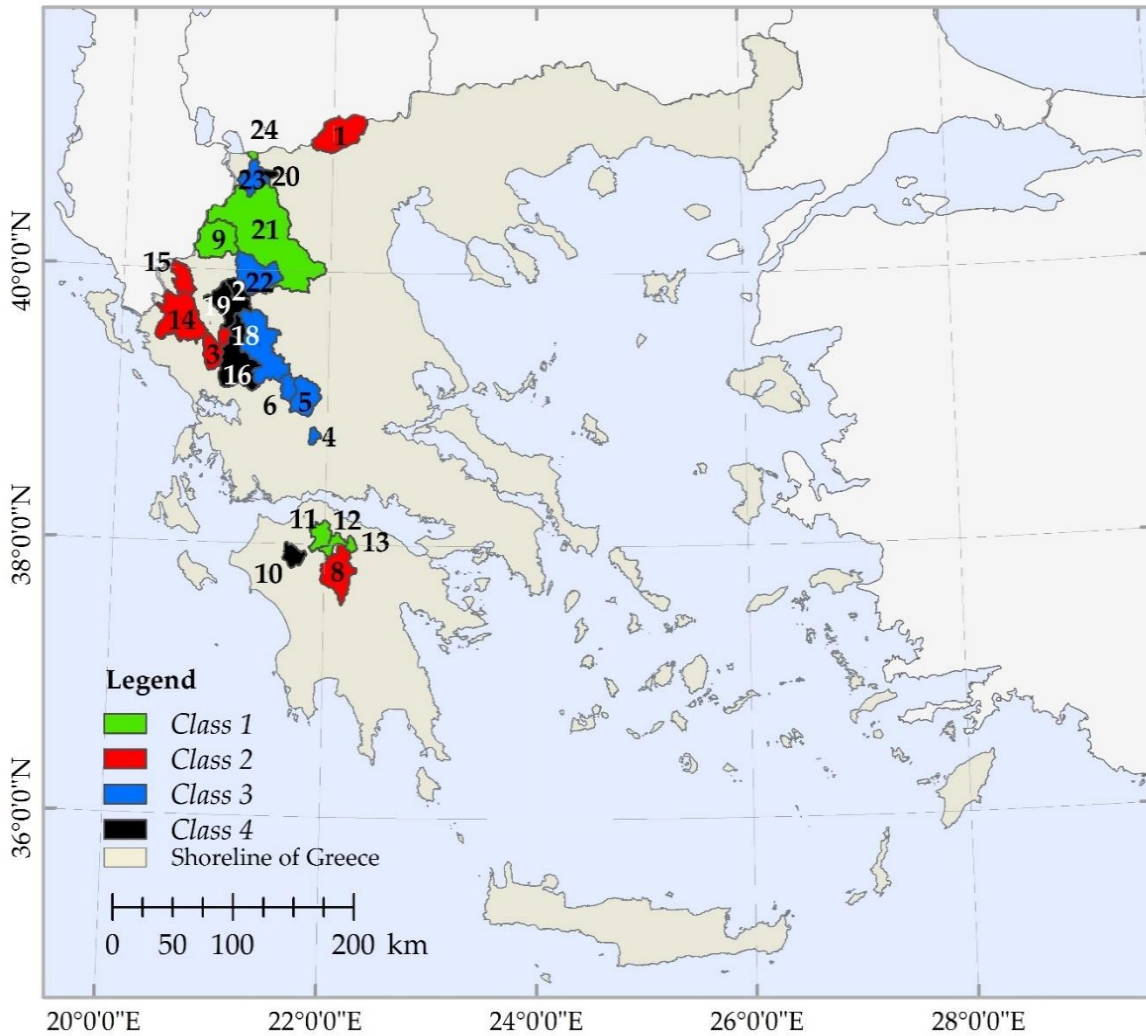
Κλάση 1: λεκάνες με αριθμούς 9, 11, 12, 13, 21 και 24 (οι αριθμοί εμφανίζονται στην πρώτη στήλη του Πίνακα 6-2),

Κλάση 2: 1, 3, 8, 14, 15 και 17,

Κλάση 3: 4, 5, 6, 7, 22 και 23, και

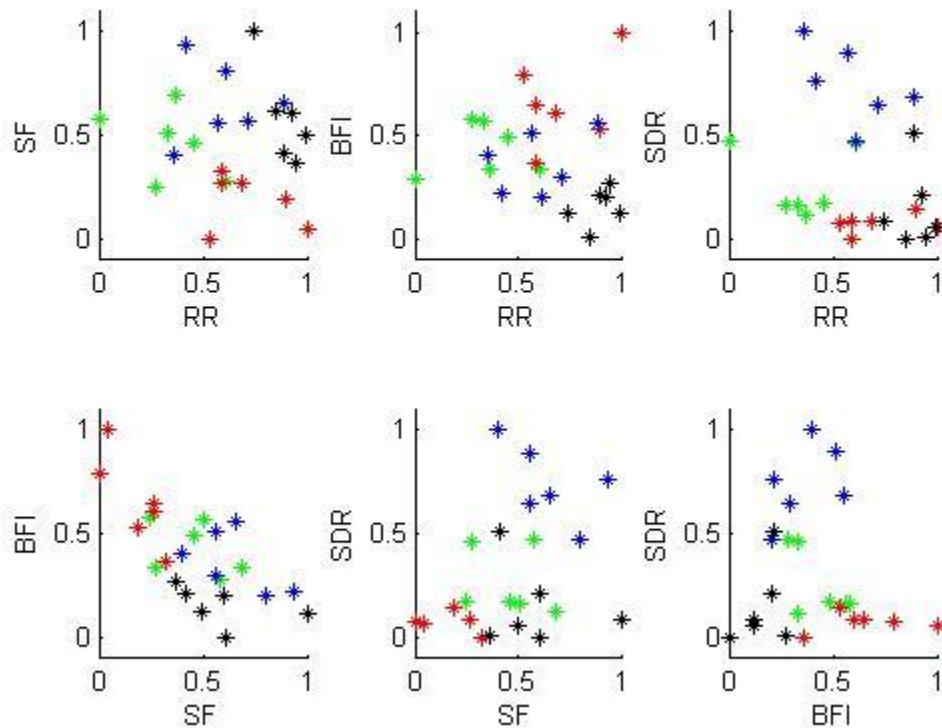
Κλάση 4: 2, 10, 16, 18, 19 και 20.

Οι τέσσερις κλάσεις των λεκανών απορροής φαίνονται στον χάρτη του Σχήματος 6-2, με τα τέσσερα διαφορετικά χρώματα.



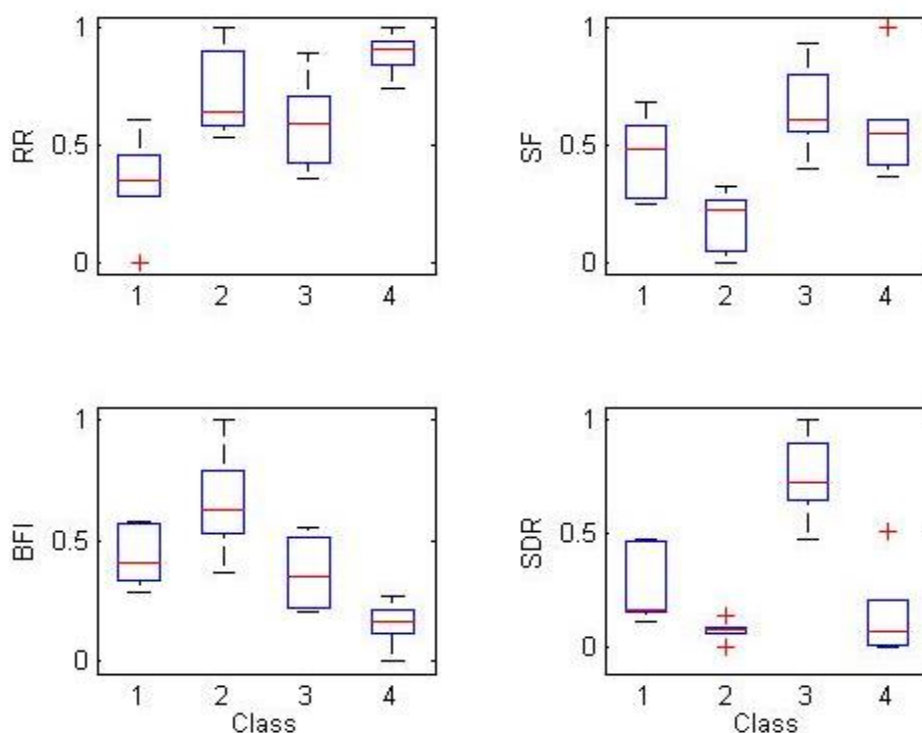
Σχήμα 6-2: Οι λεκάνες απορροής, όπως ταξινομήθηκαν στην εφαρμογή.

Το ερώτημα που εγείρεται αφορά το είδος του υδρολογικού καθεστώτος στο οποίο αντιστοιχεί καθεμιά από τις κλάσεις που περιγράφονται παραπάνω. Καθεμιά από τις λεκάνες αντιπροσωπεύεται ως ένα σημείο του χώρου των τεσσάρων διαστάσεων των υδρολογικών υπογραφών. Για λόγους κατανόησης, στο Σχήμα 6-3 παρουσιάζεται η αναπαράσταση του χώρου των υδρολογικών υπογραφών όπου απεικονίζονται οι έξι δισδιάστατες όψεις του χώρου των υδρολογικών υπογραφών, ενώ οι ταξινομημένες λεκάνες εμφανίζονται ως σημεία. Το χρώμα κάθε λεκάνης απορροής, συμφωνεί με το χρώμα της κλάσης του Σχήματος 6-2 στην οποία ταξινομήθηκε. Τα διαγράμματα είναι έξι τον αριθμό, καθώς ακολουθούν τον συνδυασμό των τεσσάρων υδρολογικών υπογραφών ανά δύο, δηλαδή, είναι: $4!/[2! \times (4-2)!] = 6$.



Σχήμα 6-3: Η αναπαράσταση των ταξινομημένων λεκανών στο δισδιάστατο χώρο των υδρολογικών υπογραφών (οι λεκάνες απορροής της κλάσης 1, κλάσης 2, κλάσης 3 και κλάσης 4 παρουσιάζονται με τα αντίστοιχα χρώματα: πράσινο, κόκκινο, μπλε και μαύρο).

Το συμπέρασμα που εξάγεται από αυτή την απεικόνιση των ταξινομημένων λεκανών στο χώρο των υδρολογικών υπογραφών του Σχήματος 6-3, είναι ότι δύσκολα μπορεί να προσδιοριστεί η σύνδεση μεταξύ των κυρίαρχων υδρολογικών διεργασιών και της κλάσης των λεκανών. Αυτό οδήγησε στο να βρεθεί ένας άλλος, πιο κατανοητός τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν τα γνωστά box-plots ή θηκογράμματα, κατά ορισμένη μετάφραση του όρου. Το Σχήμα 6-4 περιλαμβάνει τα 4 επί μέρους θηκογράμματα, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε μια υδρολογική υπογραφή. Κάθε επί μέρους γράφημα περιέχει τέσσερα θηκογράμματα (box-plots) που το καθένα παρουσιάζει το εύρος της υδρολογικής υπογραφής για κάθε διαφορετική κλάση λεκανών. Έτσι, υπάρχουν συνολικά 16 θηκογράμματα τα οποία παρουσιάζουν την κατανομή των τεσσάρων υδρολογικών υπογραφών στις τέσσερις κλάσεις λεκανών απορροής. Να σημειωθεί ότι οι τιμές των υδρολογικών υπογραφών παρουσιάζονται μετά από κανονικοποίηση.



Σχήμα 6-4: Η κατανομή των υδρολογικών υπογραφών ανά κλάση λεκανών απορροής, μετά από κανονικοποίηση.

Μετά από ποιοτική ανάλυση των στοιχείων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-4, εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Οι λεκάνες της Κλάσης 1 εμφανίζουν χαμηλό συντελεστή απορροής, μέτρια μεταβλητότητα της απορροής, μέτρια συμβολή της βασικής ροής στη συνολική απορροή, και μάλλον χαμηλή συμβολή της χιονόπτωσης στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.
- Η Κλάση 2 αναφέρεται σε λεκάνες με μέτριο έως υψηλό συντελεστή απορροής, χαμηλή μεταβλητότητα της απορροής, υψηλή συμβολή της βασικής ροής στη συνολική απορροή, και χαμηλή συμβολή της χιονόπτωσης στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.
- Η Κλάση 3 αναφέρεται σε λεκάνες με μέτριο έως υψηλό συντελεστή απορροής, υψηλή μεταβλητότητα της απορροής, μέτρια συμβολή της βασικής ροής στη συνολική απορροή και υψηλή συμβολή της χιονόπτωσης στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.
- Οι λεκάνες απορροής της Κλάσης 4 φαίνεται να εμφανίζουν υψηλό συντελεστή απορροής, μέτρια μεταβλητότητα της απορροής, χαμηλή συμβολή της βασικής ροής στη συνολική απορροή και χαμηλή συμβολή της χιονόπτωσης στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η μορφή των box-plots δεν είναι ιδιαίτερα κατατοπιστική για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Υπενθυμίζεται εδώ, ότι, για την εύρεση σχέσεων μεταξύ των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών των λεκανών που εξετάστηκαν και των κλάσεων αυτών, εφαρμόστηκε η μέθοδος της Ανάλυσης σε Κύριες Συνιστώσες (Principal Component Analysis ή PCA). Στη συνέχεια, αξιολογείται, μέσω της μεθόδου jack-knife, η επίδραση του μεγέθους του δείγματος, στα ποσοστά επιτυχίας της μεθόδου PCA.

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο PCA στα 4 γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής που επηρεάζουν περισσότερο το αποτέλεσμα, και διατηρώντας όλες τις κύριες συνιστώσες, υπολογίζονται τα στοιχεία του Πίνακα 6-6, τα οποία παρέχουν τις ακόλουθες πληροφορίες σχετικά με την επίδραση των χαρακτηριστικών των λεκανών σε κάθε κύρια συνιστώσα: (1) Η πρώτη συνιστώσα ουσιαστικά αντανακλά τη συσχέτιση της βροχόπτωσης, της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου και της μέσης κλίσης του εδάφους της λεκάνης, (2) η δεύτερη συνιστώσα αναδεικνύει την επιρροή της μέσης τιμής του προσανατολισμού κάθε κελιού (mean aspect), (3) η τρίτη συνιστώσα εκφράζει την επίδραση της μέσης κλίσης του εδάφους της λεκάνης απορροής και σε μικρότερο βαθμό, την επιρροή της βροχόπτωσης και της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου, και (4) η τέταρτη συνιστώσα αντιπροσωπεύει την συνδυασμένη επίδραση της βροχόπτωσης και της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου. Το αθροιστικό ποσοστό της διακύμανσης των αρχικών δεδομένων που εξηγείται από τις κύριες συνιστώσες 1, 1+2, 1+2+3 και 1+2+3+4, βρέθηκε αντίστοιχα ίσο με 46.27%, 71.23%, 88.75% και 100%. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα λήφθηκε η απόφαση να διατηρηθεί ο αριθμός των κύριων συνιστωσών, NPC, ίσος με τρία, καθόσον τρεις κύριες συνιστώσες εξηγούν το 88,75% της διακύμανσης των δεδομένων.

Πίνακας 6-6: Μητρώο συντελεστών φόρτισης παραγόντων (Factor loading matrix) (χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής) της μεθόδου PCA

Παράγων	Κύριες Συνιστώσες			
	1	2	3	4
<i>P</i>	0.6044	-0.1028	-0.3613	0.7026
<i>D_d</i>	-0.6021	0.1704	0.3241	0.7095
<i>S_M</i>	0.5079	0.0948	0.8560	0.0172
<i>A_M</i>	0.1195	0.9754	-0.1779	-0.0516

Κατά την επικύρωση της μεθοδολογίας εφαρμόστηκαν συνδυαστικά τα βήματα 1 και 2 σε όλες τις λεκάνες απορροής του δείγματος όπως αυτά περιγράφονται στο Υποκεφάλαιο 5.5. Όπως αναφέρθηκε ήδη, χρησιμοποιήθηκαν 3 κύριες συνιστώσες. Το ποσοστό επιτυχίας που επιτεύχθηκε για τον επιλεγμένο αριθμό κλάσεων (δηλαδή 4) ήταν υψηλό (μεγαλύτερο από 96%) όπως φαίνεται στον Πίνακα 6-6. Για ορισμένο πλήθος κλάσεων, τα αντίστοιχα ποσοστά επιτυχίας δίνονται επίσης στον Πίνακα 6-6. Όπως φαίνεται, το ποσοστό επιτυχίας μειώνεται ελαφρώς καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κλάσεων, αλλά παραμένει υψηλό σε όλες τις περιπτώσεις που δοκιμάστηκαν. Για λόγους σύγκρισης, οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται για NPC = 4 (δηλαδή, 4 κύριες συνιστώσες) και όλους τους αριθμούς των κλάσεων (από το 2 έως 5). Τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στον Πίνακα 6-5 αποκάλυψαν ότι η απώλεια στο ποσοστό επιτυχίας κατά τη μετάβαση από NPC = 4 σε NPC = 3 είναι πολύ μικρή (0.13%, 0.11%, 0.07% και 0.04% αντίστοιχα για 2, 3, 4 και 5 κλάσεις). Τα αποτελέσματα συνηγορούν ελαφρώς υπέρ της διατήρησης τεσσάρων κλάσεων.

Πίνακας 6-7: Ποσοστό επιτυχίας της ταξινόμησης των λεκανών απορροής μελέτης, για ορισμένο αριθμό κλάσεων και ορισμένο πλήθος κύριων συνιστωσών (NPC).

Αριθμός κλάσεων		2	3	4	5
Ποσοστό επιτυχίας (%) για NPC	4	97.99	97.25	96.91	96.64
Ποσοστό επιτυχίας (%) για NPC	3	97.85	97.14	96.84	96.60

Σε συνέχεια της αδιαμέριστης ταξινόμησης, επιλέχθηκαν δύο λεκάνες απορροής, οι λεκάνες με αριθμούς 6 και 4, οι οποίες όπως φαίνεται από το αποτέλεσμα της ταξινόμησης (Σχήμα 6-2) ανήκουν στην Κλάση 3, και χρησιμοποιούνται ως ζεύγος όμοιων λεκανών απορροής. Η

λεκάνη απορροής με αριθμό 6 είναι η λεκάνη απορροής του π. Αγραφιώτη και χρησιμοποιείται ως δότρια λεκάνη απορροής (δότρια των παραμέτρων αυτής από βαθμονόμηση), ενώ η λεκάνη απορροής με αριθμό 4 είναι η λεκάνη απορροής του Κρικελλοπόταμου και σε αυτήν ελέγχεται η επίδοση του μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής μέσω προσομοίωσης με χρήση των παραμέτρων της δότριας λεκάνης απορροής. Κατά την παραπάνω διαδικασία, για τη λεκάνη του π. Αγραφιώτη (δότρια λεκάνη) υπολογίζονται οι παράμετροι του αδιαμέριστου υδρολογικού μοντέλου με βαθμονόμηση, και αυτές μεταφέρονται μέσω της υδρολογικής ομοιότητας του ζεύγους των λεκανών. Η υδρολογική ομοιότητα συνίσταται στο ότι και οι δύο λεκάνες ανήκουν στην ίδια κλάση (εν προκειμένω, στην Κλάση 3). Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, η λεκάνη απορροής του Κρικελλοπόταμου παίζει το ρόλο της λεκάνης υποδοχής, ενώ η δότρια λεκάνη απορροής θεωρείται μετρούμενη, δηλαδή με διαθέσιμη παρατηρημένη χρονοσειρά της ημερήσιας απορροής στην έξοδό της. Η λεπτομερής περιγραφή των λεκανών απορροής των ποταμών Αγραφιώτη και Κρικελιώτη ακολουθεί στο Υποκεφάλαιο 9.4.

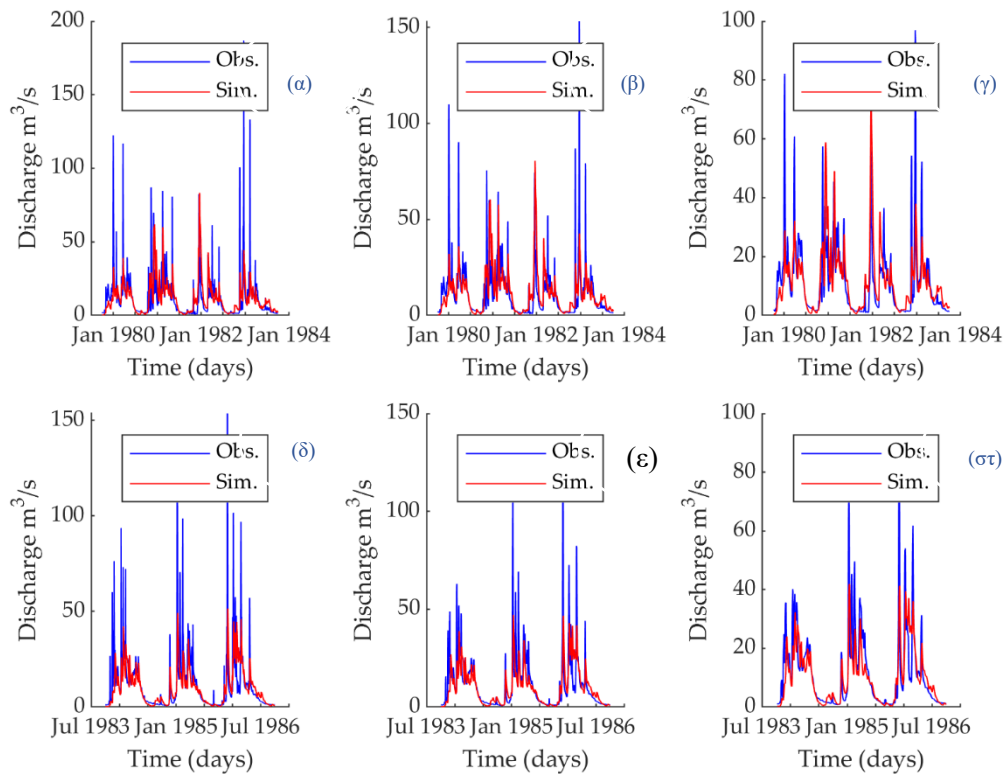
Έτσι, κατέστη εφικτός ο υπολογισμός του δείκτη επίδοσης του μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής του γνωστού ως δείκτη Nash Sutcliffe (NSE) ο οποίος αποτελεί ένα μέτρο καλής προσαρμογής του μοντέλου στα παρατηρημένα δεδομένα. Ακολουθεί ο Πίνακας 6-8, με τις τιμές του δείκτη NSE για τη λεκάνη του π. Αγραφιώτη, όπως αυτός υπολογίστηκε για την περίοδο της βαθμονόμησης (calibration) και την περίοδο της επαλήθευσης (validation). Ο δείκτης NSE υπολογίστηκε από τις παρατηρημένες (ιστορικές) τιμές της απορροής στην έξοδο της λεκάνης και τις αντίστοιχες ημερήσιες προσομοιωμένες παροχές. Επιπλέον, ελέγχονται και οι κυλιόμενοι μέσοι όροι των παροχών, για χρονική κλίμακα τριών και επτά ημερών, καθόσον οι κλίμακες αυτές είναι σε ευρεία χρήση σε υδρολογικούς υπολογισμούς. Τα αποτελέσματα για αυτές τις κλίμακες παρουσιάζονται στην 2^η και 3^η στήλη του Πίνακα 6-7. Για την περίοδο βαθμονόμησης ο δείκτης NSE προέκυψε 0.282, ενώ για την περίοδο επαλήθευσης ο δείκτης NSE είναι 0.409.

Πίνακας 6-8: Οι τιμές του δείκτη Nash Sutcliffe (NSE) για τη λεκάνη του π. Αγραφιώτη

	Οι τιμές του δείκτη NSE στη χρονική κλίμακα (d)		
	1 ημέρα	3 ημέρες	7 ημέρες
Βαθμονόμηση 1979-80 ως 1982-83	0.282	0.339	0.425
Επαλήθευση 1982-83 ως 1985-86	0.409	0.498	0.619

Στο Σχήμα 6-5 παρουσιάζονται οι μετρημένες και οι προσομοιωμένες ημερήσιες παροχές (1^η στήλη) για την περίοδο βαθμονόμησης και την περίοδο επαλήθευσης, καθώς και οι κυλιόμενοι μέσοι όροι των ημερήσιων παροχών για το κυλιόμενο χρονικό παράθυρο των τριών ημερών (2^η στήλη) και επτά ημερών (3^η στήλη).

Τα υδρογραφήματα που παρουσιάζονται αφορούν τις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες παροχές κατά τη βαθμονόμηση (Σχήμα 6-5: α, β, γ) και κατά την επαλήθευση (Σχήμα 6-5: δ, ε, στ), για ημερήσια, τριήμερη και επταήμερη χρονική κλίμακα. Να σημειωθεί ότι η περίοδος βαθμονόμησης καλύπτει το χρονικό διάστημα μεταξύ των υδρολογικών ετών 1979-80 έως 1982-83, ενώ η περίοδος επαλήθευσης καλύπτει το χρονικό διάστημα μεταξύ των υδρολογικών ετών 1982-83 έως 1985-86.



Σχήμα 6-5 Παρατηρημένα (μπλε χρώμα) και προσομοιωμένα (κόκκινο χρώμα) υδρογραφήματα για τη λεκάνη απορροής του π. Αγραφιώτη, για την περίοδο βαθμονόμησης (1979-80 έως 1982-83) και την περίοδο επαλήθευσης (1982-83 έως 1985-86).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη NSE για τη λεκάνη του Κρικελλοπόταμου, για διάφορες προσομοιώσεις: (α) με παραμέτρους της ίδιας της λεκάνης (θεωρούμενης ως μετρούμενης) με δύο διαφορετικές περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου, (β) με παραμέτρους από τη λεκάνη απορροής του π. Αγραφιώτη για τις ίδιες περιόδους. Στον Πίνακα 6-8 παρουσιάζεται η επίδοση του μοντέλου για κάθε μία από τις παραπάνω προσομοιώσεις για τη λεκάνη του Κρικελλοπόταμου. Από τις τιμές του δείκτη NSE, όπως αυτές προκύπτουν για τους κυλιόμενους μέσους όρους των παροχών, φαίνεται ότι η αύξηση του μεγέθους του χρονικού παραθύρου του κυλιόμενου μέσου όρου επί των παροχών οδηγεί σε αύξηση του δείκτη NSE.

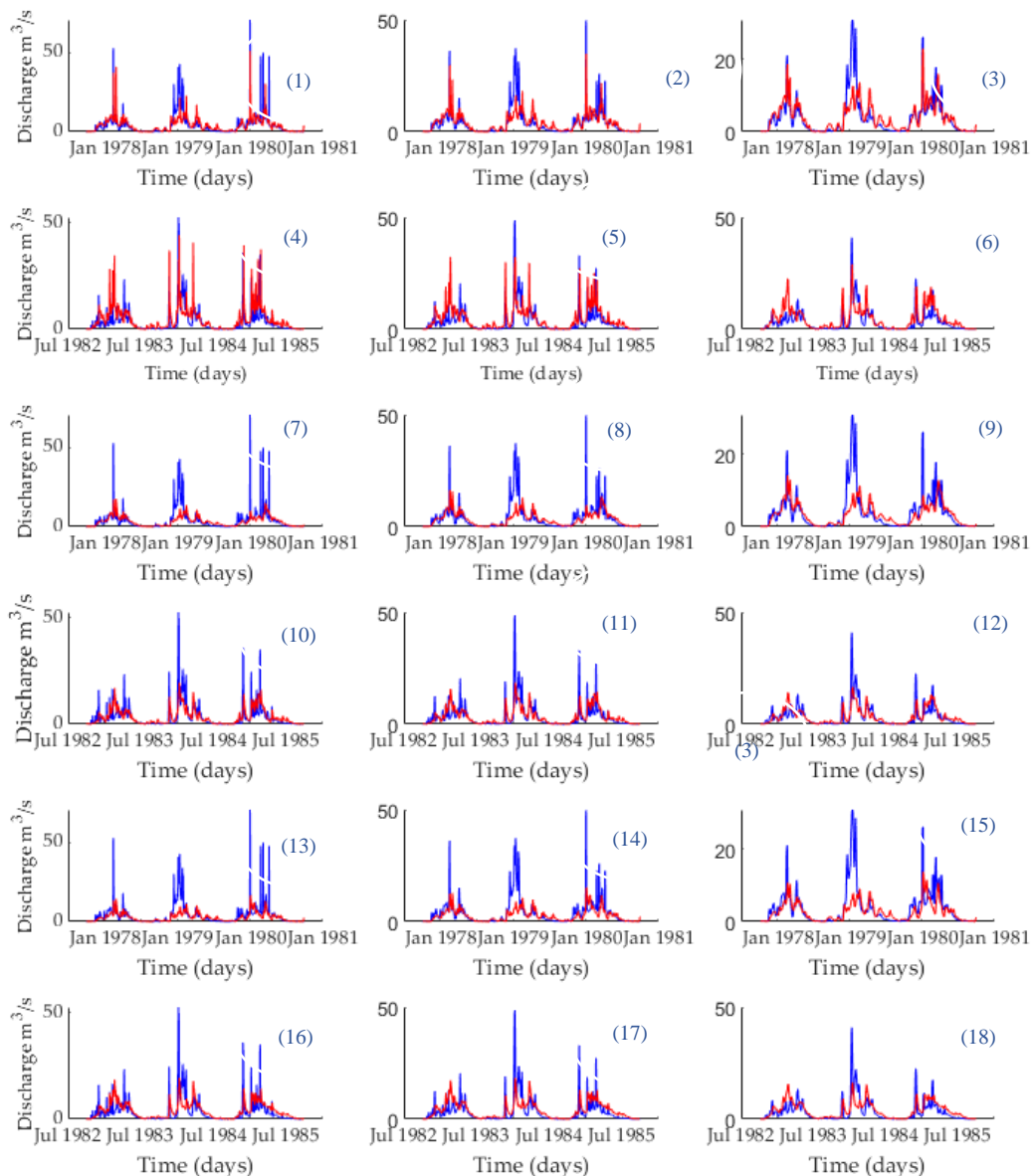
Πίνακας 6-9: Η επίδοση του μοντέλου στη λεκάνη απορροής του Κρικελλοπόταμου (λεκάνη υποδοχής) με τη μεταφορά των παραμέτρων της

	NSE στη χρονική κλίμακα (d)		
	1	3	7
Βαθμονόμηση 1977-78 ως 1979-80	0.396	0.506	0.571
Επαλήθευση 1982-83 ως 1985-86	0.144	0.280	0.402
Προσομοίωση με παραμέτρους λεκάνης Αγραφιώτη 1977-78 ως 1979-80	0.281	0.348	0.415
Βαθμονόμηση 1982-83 ως 1985-86	0.401	0.451	0.543
Επαλήθευση 1977-78 ως 1979-80	0.244	0.303	0.359
Προσομοίωση με παραμέτρους λεκάνης Αγραφιώτη 1982-83 ως 1985-86	0.295	0.337	0.415

Για τις παραπάνω δοκιμές υπολογίστηκε η ποσοστιαία διαφορά του δείκτη NSE μεταξύ της περίπτωσης με προσομοίωση κατά την πρώτη χρονική περίοδο διαθεσιμότητας δεδομένων με παραμέτρους από τη λεκάνη του π. Αγραφιώτη και της αντίστοιχης περίπτωσης με παραμέτρους από βαθμονόμηση στην εξεταζόμενη λεκάνη (Κρικελλοπόταμου). Η μείωση της επίδοσης βρέθηκε ίση με 29.0%, 31.2%, και 27.3% για τη χρονική κλίμακα μίας, τριών και επτά ημερών αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί της παραπάνω ποσοστιαίας διαφοράς του δείκτη NSE επαναλήφθηκαν για την δεύτερη χρονική περίοδο διαθεσιμότητας δεδομένων και η μείωση της επίδοσης εκτιμήθηκε σε 26.4%, 25.3%, και 23.6% για τη χρονική κλίμακα μίας, τριών και επτά ημερών αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 6-6 παρουσιάζονται τα υδρογραφήματα για τα συγκεκριμένα στάδια υπολογισμών, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στον προηγούμενο πίνακα (Πίνακας 6-9). Αναλυτικότερα, για το Σχήμα 6-6 τα υδρογραφήματα (1), (2), (3) αφορούν τη χρονική περίοδο της βαθμονόμησης από το 1977-78 ως 1979-80, τα υδρογραφήματα (4), (5), (6) αφορούν τη χρονική περίοδο της επαλήθευσης από το 1982-83 ως 1985-86, και τα υδρογραφήματα (7), (8), (9) αφορούν τη χρονική περίοδο της προσομοίωσης του υδρολογικού μοντέλου με χρήση των παραμέτρων της λεκάνης απορροής του π. Αγραφιώτη από το 1977-78 ως 1979-80.

Όμοια, για τη δεύτερη δοκιμή στο Σχήμα 6-6 τα υδρογραφήματα (10), (11), (12) αφορούν τη χρονική περίοδο της βαθμονόμησης από το 1982-83 ως 1985-86, τα υδρογραφήματα (13), (14), (15) αφορούν τη χρονική περίοδο της επαλήθευσης από το 1977-78 ως 1979-80, και τα υδρογραφήματα (16), (17), (18) αφορούν τη χρονική περίοδο της προσομοίωσης του υδρολογικού μοντέλου με χρήση των παραμέτρων της λεκάνης απορροής του π. Αγραφιώτη από το 1982-83 ως 1985-86.



Σχήμα 6-6: Υδρογραφήματα λεκάνης απορροής του Κρικελλοπόταμου, για τα στάδια προσομοίωσης του Πίνακα 6-9. Με μπλε γραμμή αποδίδονται οι παρατηρημένες παροχές και με κόκκινη γραμμή αποδίδονται οι προσομοιωμένες παροχές στην έξοδο της λεκάνης.

6.7 Σύνοψη

Στη εφαρμογή που παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο, μελετήθηκε το ζήτημα της αδιαμέριστης ταξινόμησης των λεκανών απορροής σύμφωνα με την ομοιότητά τους ως προς τις κυρίαρχες υδρολογικές διεργασίες. Χρησιμοποιήθηκαν οι υπάρχουσες μεθοδολογίες ταξινόμησης (Κεφ. 5) για την αντιμετώπιση των δύο βασικών προβλημάτων που αρχικά τέθηκαν.

Το πρώτο πρόβλημα συνίσταται στην ταξινόμηση ενός συνόλου μετρούμενων λεκανών απορροής (λεκανών απορροής με δεδομένα μετρήσεων απορροής) σε κλάσεις όμοιων λεκανών απορροής, με βάση τις τέσσερις υδρολογικές υπογραφές, οι οποίες υπολογίζονται από τις χρονοσειρές υδρολογικών και μετεωρολογικών δεδομένων. Οι υδρολογικές υπογραφές που

χρησιμοποιήθηκαν ως κριτήρια ταξινόμησης είναι ο συντελεστής απορροής, η κλίση της καμπύλης διάρκειας της απορροής, ο δείκτης βασικής ροής και η αναλογία ημερών χιονιού.

Το δεύτερο πρόβλημα αναφέρεται στην αναγνώριση της κλάσης στην οποία ανήκει μια μη μετρούμενη λεκάνη απορροής, χρησιμοποιώντας, ως κριτήρια ταξινόμησης, δεδομένα βροχόπτωσης της λεκάνης και τρία γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά αυτής.

Από τη μελέτη των παραπάνω προβλημάτων που αφορούν την υδρολογική ταξινόμηση μη μετρούμενων λεκανών απορροής, συνάγονται τα συμπεράσματα που ακολουθούν:

- Οι επιλεγείσες υδρολογικές υπογραφές μπορούν να παρέχουν επαρκή πληροφορία για τη διάκριση μεταξύ των διαφόρων καθεστώτων γένεσης της απορροής, τα οποία αντιστοιχούν σε συνδυασμούς διαφορετικών μεμονωμένων υδρολογικών διεργασιών.
- Η βροχόπτωση, σε συνδυασμό με τα επιλεγμένα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν ως κριτήρια ταξινόμησης, επέτρεψαν την αναγνώριση της κλάσης στην οποία ανήκει η υπό εξέταση μη μετρούμενη λεκάνη απορροής, με εξαιρετικά υψηλό ποσοστό επιτυχίας.
- Εντοπίστηκαν, μέσω της διαδικασίας ταξινόμησης, τέσσερις κλάσεις υδρολογικά όμοιων λεκανών απορροής. Αυτές είναι:
 1. Η κλάση 1 αναφέρεται σε λεκάνες απορροής με χαμηλή παραγωγή επιφανειακής απορροής, μέτρια χρονική μεταβλητότητα της απορροής και μέτρια συμβολή τόσο της βασικής ροής όσο και της χιονόπτωσης στην απορροή.
 2. Η κλάση 2 αναφέρεται σε λεκάνες απορροής με μέτρια παραγωγή επιφανειακής απορροής και χαμηλή μεταβλητότητα της απορροής λόγω του κυρίαρχου καθεστώτος εντός της λεκάνης που είναι η βασική ροή.
 3. Στην Κλάση 3 εντάσσονται λεκάνες απορροής με μέτρια παραγωγή επιφανειακής απορροής, εξαιρετικά μεταβλητές ροές λόγω χιονόπτωσης και μέτρια συμβολή της βασικής ροής.
 4. Τέλος, η Κλάση 4 περιλαμβάνει λεκάνες απορροής υψηλής παραγωγής άμεσης απορροής, με την απορροή των λεκανών να εμφανίζεται κυρίως ως άμεση απορροή με μέτρια χρονική μεταβλητότητα και χαμηλή συνεισφορά, στη συνολική απορροή, της βασικής ροής και τήξης χιονιού.
- Για την μελέτη του συγκεκριμένου θέματος, δηλαδή, της ταξινόμησης των μη μετρούμενων λεκανών απορροής, καταρτίστηκε και ελέγχθηκε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο που χρησιμοποιεί γνωστές και ευρέως δοκιμασμένες μεθόδους. Το μεθοδολογικό αυτό πλαίσιο αποδείχθηκε αποδοτικό και αποτελεσματικό, με το ποσοστό επιτυχούς κατάταξης ή αναγνώρισης της κλάσης, στην οποία ανήκει η μη μετρούμενη λεκάνη απορροής, να είναι πάνω από 95%.
- Από τον ορισμό των κλάσεων, έτσι όπως αυτός έχει προκύψει από τη μελέτη του πρώτου προβλήματος, συμπεραίνεται ότι έχει αναπτυχθεί ένα πρωτότυπο σύστημα ταξινόμησης μη μετρούμενων λεκανών απορροής, σύμφωνα με το οποίο, τα βασικά κριτήρια κατάταξης είναι γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής, που μπορούν να εξαχθούν άμεσα και εύκολα από το ΨΜΕ. Οι υδρολογικά όμοιες κλάσεις αλλά και το μεθοδολογικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε επιτρέπουν την κατάταξη μη μετρούμενων λεκανών σε μια κλάση, με χρήση γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών και, στη συνέχεια, τη μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας (π.χ., των παραμέτρων ενός μοντέλου βροχόπτωσης απορροής) ή την υιοθέτηση απευθείας της απορροής των

λεκανών απορροής που ανήκουν στην ίδια κλάση, με την μη μετρούμενη λεκάνη απορροής.

- Σύμφωνα με την επέκταση του μεθοδολογικού πλαισίου της υδρολογικής ταξινόμησης είναι δυνατή η μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας μεταξύ όμοιων υδρολογικά λεκανών απορροής. Από τα αποτελέσματα του ελέγχου της παραπάνω διατύπωσης σε δύο λεκάνες απορροής της Κλάσης 3, αποδεικνύεται ότι είναι δυνατή η μεταφορά και χρήση των παραμέτρων του μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής της δότριας λεκάνης. Οι διαφορές των τιμών του δείκτη NSE στην περίπτωση κατά την οποία η λεκάνη απορροής βαθμονομείται με βάση τις πραγματικές παρατηρημένες παροχές στην έξοδο της σε σύγκριση με την περίπτωση κατά την οποία μεταφέρονται και χρησιμοποιούνται οι παράμετροι του μοντέλου βροχόπτωσης απορροής της δότριας λεκάνης απορροής προέκυψαν μικρές. Να σημειωθεί ότι λόγω της ποιότητας και της ακρίβειας των δεδομένων βροχόπτωσης και απορροής, οι τιμές του δείκτη NSE είναι γενικά χαμηλές αλλά αντίστοιχης τάξης μεγέθους και στις δύο περιπτώσεις (από βαθμονόμηση στην ίδια τη λεκάνη και από μεταφορά πληροφορίας από άλλη, όμοια λεκάνη).
- Συμπεραίνεται από τα αποτελέσματα ότι η μεταφορά της υδρολογικής πληροφορίας υπό το πλαίσιο της ταξινόμησης των λεκανών απορροής ακολουθώντας όρους υδρολογικής ομοιότητας οδηγεί σε απώλεια πληροφορίας, η οποία χαρακτηρίζεται πάρα πολύ μικρή και δεν αλλοιώνει την ποιότητα της προσομοίωσης της υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης απορροής, η οποία δέχεται την πληροφορία.
- Η εφαρμογή κυλιόμενου μέσου όρου στις ιστορικές και στις προσομοιωμένες παροχές στην έξοδο της λεκάνης απορροής αποδίδει υψηλότερες σχετικά τιμές του δείκτη NSE. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκαν ελαφρά υψηλότερες τιμές του δείκτη NSE, όταν το χρονικό βήμα του κυλιόμενου μέσου όρου ορίστηκε σε 3 και 7 ημέρες.
- Καταληκτικά, επισημαίνεται ότι η μικρή διαθεσιμότητα και η χαμηλή ποιότητα των υδρολογικών δεδομένων, η αραιή χωρική και χρονική ανάλυση των χρονοσειρών των δεδομένων, καθώς η ύπαρξη ορισμένων κενών στις χρονοσειρές είναι μερικοί από τους πιο σοβαρούς περιορισμούς που πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Οι περιορισμοί που αναφέρθηκαν προηγούμενα αφορούν κυρίως τα υδρολογικά δεδομένα, ενώ, σε μικρότερο βαθμό, απασχολούν περιορισμοί ως προς τα γεωχωρικά δεδομένα.

7 Εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου – Ανάντη Συμβάλλουσα Έκταση

7.1 Γενικά

Στο Κεφάλαιο 7 αναλύονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας για εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου και τον ορισμό της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης (ΑΣΕ) ή, στα Αγγλικά, Critical Support Area (CSA). Διερευνήθηκε η δυνατότητα ταυτόχρονης αξιοποίησης χαρτογραφικής πληροφορίας και πληροφορίας από Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) για την κατά το δυνατόν αντικειμενική εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής. Στην περίπτωση κατά την οποία επιλέγεται ένα ΨΜΕ για εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου και τη μελέτη μιας λεκάνης απορροής, συνηθίζεται η εφαρμογή κατωφλίου έκτασης για τον εντοπισμό των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου. Καίριο στοιχείο για την εξαγωγή ενός υδρογραφικού δικτύου είναι η έννοια της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης (ΑΣΕ). Το μέγεθος αυτό αντιστοιχεί στην εδαφική επιφάνεια, της οποίας η επιφανειακή απορροή αρκεί για το σχηματισμό υδατορεύματος.

Για τον καθορισμό της ΑΣΕ προτείνονται τα εξής βήματα: (1) εντοπισμός των κεφαλών τόσο των εφήμερων ρεμάτων, όσο και των ρεμάτων μόνιμης ροής, πάνω σε τοπογραφικούς χάρτες κλίμακας 1:50000 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ), (2) μεταφορά των κεφαλών αυτών στο ΨΜΕ, (3) εντοπισμός των τελικών κεφαλών στο ΨΜΕ, μεταφορά, δηλαδή, των αρχικών κεφαλών στα πλησιέστερα σημεία επί των μισγαγγειών του ΨΜΕ, (4) εντοπισμός των ανάντη υπολεκανών απορροής, που αντιστοιχούν στα σημεία αυτά (τελικές κεφαλές), και (5) εκτίμηση της διάμεσης τιμής των εκτάσεων των ανάντη υπολεκανών του προηγούμενου βήματος, τιμή που λαμβάνεται ως η αντιπροσωπευτική ΑΣΕ για την τελική εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου.

Από το μεθοδολογικό πλαίσιο, που προτείνεται, γίνεται κατανοητό ότι λαμβάνεται υπόψη η εποχικότητα, μέσω της θεώρησης των εφήμερων και των μόνιμων ρεμάτων του υδρογραφικού δικτύου, και επομένως, για δύο διακριτές περιόδους του έτους, την υγρή και την ξηρή περίοδο. Σε ό,τι αφορά το σχεδιασμό υδραυλικών έργων, ως δυσμενέστερη συνθήκη επιλέγεται η θεώρηση του υδρογραφικού δικτύου με συμπερίληψη δηλαδή των εφήμερων ρεμάτων κατά την υγρή περίοδο του έτους, καθώς αυτή δίνει τη δυσμενέστερη μορφή του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από την άποψη της παροχής αιχμής και του χρόνου ανόδου.

Παράλληλα, με τη μελέτη της προηγούμενης περιγραφείσας μεθοδολογίας, γίνεται προσπάθεια ελέγχου της συσχέτισης μεταξύ της ΑΣΕ και των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της ανάντη υπολεκάνης των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου. Για την αναζήτηση της παραπάνω σχέσης υιοθετείται η Ανάλυση Παλινδρόμησης, με δύο γνωστές μορφές, την κλασική γραμμική (εδάφιο 5.4.1) και τη βηματική παλινδρόμηση (εδάφιο 5.4.2). Τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθοδολογίας, σε τρεις λεκάνες απορροής του ελλαδικού χώρου παρουσιάζονται στο υποκεφάλαιο

7.2 Εκτίμηση της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης

Η επιλογή της ΑΣΕ ως κρίσιμου στοιχείου για τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου είναι αναπόφευκτο βήμα κατά τη διαδικασία εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου από δεδομένα

ΨΜΕ. Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι αυτόματης εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου από ΨΜΕ (βλ. Κεφάλαιο 4) (O'Callaghan and Mark, 1984· Tarboton et al., 1991· Band and Moore, 1995· Daya Sagar et al., 2000· Hosseinzadeh, 2011· Isikdogan et al., 2015· Sangireddy et al., 2016), με τις περισσότερες από αυτές να υιοθετούν σταθερή ΑΣΕ, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η διακύμανσή της στο χρόνο και στο χώρο, ως την ελάχιστη τιμή ανάντη έκτασης, η οποία συμβάλλει στη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου (Band, 1986· Morris and Heerdegen, 1988· Tarboton et al., 1988).

Επίσης, έχουν τεθεί και προτείνονται αρκετά κριτήρια για τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου από ΨΜΕ. Σε αυτά περιλαμβάνονται, ως επί το πλείστον, η τιμή ενός κατωφλίου της ανάντη έκτασης, η τιμή ενός κατωφλίου τοπικής κλίσης, ένας συνδυασμός των κριτηρίων της έκτασης και της κλίσης, η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου (Di Lazzaro et al., 2015) ή ένα κατώφλι τοπικής καμπυλότητας (Lashermes et al., 2007).

Τα τελευταία χρόνια απαντάται σε πληθώρα δημοσιευμένων εργασιών η επιλογή σταθερής τιμής της ΑΣΕ, ανεξάρτητης τόσο χωρικά (σε σχέση με την κλίμακα της περιοχής μελέτης) όσο και χρονικά (σχετικά με την περίοδο μελέτης). Ως γνωστόν, το υδρογραφικό δίκτυο μιας λεκάνης απορροής αποτελείται από ρέματα μόνιμης και εφήμερης ροής. Τα τελευταία αναπτύσσονται ή συστέλλονται εποχιακά και ανάλογα με την εμφάνιση γεγονότων βροχοπτώσης. Η εποχικότητα της χωρικής κατανομής του υδρογραφικού δικτύου απασχολεί ιδιαίτερα στην παρούσα εφαρμογή. Η δυναμική φύση του υδρογραφικού δικτύου εξετάζεται υπό τη μορφή δύο ακραίων συνθηκών αυτού. Εφαρμόζοντας το μεθοδολογικό πλαίσιο, το οποίο προτείνεται, εξάγεται το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική κατανομή αυτού σε δυο ακραίες εποχές του έτους, την ξηρή και την υγρή περίοδο.

Η ΑΣΕ είναι το κατώφλι της ανάντη έκτασης, τα νερά της οποίας συμβάλλουν στη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου. Στόχος του κεφαλαίου είναι η παρουσίαση της διερεύνησης της διακύμανσης της ΑΣΕ στο χρόνο και στο χώρο, καθώς και η μοντελοποίηση αυτής. Η υιοθέτηση διαφορετικής σταθερής τιμής ΑΣΕ για την ξηρή και την υγρή περίοδο του έτους, προτάθηκε για πρώτη φορά το 2017 (Παπαγεωργάκη και Ναλμπάντης, 2017).

Επί μέρους στόχοι του Κεφαλαίου είναι (1) η διερεύνηση της ταυτόχρονης χωροχρονικής διακύμανσης της ΑΣΕ και (2) η αναζήτηση μιας σχέσης μεταξύ της θέσης των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου και των μορφομετρικών χαρακτηριστικών της αντίστοιχης στην κάθε κεφαλή υπολεκάνης απορροής.

Η χωροχρονική διακύμανση της ΑΣΕ μελετάται σε τρεις λεκάνες απορροής ποταμού της ηπειρωτικής Ελλάδας. Ως αρχικά δεδομένα χρησιμοποιούνται συμβατικοί τοπογραφικοί χάρτες κλίμακας 1:50000 και ένα ΨΜΕ για τον εντοπισμό, τον προσδιορισμό και την ψηφιοποίηση των κεφαλών των ρεμάτων και την εκτίμηση των αντίστοιχων τιμών της ΑΣΕ για δύο εποχές του υδρολογικού έτους: την υγρή και την ξηρή περίοδο. Τα αποτελέσματα της επιλογής της προτεινόμενης τιμής της ΑΣΕ, για κάθε περίοδο, συγκρίνονται με αυτά της επιλογής σταθερής τιμής της συμβατικής μεθόδου, που ακολουθεί στην πράξη η επιστημονική κοινότητα.

Η σχέση μεταξύ της ΑΣΕ και των μορφομετρικών χαρακτηριστικών διερευνάται με τη χρήση της ανάλυσης παλινδρόμησης. Ως κεφαλή του υδρογραφικού δικτύου, θεωρείται το πρώτο σημείο, στο οποίο τα νερά της ανάντη έκτασης που συμβάλλουν σε αυτό, επιτρέπουν την εμφάνιση ροής και, επομένως, κατάντη του σημείου αυτού εμφανίζονται οι κλάδοι πρώτης τάξης του υδρογραφικού δικτύου. Το ΨΜΕ το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή, έχει μέγεθος κελιού ίσο με 30 m και προέρχεται από την επεξεργασία δεδομένων της δορυφορικής

αποστολής SRTM. Η επεξεργασία της τοπογραφικής πληροφορίας μέσω της εφαρμογής της μεθοδολογίας, που προτείνεται, έγινε με χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS). Να σημειωθεί ότι ως κοινό σύστημα αναφοράς όλων των δεδομένων επιλέχθηκε το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ '87), και, επομένως, είναι αναγκαίο να εφαρμοστούν κατάλληλοι μετασχηματισμοί (γεωγραφικοί και προβολικοί μετασχηματισμοί), ανάλογα με την αρχική πηγή των δεδομένων.

Η επεξεργασία των δεδομένων και η εφαρμογή της μεθοδολογίας, που ακολουθήθηκε, έγινε με χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Αναλυτικότερα, για κάθε κεφαλή του υδρογραφικού δικτύου που εντοπίζεται στον χάρτη και ψηφιοποιείται, εξάγονται από το ΨΜΕ, στοιχεία για την ΑΣΕ και για τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της ανάντη υπολεκάνης, όπως η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της κλίσης του εδάφους, της τετραγωνικής ρίζας της κλίσης του εδάφους και του δείκτη HAND. Στη συνέχεια, για κάθε κεφαλή, η ΑΣΕ συνδέεται με την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των μορφομετρικών χαρακτηριστικών της ανάντη υπολεκάνης.

Ως προς το δεύτερο στόχο του παρόντος κεφαλαίου, η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου και των μορφομετρικών χαρακτηριστικών της υπολεκάνης απορροής αναμένεται να προσδώσει ένα ενδιάμεσο επίπεδο γνώσης, το οποίο διαφαίνεται ότι θα οδηγήσει στην κατανόηση των διεργασιών, οι οποίες σχετίζονται με την επιφανειακή απορροή εντός της λεκάνης απορροής.

Για την αναζήτηση της ζητούμενης σχέσης, εφαρμόζοντας την μέθοδο της Ανάλυσης Παλινδρόμησης, ελέγχονται διάφορα μοντέλα παλινδρόμησης. Το μοντέλα εξετάζουν τη σχέση της ΑΣΕ με μία ή περισσότερες μεταβλητές (μορφομετρικά χαρακτηριστικά), οι οποίες συμμετέχουν στο μοντέλο είτε μη μετασχηματισμένες (αυτούσιες) είτε μετά από λογαριθμικό μετασχηματισμό. Καθένα από τα μοντέλα παλινδρόμησης, που εξετάζονται, έχει ρυθμιστεί να μπορεί να πραγματοποιεί πρόγνωση της ΑΣΕ, δηλαδή του κατωφλίου ανάντη έκτασης. Οι λεκάνες απορροής, των οποίων η ΑΣΕ εκτιμάται, ανήκουν στην ίδια ομάδα λεκανών απορροής, σύμφωνα με αποτελέσματα έρευνας που έγινε στο παρελθόν και παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6 της παρούσας Διατριβής.

7.3 Περιοχή Μελέτης

Η προτεινόμενη μεθοδολογία, η οποία παρουσιάζεται στο Υποκεφάλαιο 5.3, αφορά στην εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής με χρήση της ΑΣΕ και εφαρμόζεται σε τρεις λεκάνες απορροής ποταμού οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 7-1. Όλες οι λεκάνες απορροής, που διερευνώνται βρίσκονται στη Δυτική Ελλάδα και έχουν ταξινομηθεί ως υδρολογικά όμοιες στην ίδια κλάση, σύμφωνα με τα δημοσιευμένα αποτελέσματα προηγούμενης εργασίας (Papageorgaki and Nalbantis, 2016). Υπενθυμίζεται ότι τα «α», «β», και «γ» του Σχήματος 7-1 αντιστοιχούν στις τρεις λεκάνες απορροής των ποταμών Αγραφιώτη, Ταυρωπού και Κρικελιώτη. Οι τρεις λεκάνες έχουν ταξινομηθεί στην Κλάση 3, η οποία περιλαμβάνει λεκάνες απορροής με τα εξής Χαρακτηριστικά: σχετικά υψηλή παραγωγή απορροής, υψηλή μεταβλητότητα της απορροής, μέση συμβολή της βασικής ροής στη συνολική απορροή, και υψηλή συμβολή του χιονιού στα συνολικά ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.

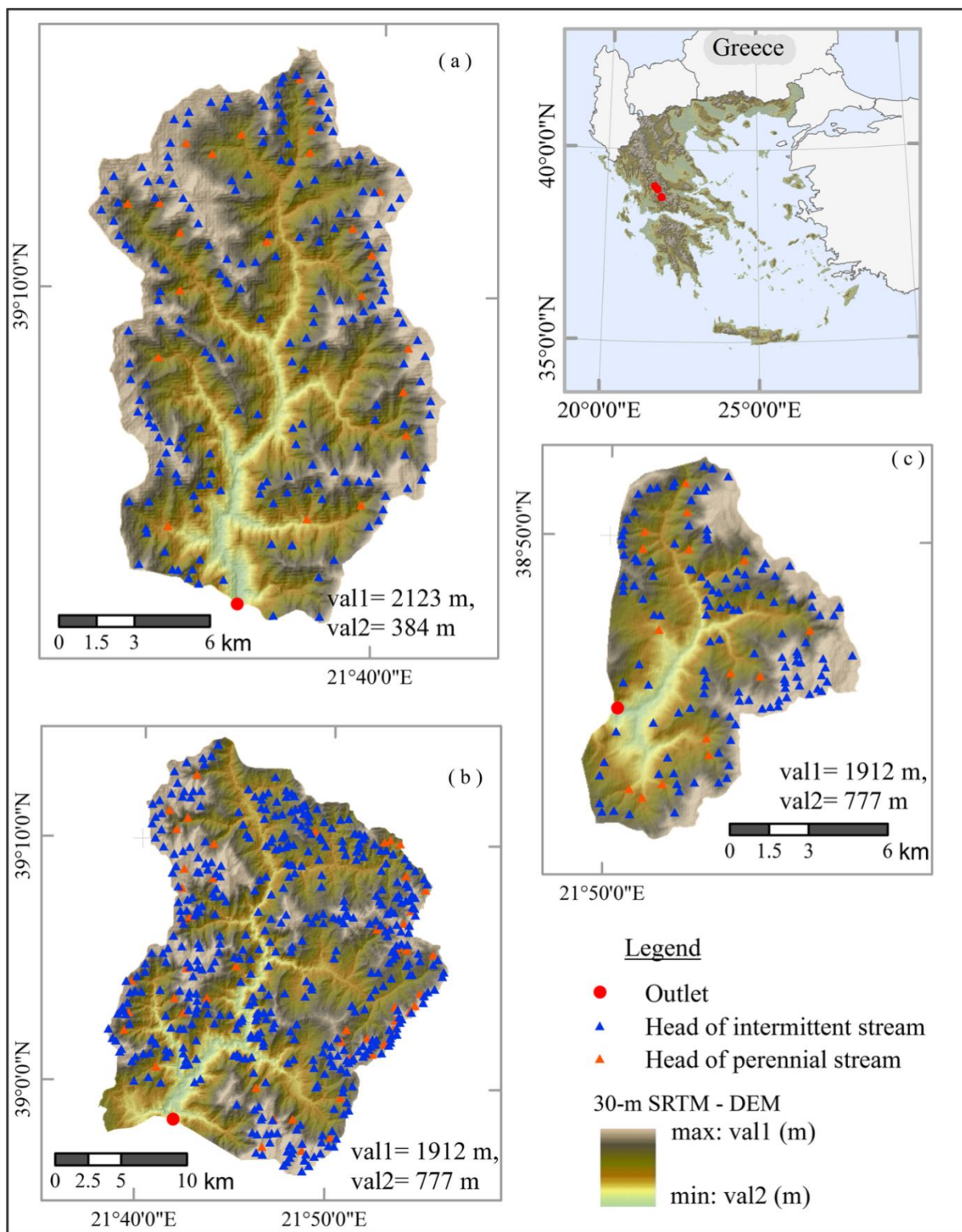
Η πρώτη λεκάνη απορροής (Σχήμα 7-1, α) είναι η λεκάνη απορροής του π. Αγραφιώτη (hydroscope ID 30315). Ο π. Αγραφιώτης βρίσκεται στην περιοχή της Ευρυτανίας και πηγάζει από τη Νότια Πίνδο. Είναι παραπόταμος του Αχελώου, και, επομένως, αποτελεί μέρος του

ευρύτερου υδρογραφικού δικτύου του π. Αχελώου. Η γέφυρα Βαρβαριάδος στην οποία είναι εγκατεστημένος υδρομετρικός σταθμός, θεωρείται ως η θέση του στομίου εξόδου της λεκάνης του π. Αγραφιώτη. Η λεκάνη απορροής έχει έκταση 217.9 km², χαρακτηρίζεται από ορεινό ανάγλυφο με μέσο υψόμετρο 1180 m και μέση κλίση εδάφους 29.8°. Η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι περίπου 14°C, ενώ η μέση ετήσια βροχόπτωση της λεκάνης ανέρχεται στα 1771 mm, θεωρούμενο στο μέσο υψόμετρο. Να σημειωθεί ότι στους τοπογραφικούς χάρτες κλίμακας 1/50000 που χρησιμοποιήθηκαν για την ψηφιοποίηση των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης, υπάρχουν πάρα πολλές σημειωμένες πηγές, στα ορεινά τμήματα της λεκάνης απορροής, και, συνήθως, στις θέσεις, στις οποίες εμφανίζονται πηγές, εντοπίζονται και οι θέσεις των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-1, (a), οι περισσότερες των κεφαλών βρίσκονται σε υψηλά υψόμετρα και κοντά στον υδροκρίτη της λεκάνης απορροής.

Στο Σχήμα 7-1 (b), παρουσιάζεται η λεκάνη απορροής του ποταμού Ταυρωπού ή Μέγδοβα με κωδικό στο Υδροσκόπιο (ID) 30312, λεκάνη η οποία αποτελεί υπολεκάνη της ευρύτερης λεκάνης απορροής του π. Αχελώου. Η λεκάνη του π. Ταυρωπού έχει έκταση 538 km², μέσο υψόμετρο 1055 m και μέση κλίση εδάφους 24°. Το υψόμετρο του υδρομετρικού σταθμού και άρα, του στομίου εξόδου της λεκάνης είναι 777 m.

Η τρίτη λεκάνη απορροής, που μελετάται είναι η λεκάνη απορροής ενός ακόμα παραπόταμου του π. Αχελώου, γνωστού ως ποταμού Κρικελιώτη (Σχήμα 7-1 (c)). Η έκταση της τρίτης λεκάνης είναι 88.8 km². Χαρακτηρίζεται, όμοια με της δύο προηγούμενες λεκάνες, από ορεινό ανάγλυφο με μέσο υψόμετρο της λεκάνης 1296 m και η μέση κλίση εδάφους 20.2°.

Στο παρακάτω σχήμα, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του υψόμετρου του εδάφους για κάθε λεκάνη απορροής δίνονται από την τιμή των παραμέτρων val1 και val2, αντίστοιχα.



Σχήμα 7-1: Η λεκάνη απορροής του π. Αγραφιώτη (a), (b) η λεκάνη απορροής του π. Ταυρωπού, (c) η λεκάνη απορροής του π. Αχελώου, ενώ το μέγιστο και το ελάχιστο υψόμετρο αποδίδεται με τις τιμές val1 και val2, αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-1, ο αριθμός των κεφαλών των μόνιμων κλάδων του υδρογραφικού δικτύου (κόκκινο τρίγωνο) και των εφήμερων ρεμάτων (μπλε τρίγωνο) διαφέρει σημαντικά από τη μία λεκάνη στην άλλη. Επίσης, οι θέσεις των κεφαλών παίζουν καθοριστικό ρόλο στην κατανόηση της διακύμανσης της ΑΣΕ μεταξύ των δύο εποχών. Υπενθυμίζεται ότι κάθε κεφαλή οποιουδήποτε κλάδου πρώτης τάξης θεωρείται ότι συνδέεται με την έξοδο της

λεκάνης απορροής μέσω μιας συνεχούς αλληλουχίας κλάδων του ποταμού, (μόνιμων και εφήμερων ρεμάτων). Κατά συνέπεια, θεωρείται ότι το υδρογραφικό δίκτυο δεν αποσυνδέεται δυναμικά, παρότι τα μεμονωμένα τμήματα των εφήμερων κλάδων στεγνώνουν προοδευτικά κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου.

7.4 Δεδομένα

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, χρησιμοποιήθηκαν μόνον τοπογραφικού τύπου χωρικά δεδομένα για τον εντοπισμό των κεφαλών των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και για την εν συνεχεία διερεύνηση της σχέσης της ΑΣΕ και των μορφομετρικών χαρακτηριστικών της έκτασης ανάντη της κάθε κεφαλής στην οποία αποδίδεται η τιμή της ΑΣΕ.

Για τη διερεύνηση της ΑΣΕ και την εξαγωγή των μορφομετρικών χαρακτηριστικών της λεκάνης ανάντη της κάθε κεφαλής, χρησιμοποιούνται δύο είδη χωρικής πληροφορίας σχετικά με το γήινο ανάγλυφο: (1) συμβατικοί τοπογραφικοί χάρτες κλίμακας 1:50000 οι οποίοι καλύπτουν την περιοχή μελέτης, και (2) ένα ΨΜΕ το οποίο αποτελεί τμήμα του παγκόσμιας κάλυψης ΨΜΕ της αποστολής SRTM, γνωστό ως SRTM DEM. Η χωρική πληροφορία αξιοποιείται για τον εντοπισμό των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου σε δύο χρονικές περιόδους εντός του υδρολογικού έτους (ξηρή και υγρή).

Στο πλαίσιο της παρούσας εφαρμογής, η ψηφιοποίηση των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου επί των τοπογραφικών χαρτών αποτελεί την πρωτογενή πληροφορία για τη μελέτη της ΑΣΕ σε σχέση με τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά. Για το λόγο αυτό, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη συλλογή της συγκεκριμένης πληροφορίας.

Σύμφωνα με την πληροφορία η οποία υπάρχει στους χάρτες, και την υπάρχουσα βιβλιογραφία, αναφέρεται ότι η κεφαλή ενός υδατορεύματος είναι δυνατόν να εντοπιστεί είτε σε μια πλαγιά στην οποία συγκεντρώνεται ροή από την ανάντη έκταση με εμβαδόν που ξεπερνάει ένα κατώφλι έκτασης, είτε κοντά στη θέση μιας πηγής. Στην πρώτη περίπτωση, επίσης, εμφανίζονται και πληρούνται συνθήκες που έχουν να κάνουν με το πλάτος και το βάθος ροής, όπως, π.χ., ότι πρέπει να υπάρχει σχετικά μικρό πλάτος και ικανό βάθος ροής σε αντίθεση με την τυπική ροή σε πλαγιά, κατά την οποία το πλάτος είναι πολύ μεγαλύτερο συγκριτικά με το βάθος ροής. Οι δύο τύποι κεφαλής μάλλον θα πρέπει να αντιμετωπιστούν χωριστά ή, έστω, με έναν διαφορετικό χαρακτηρισμό, καθόσον αυτοί δεν αντιστοιχούν στην ίδια αρχική συνθήκη. Για το λόγο αυτό, αποφασίστηκε να μελετηθεί μόνον η πρώτη περίπτωση κατά την οποία εντοπίζεται η κεφαλή ενός υδατορεύματος, έτσι ώστε να υπάρχει συμφωνία ως προς την αντιμετώπιση και με παλαιότερα ερευνητικά εγχειρήματα. Δεν παραγνωρίζεται όμως το γεγονός ότι μια πηγή είναι ένα σημείο της επιφάνειας του εδάφους, στο οποίο εμφανίζεται ποσότητα υπόγειου νερού το οποίο, στη συνέχεια, ρέει επιφανειακά.

Η επεξεργασία των δεδομένων και η εφαρμογή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των μορφομετρικών χαρακτηριστικών έγινε με χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών και του λογισμικού MatLab (v. 2021). Για κάθε κεφαλή του υδρογραφικού δικτύου, και, άρα, για κάθε τιμή της ΑΣΕ, υπολογίστηκε η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των μορφομετρικών χαρακτηριστικών της κλίσης του εδάφους, της τετραγωνικής ρίζας της κλίσης και του δείκτη HAND. Τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά που αποδίδονται σε κάθε κεφαλή αφορούν την έκταση ανάντη κάθε κεφαλής, αλλά, ταυτόχρονα, αποτελούν στατιστικά χαρακτηριστικά της χωρικής κατανομής του υδρογραφικού δικτύου μέχρι τη συγκεκριμένη κεφαλή.

7.4.1 Χάρτες κλίμακας 1:50000

Κατά τη μεταπολεμική αναδιοργάνωση της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) η οποία ξεκίνησε το 1945, ετέθη ως κύριος στόχος η συνέχιση της αποτύπωσης της χώρας σε πρωτότυπες πινακίδες κλίμακας 1:20.000. Από την προπολεμική περίοδο η αποτύπωση είχε καλύψει ένα μεγάλο μέρος της ελληνικής επικράτειας, δηλαδή, από τα βόρεια σύνορα της χώρας μέχρι τον Κορινθιακό κόλπο. Από τη θερινή περίοδο του 1952 αρχίζει το πρώτο και βασικότερο μεταπολεμικό χαρτογραφικό έργο κάλυψης ολόκληρης της ελληνικής επικράτειας από χάρτες κλίμακας 1:50.000. Το έργο αυτό προέβλεπε την επιτόπου αναθεώρηση στο πεδίο, από το προσωπικό της ΓΥΣ, των φωτο-τοπογραφικών πινακίδων που είχαν κατασκευαστεί από την Αμερικανική Χαρτογραφική Υπηρεσία, η οποία είχε εκτελέσει την αεροφωτογράφιση ολόκληρης της χώρας σε κλίμακα 1:42.000, το 1945.

Η Αμερικανική Υπηρεσία είχε ξεκινήσει από το 1950 την κατασκευή του τοπογραφικού χάρτη της Ελλάδος κλίμακας 1:50.000 και, μέχρι το 1955, είχε εκδώσει την πρώτη σειρά χαρτών (1η έκδοση) με την ονομασία AMS M708. Η σειρά αυτή περιελάμβανε 387 Φύλλα Χάρτου (Φ.Χ.) λατινικής ονοματολογίας. Για τη κατασκευή της κλίμακας αυτής χρησιμοποίησε γεωδαιτικό και χαρτογραφικό υπόβαθρο της ΓΥΣ (έως το 1940), πραγματοποίησε αεροφωτογράφιση της Ελλάδας σε κλίμακα 1:42000, και χρησιμοποίησε συμπληρωματικά στοιχεία (χαρτογραφικά και πεδίου) από τη ΓΥΣ και τους υπάλληλους της Αμερικανικής Υπηρεσίας. Με όλα τα παραπάνω στοιχεία κατασκεύασε, άγνωστο με ποιο ακριβώς τρόπο, το πρωτότυπο υλικό αναπαραγωγής της 1ης έκδοσης. Οι χάρτες αυτοί παρουσίαζαν πολλές ατέλειες και ανακρίβειες, κυρίως λόγω της κακής ερμηνείας των αεροφωτογραφιών που είχαν ληφθεί το 1945. Έτσι, η σειρά των χαρτών της 1ης έκδοσης αναθεωρήθηκε με εργασίες πεδίου και, στη συνέχεια, κατασκευάστηκε το πρωτότυπο υλικό των χαρτών 2ης έκδοσης της περιόδου 1953-1965. Η αναθεώρηση ξεκίνησε το 1952 από την Ν. Πελοπόννησο για 25 Φ.Χ. και συνεχίστηκε αδιάλειπτα έως το έτος 1961. Το έργο συνεχίστηκε με την σύνθεση και καλλιτεχνική σχεδίαση των χαρτών οι οποίες τελείωσαν οριστικά το 1966 και οδήγησαν στη δημιουργία του βασικού χαρτογραφικού υπόβαθρου πανελλαδικής κάλυψης στη βασική κλίμακα των Φ.Χ. κλίμακας 1:50000 της ΓΥΣ.

Μέχρι το 1987 είχε εκδοθεί η 4η σειρά και βρίσκονταν σε εξέλιξη η 5η και η 6η έκδοση. Το 1953, αρχίζει η εφαρμογή της Μερκατορικής Προβολής και η χρήση, επί των Φ.Χ. της χώρας, πληροφορίας ως προς τη διαίρεση, σύμφωνα με το Μεσημβρινό του Greenwich.

Σήμερα, η ΓΥΣ συνεχίζει το έργο αναθεώρησης των τοπογραφικών χαρτών κλίμακας 1:50000. Ταυτόχρονα, σχεδιάζει και βραχυπρόθεσμα θα θέσει σε εφαρμογή τη πλήρη μετάπτωση της διαδικασίας συλλογής, επεξεργασίας, σύνθεσης και καλλιτεχνικής σχεδίασης της βασικής κλίμακας με ολιστική εφαρμογή τεχνολογίας Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών.

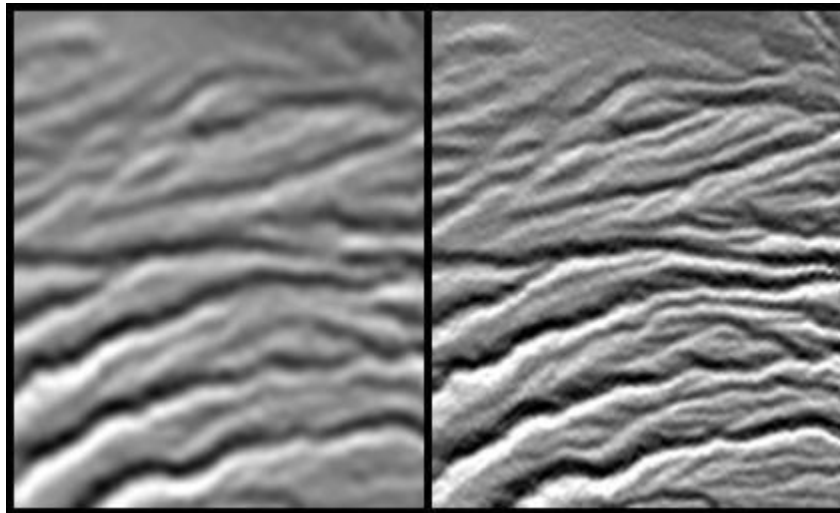
7.4.2 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους SRTM

Το SRTM DEM (Carabajal and Harding, 2006) είναι προϊόν της διεθνούς διαστημικής αποστολής Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), μιας ερευνητικής προσπάθειας που προσφέρει ψηφιακά μοντέλα υψομέτρων σε σχεδόν παγκόσμια κάλυψη σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80% της γήινης επιφάνειας μεταξύ των 56° νότιου γεωγραφικού πλάτους έως των 60° βόρειου. Η αποστολή SRTM είναι στην πραγματικότητα η πρώτη διαστημική αποστολή τεχνολογίας InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). Η μέθοδος της συμβολομετρίας συνθετικού ανοίγματος (InSAR) χρησιμοποιήθηκε για εξαγωγή του SRTM DEM από τα δορυφορικά δεδομένα. Σκοπός της αποστολής είναι η απόκτηση εικόνων SAR, για την παραγωγή DEM, με μονή διέλευση. Η αποστολή είχε ημερομηνία έναρξης 11

Φεβρουαρίου 2000 και ολοκληρώθηκε εντός 11 ημερών, μετά από την συμπλήρωση 159 τροχιών γύρω από την Γη.

Το προϊόν ήταν διαθέσιμο και ελεύθερο για χρήση στα τέλη του 2015. Τα δεδομένα μπορούν να ληφθούν είτε από την ίδια κεραία κατά τη διάρκεια δύο διαφορετικών τροχιών (ERS 1-2), είτε από δύο κεραίες σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους στην ίδια τροχιά. Το σύστημα SRTM (Rosen et al., 2001) είναι η πρώτη μέχρι στιγμής διαστημική αποστολή η οποία χρησιμοποίησε ταυτόχρονα δύο κεραίες ραντάρ για τη λήψη δεδομένων ραντάρ.

Αρχικά, τα δεδομένα SRTM για περιοχές εκτός των Ηνωμένων Πολιτειών ήταν διαθέσιμα σε ανάλυση τόξου 3 δευτερόλεπτων, που είναι το 1/1200 του ενός βαθμού του γεωγραφικού πλάτους και μήκους ή περίπου 90 m (295 πόδια). Η νέα έκδοση δεδομένων που κυκλοφόρησε σε ανάλυση τόξου 1 δευτερολέπτου ή περίπου 30 μέτρα (98 πόδια), προσφέρει την πλήρη χωρική ανάλυση των αρχικών δεδομένων παγκοσμίως (Σχήμα 7-2). Η νέα έκδοση είναι διαθέσιμη στον ιστότοπο της USGS. Στο παρακάτω σχήμα, απεικονίζεται η διαφορά στη χωρική ανάλυση των δύο εκδόσεων, για την ίδια περιοχή.



Σχήμα 7-2: Αριστερά: τμήμα SRTM DEM με χωρική ανάλυση 90 m και δεξιά: τμήμα SRTM DEM με χωρική ανάλυση 30 m.

Η χωρική ανάλυση που είχαν τα δεδομένα (χωρίς κενά δεδομένων) που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή είναι 30 m. Η ακρίβεια του SRTM DEM για την ελληνική επικράτεια είναι γνωστή μέσω της εργασίας των Ioannidis et al. (2014). Το SRTM DEM δοκιμάστηκε σε προηγούμενες μελέτες όσον αφορά την ακρίβεια και την αξιοπιστία του για υδρολογικές εφαρμογές (Nalbantis et al., 2017) και επιλέχθηκε ως υπόβαθρο για τον έλεγχο της μεθοδολογίας που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 5.3.

Ως χαρτογραφικό υπόβαθρο της εφαρμογής θεωρείται το SRTM DEM και, επομένως, το σύστημα αναφοράς των δεδομένων ακολουθεί το σύστημα στο οποίο προβάλλεται το SRTM DEM. Πιθανές διορθώσεις που χρειάστηκαν, εφαρμόστηκαν κυρίως στους τοπογραφικούς χάρτες ή σε πληροφορία που αντλήθηκε από αυτούς. Το συγκεκριμένο ΨΜΕ παρέχεται σε μορφή κανονικοποιημένου κανάβου (raster DEM). Η δομή διευκολύνει τον υπολογισμό των κανάβων κλίσεων, συγκεντρωτικής ροής, προσανατολισμού και άλλων δεικτών, ενώ υστερεί στην ακρίβεια απόδοσης του ανάγλυφου, με αποτέλεσμα να ομαλοποιούνται τα μέγιστα και τα ελάχιστα υψόμετρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εντοπίζονται μεγαλύτερες υψομετρικές αποκλίσεις στις περιοχές στις οποίες υπάρχουν κορυφογραμμές και μισγάγγειες.

Η πρωτογενής πληροφορία για τη δημιουργία του ΨΜΕ προέρχεται από μετρήσεις συμβολομετρίας στην ανάλυσή των οποίων υπεισέρχονται σφάλματα από διάφορες πηγές. Τα

σφάλματα στο τελικό ΨΜΕ προέρχονται από την μέθοδο λήψης των δεδομένων και χωρίζονται σε δυο γενικότερες κατηγορίες. Η πρώτη αφορά τα στατικά σφάλματα που παραμένουν σταθερά κατά τη συλλογή των δεδομένων και μπορούν να προσδιοριστούν μέσω σημείων ελέγχου, δηλαδή, σημείων γνωστής οριζοντιογραφικής θέσης και γνωστού υψομέτρου. Η δεύτερη κατηγορία αφορά τα σφάλματα τα οποία μεταβάλλονται με τον χρόνο, οφείλονται σε αστοχίες των συστημάτων και σε εξωτερικούς παράγοντες και μπορούν να προσδιοριστούν, ως έναν βαθμό, μέσω συνορθώσεων και δυναμικών βαθμονομήσεων. Πιο συγκεκριμένα, αυτά μπορεί να οφείλονται σε σφάλμα περιστροφής της βάσης, σφάλμα φάσης, σφάλματα λόγω απόκλισης της δέσμης, χρονικά σφάλματα και σφάλματα θέσης.

Οι προδιαγραφές για την ακρίβεια της πληροφορίας που λαμβάνεται από το SRTM DEM με διάσταση εικονοστοιχείου τόξου ενός δευτερολέπτου (1 arc-second) της δορυφορικής αποστολής SRTM για επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.10$ ή αλλιώς, για διάστημα εμπιστοσύνης 90%, είναι οι εξής: 16 m για την απόλυτη υψομετρική θέση, 10 m για την σχετική υψομετρική θέση, 20 m για την απόλυτη οριζόντια θέση, και 15 m για την σχετική οριζόντια θέση.

7.5 Σύνοψη μεθοδολογικού πλαισίου

Στη μεθοδολογία που εφαρμόζεται στο δεύτερο μέρος της εφαρμογής ελέγχεται ο εντοπισμός και η πρόβλεψη της καταλληλότερης τιμής ΑΣΕ για τις εξεταζόμενες λεκάνες απορροής. Για το σκοπό αυτό, κάθε λεκάνη απορροής εξετάζεται με δύο τρόπους: (1) ως «μετρούμενη» λεκάνη, γεγονός που σημαίνει ότι υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες για τις κεφαλές των ρεμάτων αυτής, και (2) ως «μη μετρούμενη» λεκάνη, στην οποία υπάρχει έλλειψη πληροφοριών για τις κεφαλές των ρεμάτων και γίνεται προσπάθεια εκτίμησης των πληροφοριών. Στην πρώτη περίπτωση, κάθε λεκάνη απορροής εξετάζεται χωριστά από τις άλλες λεκάνες, χρησιμοποιώντας όμως τα δεδομένα από τη συγκεκριμένη λεκάνη σε όλα τα μεθοδολογικά βήματα. Αντίθετα, όταν η λεκάνη θεωρείται μη μετρούμενη, μέρος της μεθοδολογίας εφαρμόζεται σε δεδομένα που προέρχονται μόνον από άλλες λεκάνες απορροής. Σημειώνεται ότι για λόγους παρουσίασης, οι εξεταζόμενες λεκάνες απορροής των ποταμών Αγραφιώτη, Ταυρωπού και Κρικελιώτη αντιστοιχούν στα γράμματα «a», «b», και «c» του αγγλικού αλφάβητου.

Οι συνδυασμοί μοντέλων παλινδρόμησης που ελέγχθησαν και ο τρόπος με τον οποίο συμμετέχει κάθε λεκάνη απορροής στη διαδικασία, παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-1. Συνολικά, εξετάζονται τέσσερις συνδυασμοί λεκανών απορροής, ως προς τρεις κατηγορίες μοντέλων: μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (mlm, multiple linear regression), μοντέλο σταδιακής ή βηματικής παλινδρόμησης (msw, stepwise regression) και μοντέλο που λαμβάνει υπόψη τη διάμεση τιμή της ΑΣΕ των μετρούμενων τιμών της ΑΣΕ που αρχικά προέρχονται από τον τοπογραφικό χάρτη αλλά έχουν προσαρμοστεί πάνω στο υδρογραφικό δίκτυο από ΨΜΕ (med), χωριστά για την κάθε εποχή.

Επίσης, να σημειωθεί ότι, για λόγους καλύτερης κατανόησης των αποτελεσμάτων, όταν οι λεκάνες απορροής μελετώνται όλες μαζί, χρησιμοποιείται ο όρος «Ομάδα». Ο συνολικός αριθμός μοντέλων που εξετάστηκαν είναι ίσος με 24, καθώς είναι 4 (συνδυασμοί λεκανών απορροής) \times 3 (κατηγορίες μοντέλων) \times 2 (εποχές). Η ονοματολογία των μοντέλων φαίνεται στον Πίνακα 7-1, 3^η στήλη. Επίσης, να αναφερθεί ότι, εκτός από τα μοντέλα που ακολουθούν την Εξίσωση 5.9, η επιλογή του μοντέλου mlm περιλαμβάνει και τις μορφές των εξισώσεων 5.10 και 5.11, γεγονός που αυξάνει τον αριθμό των μοντέλων με επιπλέον $4 \times 2 \times 2 = 16$ μοντέλα, με τα συνολικά μοντέλα να φθάνουν τα 40.

Πίνακας 7-1: Οι συνδυασμοί μοντέλων παλινδρόμησης που ελέγχθηκαν για κάθε εποχή.

Μη μετρούμενη λεκάνη	Μετρούμενη λεκάνη	Όνομα μοντέλου
a/ 1	c και b	mlm1/ msw1/ med1
b/ 2	c και a	mlm2/ msw2/ med2
c/ 3	b και a	mlm3/ msw3/ med3
Όλες	Ομάδα	mlmGroup/ mswGroup/ medGroup

Η εφαρμογή περιλαμβάνει τέσσερις σειρές υπολογισμών. Η πρώτη σειρά (Σειρά 1) υπολογισμών περιλαμβάνει την εφαρμογή των Βημάτων 1 και 2 του εδαφίου 5.3.2 στις τρεις λεκάνες, έτσι ώστε να σχηματιστούν τα σύνολα των δεδομένων που υποδεικνύονται στον Πίνακα 7-1. Στη Σειρά 2, τα μοντέλα του πίνακα κατασκευάζονται και αξιολογούνται βάσει των δεδομένων από τις «μετρούμενες» λεκάνες.

Η Σειρά 3 περιλαμβάνει την επιλογή του καλύτερου μοντέλου για την πρόβλεψη της ΑΣΕ για κάθε εποχή. Η Σειρά 4 περιλαμβάνει την ακόλουθη επεξεργασία των αποτελεσμάτων για κάθε περίπτωση, κατά την οποία μελετάται διαφορετική «μη μετρούμενη» λεκάνη: (i) εξετάζεται η κατανομή των διαφορών μεταξύ των μοντελοποιημένων και των προερχόμενων από μετρήσεις στο χάρτη τιμών της ΑΣΕ χρησιμοποιώντας τον στατιστικό έλεγχο F (F-test) και τη μηδενική υπόθεση ότι οι διαφορές είναι στατιστικά μη σημαντικές, (ii) το υδρογραφικό δίκτυο, που προκύπτει από την τελικά μοντελοποιημένη ΑΣΕ, συγκρίνεται με αυτό που προέρχεται από την ΑΣΕ, η οποία προέκυψε από τον χάρτη, (iii) το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου (μήκος ροής) στις περιπτώσεις χρήσης των μοντελοποιημένων ΑΣΕ συγκρίνεται με το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου που προκύπτει με εφαρμογή της προερχόμενης από τον χάρτη ΑΣΕ, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη χρησιμότητα των σχέσεων οι οποίες μοντελοποιήθηκαν για την πρόβλεψη της ΑΣΕ.

7.6 Αποτελέσματα

Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο Υποκεφάλαιο 5.3 εφαρμόζεται στα δεδομένα των λεκανών απορροής τα οποία παρουσιάστηκαν στο Υποκεφάλαιο 7.4. Αρχικά, κατά το στάδιο προετοιμασίας των δεδομένων, εμφανίστηκε η ανάγκη μετατόπισης των κεφαλών των ρεμάτων που είχαν ψηφιοποιηθεί επί των τοπογραφικών χαρτών κατά οριζόντια απόσταση ίση με 4 ή 5 κελιά. Η μετατόπιση αυτή ήταν αναγκαία ώστε να μπορέσει να μεταφερθεί με επιτυχία η πληροφορία από τις κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου, όπως αυτές ψηφιοποιήθηκαν στους τοπογραφικούς χάρτες, στις μισγάγγειες του ΨΜΕ. Η μέγιστη επιτρεπτή απόσταση μετατόπισης ορίζεται σε περίπου 120-150 m. Κατά την εφαρμογή της μετατόπισης μέσω αυτοματοποιημένης διαδικασίας, έγινε έλεγχος και δόθηκε προσοχή, ώστε οι θέσεις των κεφαλών να εξακολουθούν, μετά την μετατόπιση, να αφορούν τις κεφαλές των αντίστοιχων κλάδων του υδρογραφικού δικτύου του ΨΜΕ. Η ανάντη έκταση που συμβάλλει στη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου για τις δύο εποχές που εξετάστηκαν, μελετήθηκε όπως περιγράφεται στο Υποκεφάλαιο 7.2.

Επίσης, οι συντελεστές συσχέτισης των επεξηγηματικών μεταβλητών προέκυψαν όπως ακριβώς ήταν αναμενόμενο, δηλαδή, η μέση τιμή της κλίσης του εδάφους και η μέση τιμή της τετραγωνικής ρίζας της κλίσης του εδάφους παρουσιάζουν υψηλή συσχέτιση μεταξύ τους, ενώ η αμέσως επόμενη μικρότερη συσχέτιση εμφανίζεται στην τυπική απόκλιση της κλίσης του εδάφους με την τυπική απόκλιση της τετραγωνικής ρίζας της κλίσης του εδάφους.

Υιοθετώντας επίπεδο σημαντικότητας (Significance of F) ίσο με 0.05, ορισμένα από τα μοντέλα παλινδρόμησης θεωρήθηκαν σημαντικά. Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μοντέλων στα οποία οι μεταβλητές είναι αυτούσιες χωρίς να γίνεται έλεγχος άλλων μορφών. Τα αποτελέσματα αφορούν τις δύο εποχές, την ξηρή και την υγρή, και παρουσιάζονται, για καθεμία από αυτές, σε διαφορετικό πίνακα και συγκεκριμένα στους πίνακες 7-2 και 7-3 αντίστοιχα.

Για την περίπτωση εφαρμογής κλασικής πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (multiple linear regression), διατηρούνται οι περιπτώσεις χρήσης όλων των επεξηγηματικών μεταβλητών μέσω των αντίστοιχων μοντέλων, ενώ για την περίπτωση εφαρμογής βηματικής παλινδρόμησης (stepwise regression) διατηρείται μόνον το μοντέλο καλύτερης προσαρμογής. Πιο συγκεκριμένα, για την ξηρή περίοδο και την περίπτωση όλων των επεξηγηματικών μεταβλητών με χρήση μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, το μοντέλο καλύτερης προσαρμογής βρέθηκε για την ομάδα των λεκανών, αν και το R^2 της παλινδρόμησης είναι χαμηλό (0.401). Παρόμοια είναι και η επίδοση της βηματικής παλινδρόμησης, όταν ελέγχθηκε στην ομάδα των λεκανών απορροής ($R^2 = 0.4$). Όλα τα μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης αποδεικνύεται ότι αποδίδουν καλύτερα από τα αντίστοιχα μοντέλα βηματικής παλινδρόμησης και για τις δύο εποχές.

Σημειώνεται ότι η μονάδα που εμφανίζεται στον κατάλογο των επεξηγηματικών μεταβλητών των πινάκων που ακολουθούν (Πίνακες 7-2 έως 7-7, τελευταία στήλη), υποδηλώνει ότι η εξίσωση του μοντέλου περιέχει εκτός των μεταβλητών και έναν σταθερό συντελεστή παλινδρόμησης. Η συνεισφορά όλων των μεταβλητών στο μοντέλο είναι προσθετική.

Πίνακας 7-2: Αποτελέσματα της Ανάλυσης Παλινδρόμησης για την ξηρή περίοδο και για αυτούσιες τις μεταβλητές.

Μοντέλο	R^2	F	p-value	Επεξηγηματικές μεταβλητές
mlm1	0.368	25.8	7.35e-17	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw1	0.287	72.3	6.87e-15	1, X_2
mlm2	0.39	23.5	4.87e-15	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw2	0.326	72.5	1.6e-14	1, X_2
mlm3	0.246	5.8	0.000429	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw3	0.168	15	0.000232	1, X_2
mlmGroup	0.401	33.4	2.37e-21	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
mswGroup	0.4	44.6	3.83e-22	1, X_2 , X_3 , X_4

X_1 = η μέση τιμή της κλίσης του εδάφους, X_2 = η τυπική απόκλιση της κλίσης του εδάφους, X_3 = η μέση τιμή της τετραγωνικής ρίζας της κλίσης του εδάφους, X_4 = η τυπική απόκλιση της τετραγωνικής ρίζας της κλίσης του εδάφους.

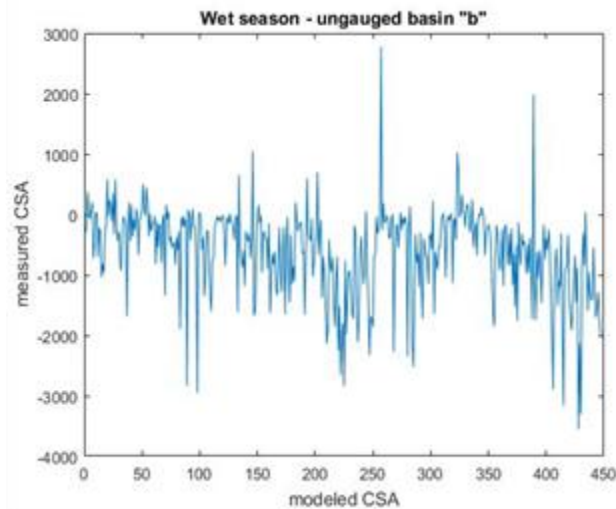
Πίνακας 7-3: Αποτελέσματα της Ανάλυσης Παλινδρόμησης για την υγρή περίοδο και για αυτούσιες τις μεταβλητές.

Μοντέλο	R^2	F	p-value	Επεξηγηματικές μεταβλητές
mlm1	0.0183	2.13	0.0759	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw1	0.0103	4.81	0.0288	1, X_1
mlm2	0.235	16.3	1.17e-11	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw2	0.244	23	6.42e-13	1, X_1X_3
mlm3	0.0341	5.68	0.000169	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw3	0.017	11.2	0.000884	1, X_4
mlmGroup	0.0221	3.73	0.0052	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
mswGroup	0.0163	10.9	0.000989	1, X_1

Αν και, στην ξηρή περίοδο, το μέγεθος του δείγματος των κεφαλών των υδατορευμάτων για την ομάδα των λεκανών απορροής είναι μικρό (ίσο με 205 κεφαλές), πραγματοποιείται ανίχνευση ακραίων τιμών, χρησιμοποιώντας τις δύο μεθόδους που περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 5.3. Κανένα από τα δύο σύνολα δεδομένων που προέκυψαν μετά την ανίχνευση ακραίων τιμών με τις δύο διαφορετικές μεθοδολογίες, δεν απέδωσε καλύτερα στην ανάλυση παλινδρόμησης που ακολούθησε. Ως προς την ανίχνευση ακραίων τιμών, αξίζει να σημειωθεί ότι λιγότερο από το 10% των κεφαλών των υδατορευμάτων χαρακτηρίζονται ως ακραίες για την κάθε εποχή. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται, αναφέρονται σε ελέγχους μοντέλων παλινδρόμησης χωρίς αφαίρεση των ακραίων τιμών.

Σε αντίθεση με την περίπτωση της ξηρής περιόδου, το μέγεθος του δείγματος των κεφαλών για την υγρή περίοδο είναι μεγαλύτερο (ίσο με 664 κεφαλές). Ωστόσο, κανένα από τα αναγνωρισμένα μοντέλα παλινδρόμησης δεν μπορεί να γίνει αποδεκτό, καθώς οι τιμές R^2 των μοντέλων που ελέγχθηκαν, είναι κοντά στο μηδέν, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7-3. Για την υγρή περίοδο, το ίδιο αποτέλεσμα προέκυψε ως προς την επίδοση των μοντέλων, αλλά και για την ανάλυση των δεδομένων τα οποία αφορούν την ομάδα των λεκανών απορροής. Ως εκ τούτου, μόνο ένα μοντέλο επιλέγεται και ελέγχεται μέχρι την τελευταία σειρά υπολογισμών. Αυτό είναι τα mlm2. Τα mlm2 και msw2 έχουν πολύ παρόμοιες τιμές R^2 . Το αποτέλεσμα της εφαρμογής αυτού στην περίπτωση μιας μη μετρούμενης λεκάνης παρουσιάζεται στο Σχήμα

7-3. Σε αυτό το σχήμα, οι γραφικές διαφορές μεταξύ της μετρημένης ή προερχόμενης από τον χάρτη και της μοντελοποιημένης ΑΣΕ για τη λεκάνη b, χωρίς μετρήσεις ή, αλλιώς, ως «μη μετρούμενη» λεκάνη, φαίνονται για το εξεταζόμενο μοντέλο παλινδρόμησης (mlm2). Είναι προφανές ότι οι προβλέψεις του μοντέλου είναι φτωχές.



Σχήμα 7-3: Διαφορά μεταξύ της μοντελοποιημένης ΑΣΕ από την μετρημένη ΑΣΕ, για την μη μετρούμενη λεκάνη b σε κελιά, όταν εφαρμόζεται το μοντέλο multiple linear regression model ή mlm2.

Στη συνέχεια, ελέγχεται η σχέση της ΑΣΕ με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά μέσα από την μετασχηματισμένη εκδοχή των παραπάνω μεταβλητών. Εφαρμόζεται το ημι-λογαριθμικό εξαρτημένο μοντέλο, τόσο στην κλασική πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση, όσο και στην βηματική παλινδρόμηση. Η επίδοση των μοντέλων που προέκυψαν είναι καλύτερη από εκείνη των μοντέλων που παρουσιάζονται παραπάνω και για τις δύο εποχές, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7-4 και στον Πίνακα 7-5, για την ξηρή και την υγρή περίοδο αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι, συνολικά, τα μοντέλα βηματικής παλινδρόμησης φαίνεται να ανταποκρίνονται καλύτερα από τα μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, τόσο στην ξηρή όσο και στην υγρή εποχή.

Πίνακας 7-4: Αποτελέσματα της Ανάλυσης Παλινδρόμησης για την ξηρή περίοδο και για μετασχηματισμένες μεταβλητές.

Μοντέλο	R^2	F	p-value	Επεξηγηματικές μεταβλητές
mlm1	0.424	32.5	2.52e-20	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw1	0.424	43.6	3.51e-21	1, X_1 , X_2 , X_4
mlm2	0.429	27.6	4.42e-17	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw2	0.377	90.8	4.03e-17	1, X_2
mlm3	0.329	8.72	8.8e-06	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw3	0.491	23.1	1.35e-10	1, X_2X_4
mlmGroup	0.514	52.9	2.47e-30	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
mswGroup	0.466	177	1.67e-29	1, X_2

Πίνακας 7-5: Αποτελέσματα της Ανάλυσης Παλινδρόμησης για την υγρή περίοδο και για μετασχηματισμένες μεταβλητές.

Μοντέλο	R^2	F	p-value	Επεξηγηματικές μεταβλητές
mlm1	0.0749	9.25	3.44e-07	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw1	0.119	15.4	7.42e-12	1, X_4 , X_1X_3
mlm2	0.195	12.9	2.17e-09	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw2	0.178	46.7	8.38e-11	1, X_3
mlm3	0.089	15.8	2.45e-12	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw3	0.175	19.4	1.26e-23	1, X_1X_2 , X_2X_4 , X_3X_4
mlmGroup	0.079	14.3	3.29e-11	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
mswGroup	0.143	18.3	9.79e-20	1, X_1X_3 , X_2X_4

Το ημι-λογαριθμικό ανεξάρτητο μοντέλο της Εξίσωσης 5.10 εφαρμόζεται τόσο στην κλασική πολλαπλή γραμμική μέθοδο παλινδρόμησης όσο και στην βηματική παλινδρόμηση. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του στα δεδομένα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-6 και στον Πίνακα 7-7, για την ξηρή και την υγρή εποχή, αντίστοιχα.

Πίνακας 7-6: Αποτελέσματα της Ανάλυσης Παλινδρόμησης για την ξηρή περίοδο και για μετασχηματισμένες μεταβλητές.

Μοντέλο	R^2	F	p-value	Επεξηγηματικές μεταβλητές
mlm1	0.257	15.3	8.69e-11	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw1	0.23	53.6	7.79e-12	1, X_2
mlm2	0.283	14.5	5.21e-10	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw2	0.26	52.6	2.05e-11	1, X_2
mlm3	0.273	6.66	0.00013	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw3	0.179	16.1	0.000142	1, X_2
mlmGroup	0.308	22.3	3.23e-15	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
mswGroup	0.281	79.5	2.82e-16	1, X_2

Πίνακας 7-7: Αποτελέσματα της Ανάλυσης Παλινδρόμησης για την υγρή περίοδο και για μετασχηματισμένες μεταβλητές.

Μοντέλο	R^2	F	p-value	Επεξηγηματικές μεταβλητές
mlm1	0.0161	1.87	0.114	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw1	~	~	9.59E-17	1
mlm2	0.203	13.5	8.15e-10	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw2	0.194	51.7	1.06e-11	1, X_1
mlm3	0.031	5.15	0.000434	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
msw3	0.0204	13.5	0.000258	1, X_4
mlmGroup	0.0225	3.79	0.00469	1, X_1 , X_2 , X_3 , X_4
mswGroup	0.0133	8.94	0.00289	1, X_3

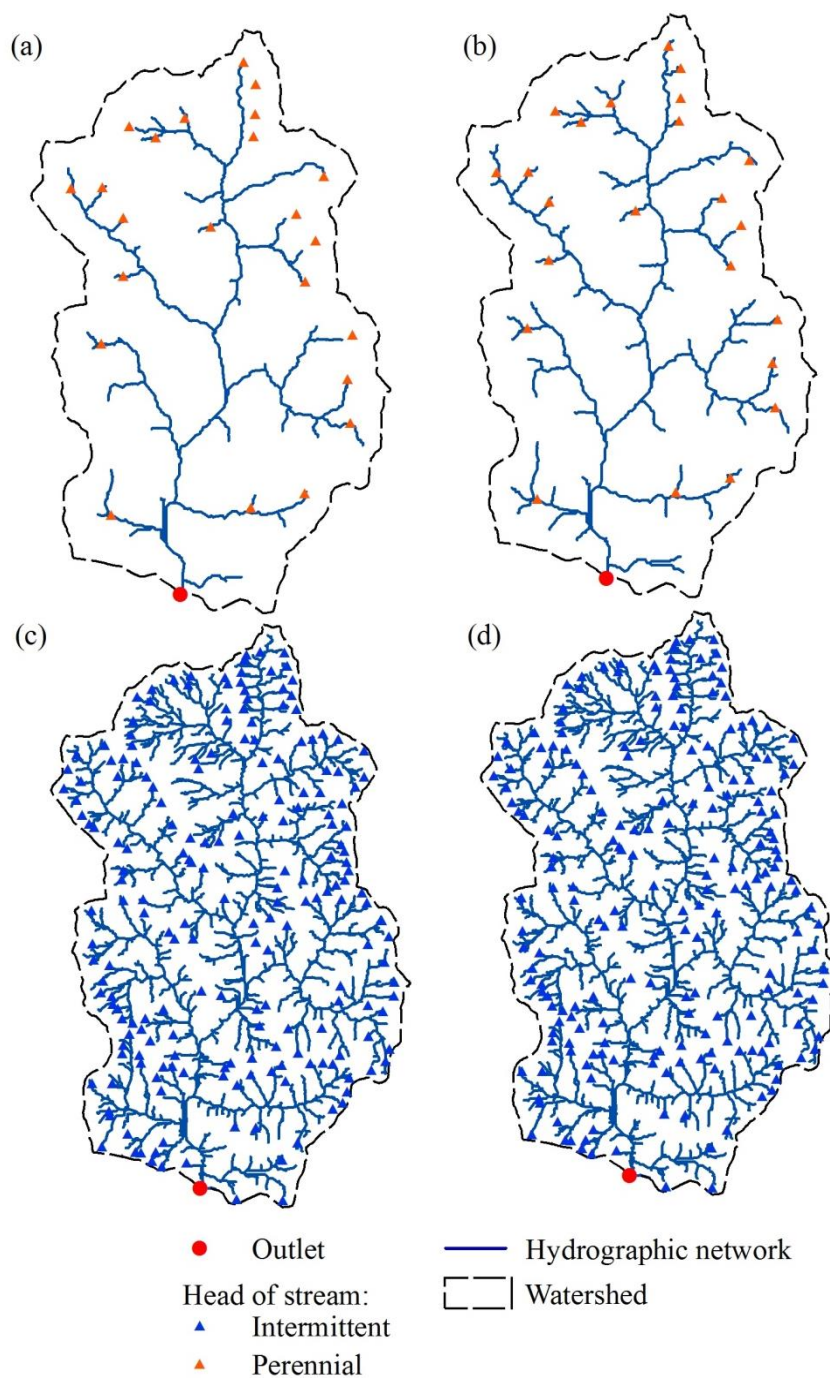
Παρά το γεγονός ότι ορισμένα από τα εξεταζόμενα μοντέλα είναι στατιστικά σημαντικά, πιστεύεται, όπως προκύπτει από την χαμηλή τιμή του R^2 , ότι η προγνωστική ικανότητα όλων των μοντέλων παλινδρόμησης είναι χαμηλή, γεγονός που οφείλεται σε μια σειρά πιθανών αιτιών: (i) σφάλματα στην ψηφιακή αναπαράσταση της τοπογραφίας της λεκάνης μέσω του SRTM DEM, (ii) σφάλματα στους συμβατικούς χάρτες και, συγκεκριμένα, στη θέση των κεφαλών των ρεμάτων, (iii) σφάλματα του αλγορίθμου στην εκτίμηση της κλίσης του εδάφους,

(iv) το γεγονός ότι άλλοι παράγοντες, εκτός από την τοπογραφία, όπως π.χ. τα εδάφη, παραλείπονται από τη διαδικασία ενώ, πιθανότατα, θα βοηθούσαν, και (v) σφάλματα του αλγορίθμου D8 στην εκτίμηση του εμβαδού της ανάντη υπολεκάνης. Γενικότερα, τα αποτελέσματα είναι καλύτερα για την ξηρή περίοδο, γεγονός που είναι αναμενόμενο λόγω της χαμηλότερης αβεβαιότητας στην εκτίμηση των στατιστικών μεγεθών των μεταβλητών της κλίσης του εδάφους και της τετραγωνικής ρίζας αυτής. Είναι γεγονός, ότι, για όλες τις λεκάνες, ο μέσος όρος της ΑΣΕ στην ξηρή περίοδο αντιστοιχεί σε 753 κελιά, ενώ, για την υγρή περίοδο, ο αριθμός αυτός είναι 234 κελιά. Προφανώς, αυτό συνεπάγεται χαμηλότερη αβεβαιότητα στην εκτίμηση των στατιστικών μεγεθών της κλίσης του εδάφους (και της τετραγωνικής ρίζας της κλίσης) για την ξηρή περίοδο.

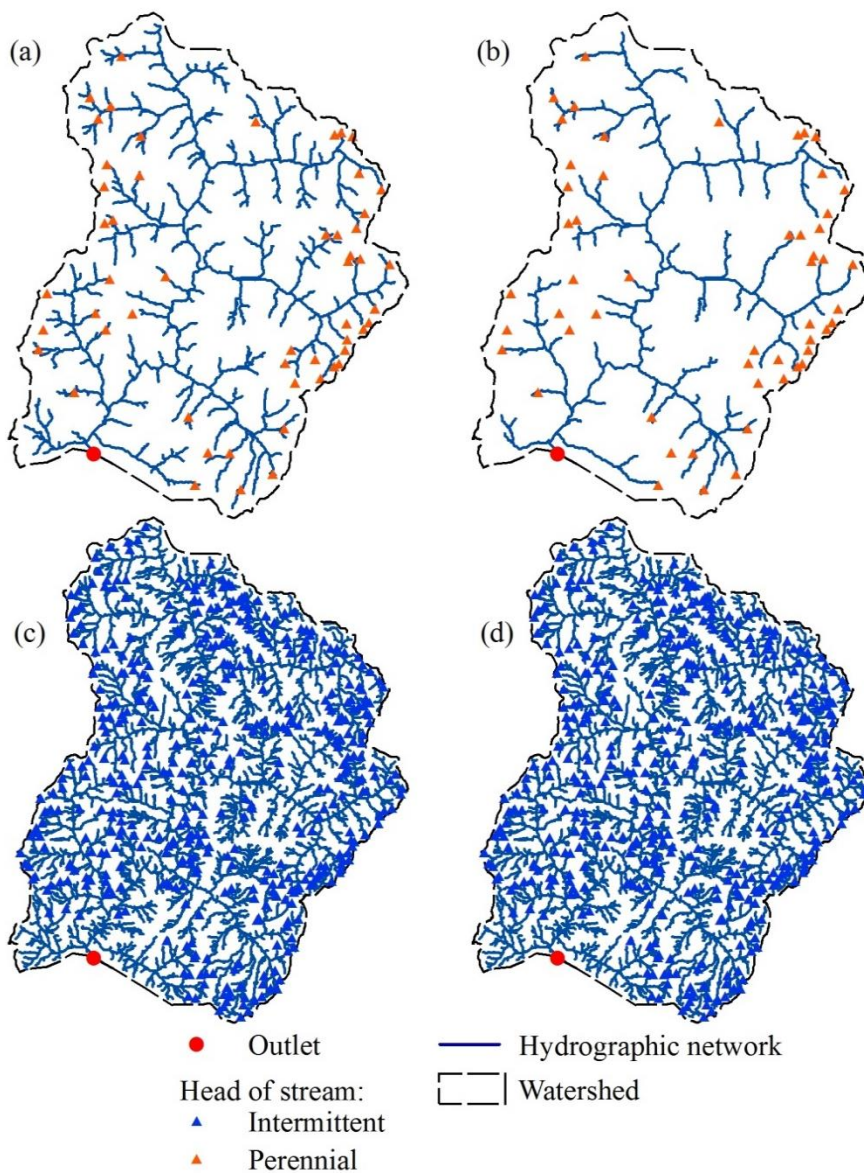
Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, θεωρήθηκε ότι η μόνη ορθολογική επιλογή για την ΑΣΕ της μη μετρούμενης λεκάνης είναι η επιλογή της διάμεσης τιμής, που προκύπτει για κάθε εποχή ξεχωριστά με βάση τα δεδομένα των υπολοίπων λεκανών, οι οποίες είναι υδρολογικά παρόμοιες με την εξεταζόμενη λεκάνη (βλ. μοντέλα παλινδρόμησης με πρόθεμα med στον Πίνακα 7-1). Οι διαφορές που προέκυψαν στη χωρική κατανομή του υδρογραφικού δικτύου που εξάγεται χρησιμοποιώντας αυτήν την τελευταία προσέγγιση για την ξηρή και την υγρή περίοδο φαίνονται στα σχήματα 7-4, 7-5 και 7-6 για τις λεκάνες a, b και c αντίστοιχα.

Για κάθε λεκάνη απορροής παρουσιάζονται τέσσερα υδρογραφικά δίκτυα λαμβάνοντας υπόψη δύο εποχές (υγρή και ξηρή) και δύο χωρικά αμετάβλητες ΑΣΕ, ανά εποχή: η διάμεση ΑΣΕ από τη εξεταζόμενη λεκάνη (περίπτωση μετρούμενης λεκάνης) και η διάμεση ΑΣΕ με βάση τα δεδομένα από τις άλλες δύο λεκάνες (περίπτωση μη μετρούμενης λεκάνης). Τα αποτελέσματα, επί των χαρτών, αποκαλύπτουν ότι η χρήση της διάμεσης ΑΣΕ, η οποία προκύπτει από υδρολογικά όμοιες λεκάνες και μεταφέρεται στην εξεταζόμενη λεκάνη, παρέχει με ακρίβεια, μια αξιόπιστη αναπαράσταση του υδρογραφικού δικτύου της εξεταζόμενης λεκάνης.

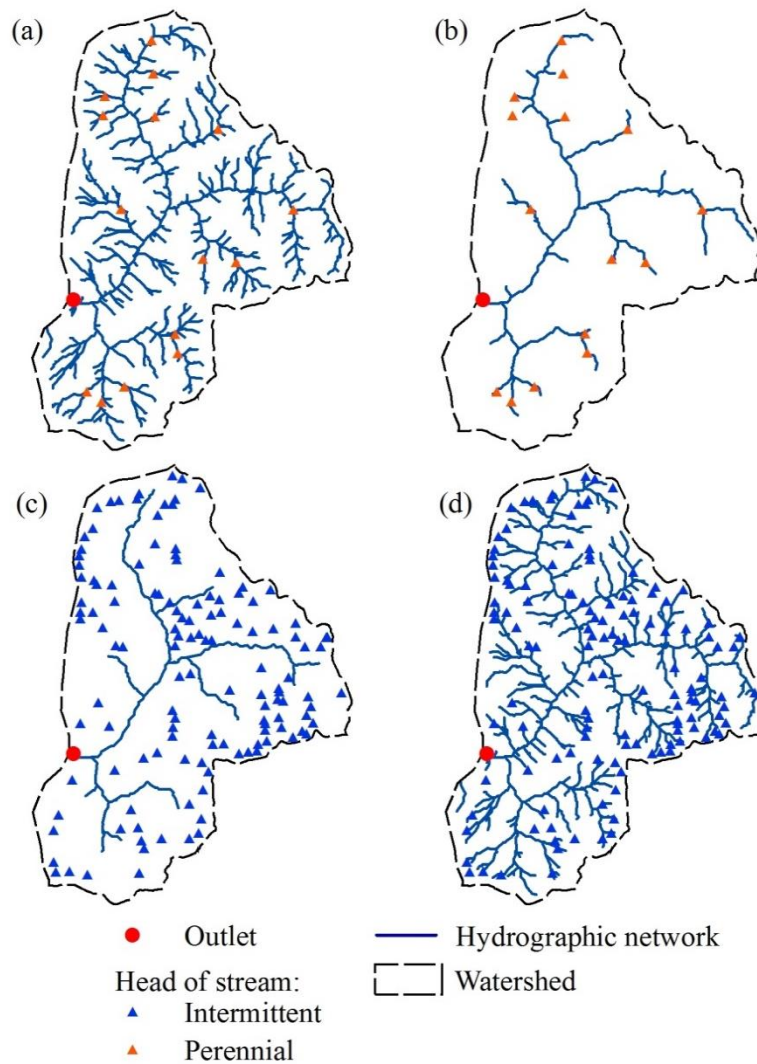
Όπως περιγράφεται στο πλαίσιο της προτεινόμενης μεθοδολογίας του Υποκεφαλαίου 5.3, το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης χρησιμοποιείται ως κριτήριο απόδοσης στα εξεταζόμενα μοντέλα παλινδρόμησης. Εφόσον, μέσω της διαδικασίας, τελικά επιλέχθηκε η διάμεσος ΑΣΕ, η οποία προέρχεται από την πληροφορία του τοπογραφικού χάρτη, ως η πιο αντιπροσωπευτική τιμή, για αυτήν την περίπτωση, το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου κάθε λεκάνης παρουσιάζεται στον Πίνακα 7-8. Και πάλι, αποκαλύπτεται ότι, η χρήση της διάμεσης τιμής ΑΣΕ από τις υπόλοιπες λεκάνες (με την ανάμειξη, δηλαδή, των συνόλων των δεδομένων), που είναι υδρολογικά όμοιες, με την εξεταζόμενη λεκάνη, είναι μια αρκετά ακριβής προσέγγιση της διάμεσης τιμής ΑΣΕ για όλες τις εξεταζόμενες λεκάνες και την υγρή περίοδο. Για την ξηρή περίοδο, εμφανίζονται μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ των δύο τιμών της διάμεσης τιμής ΑΣΕ, οι οποίες αναμένονται λόγω των μικρότερων μεγεθών δείγματος αυτής της περιόδου. Εάν, ωστόσο, ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι οι «συνεισφέρουσες» μετρούμενες λεκάνες στην μη μετρούμενη λεκάνη, στην συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι μόνο δύο, τα αποτελέσματα, γενικότερα, θα μπορούσαν να θεωρηθούν αποδεκτά και για την ξηρή περίοδο. Από την ερμηνεία των αριθμητικών αποτελεσμάτων, αποδεικνύεται ότι η ποσοστιαία απόκλιση του συνολικού μήκους του υδρογραφικού δικτύου, όταν χρησιμοποιούνται δεδομένα από άλλες λεκάνες, σε σχέση με την τιμή αυτού, όταν μελετάται η εξεταζόμενη λεκάνη ως μετρούμενη, είναι μικρότερη από 7% για την υγρή περίοδο, και μεγαλύτερη από 45% για την ξηρή περίοδο. Συγκρίνοντας τις απόλυτες τιμές του συνολικού μήκους του υδρογραφικού δικτύου οποιασδήποτε λεκάνης της υγρής και της ξηρής περιόδου, γίνεται προφανές ότι το να λαμβάνεται υπόψη η εποχιακή διακύμανση της ΑΣΕ είναι ζωτικής σημασίας. Το γεγονός αυτό αποτυπώνεται και στους χάρτες των σχημάτων 7-4, 7-5 και 7-6.



Σχήμα 7-4: Το υδρογραφικό δίκτυο και οι κεφαλές αυτού για την λεκάνη απορροής του π. Αγραφιώτη (basin a): (a) ξηρή περίοδος, μετρούμενη λεκάνη· (b) ξηρή περίοδος, μη μετρούμενη λεκάνη· (c) υγρή περίοδος, μετρούμενη λεκάνη· (d) υγρή περίοδος, μη μετρούμενη λεκάνη.



Σχήμα 7-5: Υδρογραφικό δίκτυο και κεφαλές υδατορευμάτων για τη λεκάνη απορροής του π. Ταυρωπού (basin b): (a) ξηρή περίοδος, μετρούμενη λεκάνη· (b) ξηρή περίοδος, μη μετρούμενη λεκάνη· (c) υγρή περίοδος, μετρούμενη λεκάνη· (d) υγρή περίοδος, μη μετρούμενη λεκάνη.



Σχήμα 7-6: Υδρογραφικό δίκτυο και κεφαλές υδατορευμάτων για την λεκάνη απορροής του π. Κρικελιώτη (basin c): (a) ξηρή περίοδος, μετρούμενη λεκάνη· (b) ξηρή περίοδος, μη μετρούμενη λεκάνη· (c) υγρή περίοδος, μετρούμενη λεκάνη· (d) υγρή περίοδος, μη μετρούμενη λεκάνη.

Πίνακας 7-8: Το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου (km) για κάθε εξεταζόμενη λεκάνη απορροής, όταν αυτή θεωρείται μετρούμενη (gauged) ή μη μετρούμενη (ungauged), για τις δύο περιόδους του έτους.

Λεκάνη απορροής	Εποχή του έτους:			
	Υγρή		Ξηρή	
	Μετρούμενη	Μη μετρούμενη	Μετρούμενη	Μη μετρούμενη
a	434.3	459.7	109.6	138.9
b	1213.1	1219.7	443.0	269.9
c	181.1	169.9	34.0	48.7

Είναι γνωστό ότι σε πολλά επί μέρους επιστημονικά πεδία σχετιζόμενα με τους υδατικούς πόρους (π.χ υδρολογία, γεωμορφολογία και χημεία), η επίδραση της εποχικότητας του

υδρογραφικού δικτύου είναι ιδιαίτερα σημαντική (Arheimer et al., 1996· Ågren et al., 2007· Björkvald et al., 2008). Τα αποτελέσματα της παρούσας εφαρμογής επιτρέπουν να εξαχθούν συμπεράσματα ως προς τη σχέση μεταξύ της χωρικής κατανομής της ΑΣΕ και των χρησιμοποιούμενων γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών. Προτείνεται, για εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής, η χρήση της διάμεσης τιμής της ΑΣΕ, όπως η τελευταία εκτιμάται από πληροφορία που αντλείται από τους τοπογραφικούς χάρτες για δύο εποχές του υδρολογικού έτους, την υγρή και την ξηρή. Η θεώρηση της χρονικής διακύμανσης της ΑΣΕ έχει προταθεί για πρώτη φορά από τους Papageorgaki and Nalbantis (2017).

Η παρούσα μελέτη επέτρεψε την εξαγωγή των παρακάτω συμπερασμάτων: (i) επιβεβαίωσε τη σημασία της θεώρησης της χρονικής διακύμανσης της ΑΣΕ, (ii) απέδειξε ότι τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά, από μόνα τους, δεν επαρκούν για να εξηγήσουν τη χωρική διακύμανση της ΑΣΕ, η οποία εκτιμάται από πληροφορία που αντλείται από τοπογραφικούς χάρτες και (iii) έδειξε ότι η μεταφορά πληροφοριών για τις κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου από μετρούμενες λεκάνες, που είναι υδρολογικά όμοιες με την εξεταζόμενη λεκάνη, μπορεί να αποτελέσει μια εκτίμηση της ΑΣΕ με μεγάλη ακρίβεια.

7.7 Σύνοψη

Είναι γνωστό στην επιστήμη της Υδρολογίας, ότι σε όλες τις λεκάνες απορροής υπάρχουν μεταβολές στο χρόνο όλων των χαρακτηριστικών τους, π.χ., στη χλωρίδα με εποχιακή και με υπερετήσια διακύμανση, στα εδάφη λόγω της διάβρωσης και των προσχώσεων. Πιο αργός είναι ο ρυθμός των μεταβολών των γεωλογικών σχηματισμών του υποβάθρου, με αποτέλεσμα αυτοί να μπορούν να θεωρηθούν σταθεροί για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Λόγω ακριβώς των παραπάνω μεταβολών, τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, επίσης, υφίστανται μεταβολές.

Γενικότερος σκοπός της διατριβής είναι η συσχέτιση των μορφομετρικών χαρακτηριστικών με υδρολογικές υπογραφές, μέσω των οποίων απεικονίζεται μια μέση υδρολογικά συμπεριφορά της εξεταζόμενης λεκάνης. Επειδή η μελέτη των λεκανών απορροής αφορά στη χρονική κλίμακα μερικών δεκάδων ετών, η ζητούμενη σχέση μεταξύ των μορφομετρικών χαρακτηριστικών και υδρολογικών υπογραφών μπορεί να θεωρείται μη μεταβαλλόμενη. Η σχέση αυτή συμβάλλει στην ταξινόμηση των λεκανών απορροής όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 6.

Επειδή στις λεκάνες απορροής υπάρχουν, συχνά, ανθρωπογενείς επεμβάσεις οι οποίες τροποποιούν ορισμένες φυσικές διεργασίες απότομα (στο χώρο και τον χρόνο) και εισάγουν θόρυβο ή επισκιάζουν πλήρως την ζητούμενη σχέση, στο πλαίσιο της διατριβής, γίνεται προσπάθεια να επιλέγονται λεκάνες απορροής χωρίς ανθρωπογενή παρέμβαση. Επίσης, για παρόμοιο λόγο, δεν επιλέγονται να μελετηθούν οι κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου που εντοπίζονται κοντά σε πηγές, οι οποίες αποδίδονται στους τοπογραφικούς χάρτες. Η ύπαρξη πηγών, σε αυτή την περίπτωση, θεωρείται ως συνθήκη η οποία διαταράσσει την ισορροπία του επιφανειακού νερού μιας λεκάνης απορροής.

Σε αυτή την εφαρμογή, διερευνάται η διακύμανση, τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο, του κατωφλίου της έκτασης της ανάντη λεκάνης που συμβάλλει στην δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου. Η έκταση της ανάντη λεκάνης ορίζεται ως Ανάντη Συμβάλλουσα Έκταση (ΑΣΕ, ή Critical Support Area, CSA). Η μελέτη της διακύμανσης της ΑΣΕ έχει στόχο να βοηθήσει τη διαδικασία με την οποία γίνεται η επιλογή του κατωφλίου έκτασης για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μεθοδολογικού

πλαίσιου το οποίο προτείνεται, επιτρέπουν την εξαγωγή των συμπερασμάτων που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

- Οι συμβατικοί τοπογραφικοί χάρτες βασικής χωρικής κλίμακας, π.χ. 1:50000, είναι κατάλληλοι και χρήσιμοι για εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τις κεφαλές των υδατορευμάτων πρώτης τάξης και, κατά συνέπεια, και για την εκτίμηση της ΑΣΕ. Μόνη προϋπόθεση είναι οι χάρτες να περιέχουν πληροφορίες τόσο για τα πολυετή όσο και για τα εφήμερα ρεύματα μιας λεκάνης απορροής.
- Επίσης, αναζητήθηκαν σχέσεις μεταξύ της ΑΣΕ, η οποία εκτιμάται από τοπογραφικό χάρτη, και ορισμένων τυπικών μορφομετρικών χαρακτηριστικών, όπως τα στατιστικά μεγέθη της κλίσης του εδάφους, της τετραγωνικής ρίζας της κλίσης αυτής, και του δείκτη HAND, χρησιμοποιώντας μοντέλα παλινδρόμησης. Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο των μοντέλων παλινδρόμησης έδειξαν ότι όλες οι σχέσεις βρέθηκαν να είναι χαμηλής ακρίβειας. Ωστόσο, παρά τη χαμηλή επίδοση όλων των μοντέλων πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, η βηματική παλινδρόμηση αποδείχθηκε ότι αποδίδει καλύτερα από την κλασική πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση.
- Επιπλέον, κατά τον έλεγχο των μοντέλων παλινδρόμησης, έγιναν δοκιμές για τον εντοπισμό των ακραίων τιμών της ΑΣΕ, με στόχο την απομάκρυνσή τους και την πιθανή βελτίωση της προγνωστικής ικανότητας των μοντέλων. Οι εν λόγω δοκιμές απέτυχαν να παρέχουν βελτιωμένα μοντέλα παλινδρόμησης. Κατά συνέπεια, προτείνεται η επιλογή του απλούστερου προγνωστικού παράγοντα της ΑΣΕ, που είναι η διάμεσος των τιμών που εκτιμήθηκαν από τοπογραφικό χάρτη, λαμβάνοντας υπόψη δύο διακριτές εποχές του υδρολογικού έτους, την υγρή και την ξηρή, και αγνοώντας τη χωρική διακύμανση της ΑΣΕ εντός της λεκάνης απορροής που μελετάται.
- Σε περίπτωση απουσίας πληροφοριών για τις κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου από τοπογραφικό χάρτη για την υπό μελέτη λεκάνη απορροής, μια καλή επιλογή για της ΑΣΕ είναι η διάμεσος των τιμών της ΑΣΕ από άλλες λεκάνες που είναι υδρολογικά όμοιες με την υπό μελέτη λεκάνη. Προφανώς, γίνεται κατανοητό ότι η ταξινόμηση της λεκάνης απορροής, που μελετάται, είναι απαραίτητη προϋπόθεση για αυτή την εφαρμογή της προτεινόμενης διαδικασίας. Όσον αφορά τη χρονική διακύμανση της ΑΣΕ, αποδεικνύεται ότι είναι σημαντικό να γίνεται διάκριση μεταξύ της υγρής και της ξηρής περιόδου του υδρολογικού έτους κατά την επιλογή της ΑΣΕ. Στο πλαίσιο της εφαρμογής, η μελέτη των κεφαλών των εφήμερων και των πολυετών κλάδων του υδρογραφικού δικτύου επέτρεψε μια έστω χονδρική διάκριση μεταξύ των τιμών της ΑΣΕ για την υγρή και την ξηρή περίοδο. Επίσης, διαπιστώνεται, από τα αποτελέσματα, ότι η συνδυασμένη χρήση πληροφοριών, που προέρχονται από τους τοπογραφικούς χάρτες και το ΨΜΕ, είναι ανεπαρκής για τον ακριβή προσδιορισμό της χωρικής διακύμανσης της ΑΣΕ. Πιθανές αιτίες που συμβάλλουν στο αποτέλεσμα αυτό, μπορεί να είναι σφάλματα στο ΨΜΕ και στους συμβατικούς χάρτες, σφάλματα του αλγορίθμου για την εκτίμηση της ανάντη έκτασης, σφάλματα του αλγορίθμου εκτίμησης της κλίσης του εδάφους και η έλλειψη άλλων παραγόντων πέραν της τοπογραφίας, όπως π.χ. των εδαφών, στον έλεγχο των σχέσεων της ΑΣΕ. Κατά συνέπεια, από τα παραπάνω, προκύπτει ένα ανοιχτό και πολλά υποσχόμενο πεδίο έρευνας, το οποίο θα αντιμετωπίσει τις παραπάνω αιτίες σφαλμάτων.

8 Κατάρτιση Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος με βάση πληροφορία από Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους

8.1 Αδιαμέτρηστη προσομοίωση διεργασιών μεταφοράς σε λεκάνες απορροής, με βάση το Γεωμορφολογικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα

Υιοθετείται το Γεωμορφολογικό Στιγμαίο Μοναδιαίο Υδρογραφήματος υπό την μορφή της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους (Rescaled Width Function, ή RWF), η οποία λαμβάνει υπόψη την ετερογένεια τόσο του γήινου αναγλύφου όσο και της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου (Υποκεφάλαιο 5.7). Προτείνεται, στο πλαίσιο της εν λόγω θεωρίας, η προσέγγιση της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους (Rescaled Width Function, RWF) (Rinaldo et al., 1995) σε δύο εκδοχές: (1) την κλασική εκδοχή (cRWF), και (2) την τροποποιημένη από τους Di Lazzaro et al. (2015) εκδοχή, γνωστή ως Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους, σταθμισμένη μέσω της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου (drainage density ή dd), ή ddRWF.

Τα Μοναδιαία Υδρογραφήματα που προκύπτουν από την κάθε μια εκδοχή της μεθόδου, συγκρίνονται με ένα κλασικό Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα. Ως αντιπροσωπευτικό Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα επιλέχθηκε το τριγωνικό με εκτίμηση του χρόνου ανόδου, όπως προτάθηκε από το Βρετανικό Ινστιτούτο Υδρολογίας (Sutcliffe, 1978). Σημειώνεται ότι, πέραν της δημοσίευσης των Di Lazzaro et al. (2015) δεν έχει εντοπιστεί άλλη εφαρμογή της μεθόδου ddRWF σε νέες λεκάνες και, κυρίως, δεν υπάρχει καμία εφαρμογή προσανατολισμένη προς τον υδρολογικό σχεδιασμό υδραυλικών έργων. Χάρτες του μεγέθους της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου (drainage density) αναδεικνύουν την ετερογένεια του αναγλύφου ως προς την παραγωγή απορροής. Η πληροφορία αυτή θεωρείται επιθυμητή και προτείνεται να αξιοποιείται στην εκτίμηση της παροχής σχεδιασμού υδραυλικών έργων. Εξ άλλου, είναι γνωστό ότι ο σχεδιασμός πολλών υδραυλικών έργων συνήθως βασίζεται στην κατάρτιση Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (ΣΜΥ).

Στην παρούσα εφαρμογή, η μέθοδος RWF τροποποιείται με αξιοποίηση ερευνητικών αποτελεσμάτων, κυρίως σχετικών με την Ανάντη Συμβάλλουσα Έκταση (ΑΣΕ) για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους. Η ΑΣΕ λαμβάνεται με βάση κλασικούς τοπογραφικούς χάρτες κλίμακας 1:50000. Ενδεικτικά, αξίζει να αναφερθεί ότι είναι απαραίτητο να μελετηθούν οι κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου, σε δύο τυπικές υδρολογικές συνθήκες που εξετάζονται οι κεφαλές για τις 2 εποχές του έτους ξεχωριστά, και επομένως υπολογίζεται η ΑΣΕ για την υγρή περίοδο και η ΑΣΕ για την ξηρή περίοδο του έτους. Κατά τον υπολογισμό των μηκών, το ΨΜΕ, που χρησιμοποιείται είναι υδρολογικά ορθό, και όλα τα μήκη ελέγχονται ως προς τη συνέχειά τους, ώστε να υπολογίζονται μέχρι το στόμιο της εξόδου της λεκάνης απορροής.

Τα μήκη, όπως αυτά προκύπτουν με την εφαρμογή της ΑΣΕ συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μήκη από την εφαρμογή της προσέγγισης των Tucker et al. (2001), η οποία περιλαμβάνει συνδυαστική χρήση κριτηρίων, όπως η συνολική ανάντη έκταση και η τοπική κλίση, για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από ΨΜΕ (εδάφιο 4.2.2). Στατιστικά χαρακτηριστικά για τα μήκη ροής των λεκανών απορροής, για τις δύο μεθόδους εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου: την προτεινόμενη μέθοδο με την εφαρμογή της ΑΣΕ (M1) και την μέθοδο κατά Tucker (M2) παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε έξι λεκάνες απορροής του ελληνικού χώρου. Σημειώνεται ότι για μία από τις 6 λεκάνες είναι διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης και απορροής, και αξιοποιείται το ήδη διαθέσιμο Μοναδιαίο Υδρογράφημα από τα δεδομένα αυτά, ενώ οι υπόλοιπες λεκάνες απορροής μελετώνται ως μη μετρούμενες. Τα αποτελέσματα αυτών συγκρίνονται μεταξύ τους, σε ό,τι αφορά τόσο στις διαφορές μεταξύ μεθόδων, όσο και στη διακύμανση των διαφορών αυτών από τη μια λεκάνη απορροής στην άλλη. Έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων μέσω όσων παρατηρήθηκαν κατά τη χρήση ενός τυπικού ΣΜΥ, ενώ για την λεκάνη του π. Ευήνου είναι δυνατή η σύγκριση με το Μοναδιαίο Υδρογράφημα από ιστορικά δεδομένα.

Στη συνήθη περίπτωση, ο σχεδιασμός μιας μεγάλης ποικιλίας έργων βασίζεται στα υδρογραφήματα σχεδιασμού που προκύπτουν από μορφομετρικά και άλλα δεδομένα της εξεταζόμενης κάθε φορά λεκάνης απορροής. Συνήθως, η κατάρτιση των υδρογραφήματων αυτών απαιτεί μια σχέση μεταξύ της μέγιστης ετήσιας έντασης βροχόπτωσης, της περιόδου επαναφοράς και της διάρκειας, των χρήσεων γης και της εδαφοκάλυψης της λεκάνης, και του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος αυτής.

Στον ελλαδικό χώρο, είναι συχνό το φαινόμενο της έλλειψης μετρήσεων απορροής σε πληθώρα λεκανών, παρά το γεγονός ότι πρόκειται να εκπονηθούν μελέτες υδραυλικών έργων στις λεκάνες αυτές. Με τον όρο «έλλειψη μετρήσεων απορροής» νοείται είτε ότι δεν υπάρχει ικανού μήκους χρονοσειρά μετρήσεων, κατάλληλη ώστε να επιτρέπει την άμεση εκτίμηση της απορροής, όπως θα ήταν επιθυμητό, είτε ότι λείπουν παντελώς οι μετρημένες παροχές στην λεκάνη απορροής. Υπό τις συνθήκες αυτές, ο σχεδιασμός των έργων, βασίζεται, αναγκαστικά, σε μορφομετρικά χαρακτηριστικά και άλλα στοιχεία της εξεταζόμενης λεκάνης. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην συνηθέστερη σύγχρονη αντιμετώπιση της έλλειψης μετρήσεων, και είναι αυτή μέσω της κατάρτισης του ΣΜΥ (Chow et al., 1988). Για την κατάρτιση του υδρογραφήματος σχεδιασμού με έμμεσο τρόπο, οι Ναλμπάντης και Παπαγεωργάκη (2015) είχαν εκτιμήσει το Γεωμορφολογικό Στιγμαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα (Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph, GIUH) (Rodriguez-Iturbe and Valdez, 1979· Rinaldo and Rodriguez-Iturbe, 1996) σε πέντε λεκάνες απορροής του ελληνικού χώρου, με βάση το διαθέσιμο, τότε (2015), Παγκόσμιο SRTM DEM και με χρήση της μεθόδου της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους.

Η θεωρία του Γεωμορφολογικού Στιγμαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος, αν και αποτελεί μια σύγχρονη απάντηση στο πρόβλημα της σύνθεσης του ΜΥ, δεν έχει μέχρι σήμερα συμβάλει ουσιαστικά στον υδρολογικό σχεδιασμό. Για το λόγο αυτό, επιλέγεται μια μεταβλητή που σχετίζεται και εκτιμά ποσοτικά τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά μιας λεκάνης, ως ενδιάμεση παράμετρος για την αντιμετώπιση του προβλήματος της έλλειψης.

Η μεταβλητή που σχετίζεται με τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου, είναι η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, η οποία είναι χρήσιμη στις υδρολογικές αναλύσεις. Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου (dd) ορίζεται, από τον Horton (1945) ως ο λόγος του συνολικού μήκους του υδρογραφικού δικτύου προς την

επιφάνεια της λεκάνης, ενώ, αργότερα, δόθηκε ένας διαφορετικός ορισμός, σύμφωνα με τον οποίο η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου ορίζεται ως το αντίστροφο της διπλάσιας απόστασης που χρειάζεται να διανύσει μια σταγόνα νερού μέχρι να φτάσει στον κοντινότερο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου.

Ως συνέπεια των παραπάνω, η ποσοτικοποίηση της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου, σύμφωνα με το δεύτερο ορισμό, μπορεί να γίνει με βάση ένα ΨΜΕ υπό τη μορφή κανονικοποιημένου κανάβου, χωρικά κατανεμημένου για το σύνολο της λεκάνης απορροής. Η χωρική κατανομή της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου αναδεικνύει την ετερογένεια του αναγλύφου ως προς την παραγωγή απορροής. Η πληροφορία αυτή μελετάται, ως προς την αξιοποίησή της στην εκτίμηση της παροχής σχεδιασμού των υδραυλικών έργων.

Να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου, γίνεται αποκλειστικά με χρήση ενός ΨΜΕ και, επομένως, πιστεύεται ότι, με δεδομένη τη διαθεσιμότητα των ΨΜΕ παγκοσμίως, η προσέγγιση του Γεωμορφολογικού Στιγμιαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος έχει τη δυνατότητα να συμβάλει στη σύνθεση αξιόπιστων Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων.

Μετά την επιλογή των 6 λεκανών απορροής, σε αυτές εφαρμόζεται η μέθοδος της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους σε δύο εκδοχές: στην κλασική εκδοχή, και στην τροποποιημένη από τους Di Lazzaro et al. (2015) εκδοχή, η οποία λαμβάνει υπόψη την πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου.

Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζονται οι εξής μέθοδοι: (1) η κλασική Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους (cRWF), όπως αυτή περιγράφεται στο εδάφιο 5.7.3, (2) η σταθμισμένη, μέσω της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους, γνωστή ως ddRWF, η οποία περιγράφεται στο εδάφιο 5.7.4, και (3) το τριγωνικό Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα μιας ώρας με υπολογισμό του χρόνου ανόδου με βάση τη σχέση του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (όπως αυτό περιγράφεται στο εδάφιο 5.7.2). Η σύγκριση των υδρογραφημάτων, που προκύπτουν από τις 3 παραπάνω μεθοδολογίες γίνεται για χρονική διάρκεια μιας ώρας.

Κατόπιν των παραπάνω και των επιστημονικών εξελίξεων της τελευταίας πενταετίας, στο πλαίσιο της διατριβής εξετάστηκαν τα παρακάτω ζητήματα, σε συνέχεια της προηγούμενης αρχικής (2015) προσέγγισης.

Η μέθοδος RWF τροποποιείται το 2022 με αξιοποίηση των ερευνητικών αποτελεσμάτων, που είναι κυρίως σχετικά με την Ανάντη Συμβάλλουσα Έκταση (ΑΣΕ) για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από ΨΜΕ. Εφαρμόστηκε η προταθείσα από τους Parageorgaki and Nalbantis (2018) μέθοδος εκτίμησης της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης (ΑΣΕ) για την κατάρτιση του υδρογραφικού δικτύου, καθόσον το υδρογραφικό δίκτυο επηρεάζει τα αποτελέσματα της μεθόδου RWF. Η ΑΣΕ λαμβάνεται με βάση χάρτες κλίμακας 1:50000 που καλύπτουν τις λεκάνες απορροής. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται, όπως ειπώθηκε, σε έξι λεκάνες απορροής του ελλαδικού χώρου και συγκρίνεται με την μέθοδο κατά Tucker (εδάφιο 4.2.2), ενώ σε μία από αυτές αξιοποιείται το ήδη διαθέσιμο Μοναδιαίο Υδρογράφημα από δεδομένα βροχόπτωσης και απορροής.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτείνουν οι Tucker et al. (2001), η εφαρμογή πολλαπλών κριτηρίων, μέσα από τις τιμές των αντίστοιχων κατωφλίων, φαίνεται να λειτουργεί καλύτερα από την εφαρμογή ενός μεμονωμένου κριτηρίου, για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου. Η διαπίστωση, ότι η εφαρμογή πολλαπλών κριτηρίων λειτουργεί καλύτερα, έγινε με σύγκριση των κεφαλών του υδρογραφικού δικτύου που προέκυψαν μετά την εφαρμογή των πολλαπλών

κριτηρίων, με τις κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου όπως αυτές απεικονίζονται σε τοπογραφικούς χάρτες. Η προσέγγισή τους περιλαμβάνει συνδυαστική χρήση κριτηρίων, όπως η συνολική ανάντη έκταση και η τοπική κλίση.

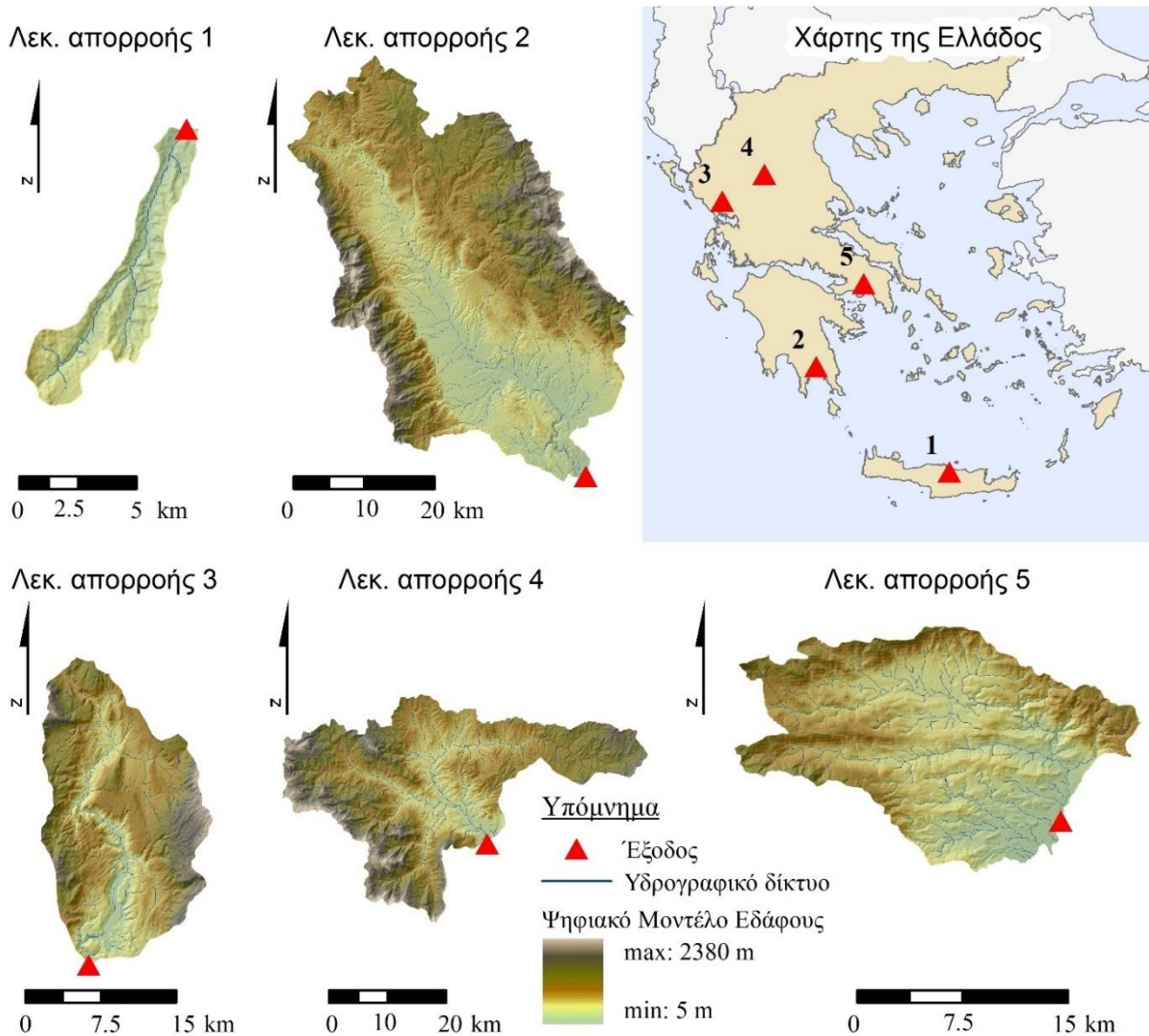
Επίσης, επιλέχθηκε το νεότερο και βελτιωμένο Παγκόσμιο ΨΜΕ Copernicus DEM (Fahrland, 2020) αντί του παλαιότερου SRTM DEM, και καταβλήθηκε προσπάθεια επανεκτίμησης των παραμέτρων της μεθόδου RWF με βάση πληροφορία για το Μοναδιαίο Υδρογράφημα από παρατηρήσεις βροχόπτωσης και απορροής. Επιλέχθηκε η χρήση μόνον της τροποποιημένης από τους Di Lazzaro et al. (2015) εκδοχής της μεθόδου. Η βελτιωμένη πλέον με βάση τα παραπάνω, μέθοδος της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους με θεώρηση και της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου εφαρμόστηκε στις έξι προαναφερθείσες λεκάνες απορροής του ελληνικού χώρου και τα αποτελέσματα αυτών συγκρίνονται με εκείνα της μεθόδου του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας.

8.2 Περιοχή μελέτης

Για τις ανάγκες της παρούσας εφαρμογής επιλέχθηκαν έξι λεκάνες απορροής σε διάφορες περιοχές του ελλαδικού χώρου, με στόχο, τουλάχιστον σε ορισμένες λεκάνες, να εμφανίζεται χωρική ετερογένεια στην πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, ετερογένεια της οποίας η επίδραση είναι επιθυμητό να αποτιμηθεί μέσω της μεθόδου ddRWF. Οι επιλεγείσες λεκάνες είναι (1) η λεκάνη απορροής b01 του π. Ευήνου με θέση στομίου εξόδου στον Πόρο Ρηγανίου, (2) η λεκάνη απορροής b02 του π. Πηνειού, στη Θεσσαλία, με θέση στομίου εξόδου τη Σαρακίνα, (3) η λεκάνη απορροής b03 του Γεροπόταμου, στην Κρήτη, με θέση στομίου εξόδου στη Γέφυρα Γεροποτάμου, (4) η λεκάνη απορροής b04 του π. Ευρώτα, στην Πελοπόννησο, με στόμιο εξόδου στη θέση Σελλασία, (5) η λεκάνη απορροής b05 του π. Λούρου, στην Αιτωλοακαρνανία, με θέση στομίου εξόδου στο φράγμα Λούρου, και τελευταία, (6) η λεκάνη απορροής b06 του Σαρανταπόταμου, στην Αττική, με θέση στομίου εξόδου την έξοδο της ορεινής λεκάνης (πριν την αστική περιοχή). Ορισμένα τυπικά μορφομετρικά χαρακτηριστικά των λεκανών, όπως, το εμβαδόν των λεκανών απορροής και το μέσο υψόμετρο, φαίνονται στον Πίνακα 8-1. Να σημειωθεί ότι όλες οι λεκάνες απορροής, εκτός από την λεκάνη του π. Ευήνου, είχαν χρησιμοποιηθεί παλαιότερα από τους Ναλμπάντη και Παπαγεωργάκη (2015), ενώ το 2022 προστέθηκε η λεκάνη απορροής του π. Ευήνου (Σχήμα 8-2).

Για τον υπολογισμό της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου, χρησιμοποιήθηκε το 2015 το SRTM DEM, ενώ, στη συνέχεια της μελέτης που ακολούθησε το 2022, χρησιμοποιήθηκε το Ευρωπαϊκό ΨΜΕ Copernicus, EU-DEM (version 1.1), με χωρική ανάλυση 25 m. Στο Σχήμα 8-1, παρουσιάζονται οι 5 λεκάνες απορροής (μελέτη 2015) και η χωρική κατανομή των υψομέτρων του εδάφους, σύμφωνα με το SRTM DEM. Τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά, που χρειάζονται για την κατάρτιση του ΣΜΥ, έχουν υπολογιστεί από το SRTM DEM. Το διαθέσιμο τότε (2015) Παγκόσμιο SRTM DEM (Carabajal and Harding, 2006) έχει μέγεθος εδαφοψηφίδας 30 m και έχει χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα υδρολογικών και άλλων εργασιών εκείνη την περίοδο, ως το τότε καινοτόμο και παγκόσμια διαθέσιμο, ενώ τα τελικά αποτελέσματα λήφθηκαν χρησιμοποιώντας ένα βελτιωμένο Παγκόσμιο DEM γνωστό ως Copernicus DEM (Fahrland, 2020).

Να σημειωθεί ότι, η χρωματική παλέτα που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση των υψομέτρων στο Σχήμα 8-1, είναι ενιαία, με αποτέλεσμα τα πεδινά των λεκανών να χρωματίζονται με το ίδιο χρώμα σε όλες τις λεκάνες.



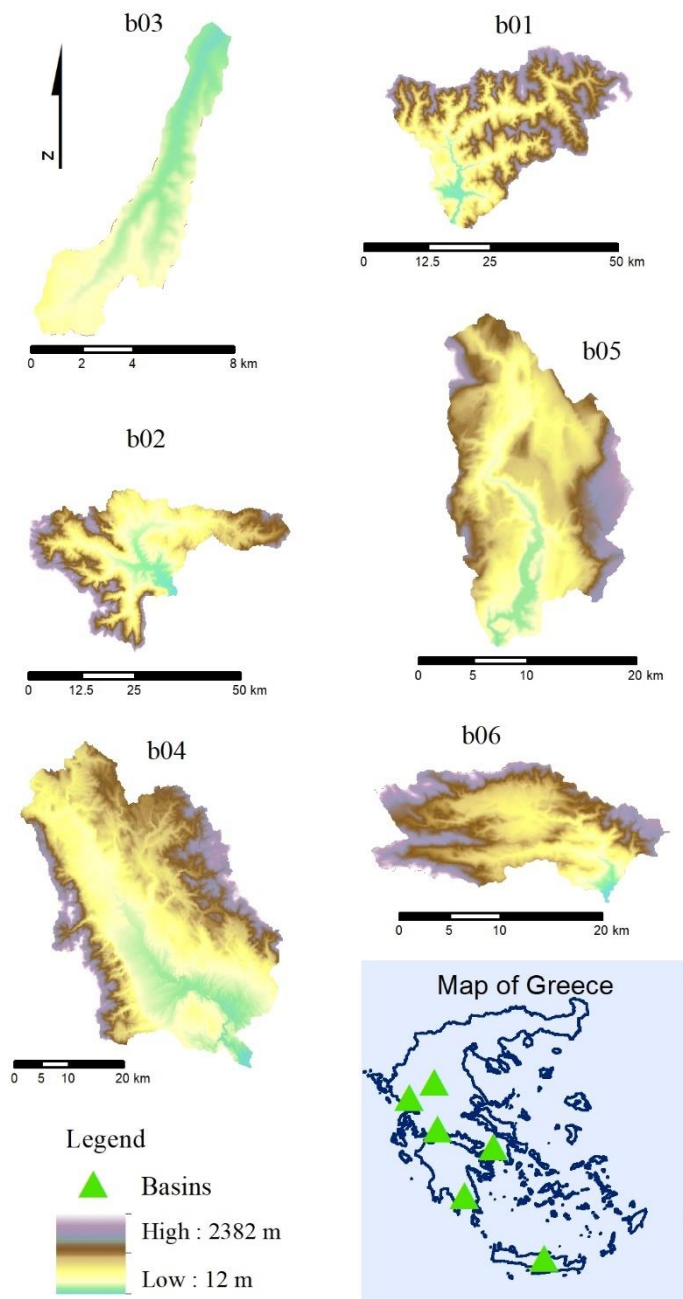
Σχήμα 8-1: οι λεκάνες απορροής, που αποτελούν την περιοχή μελέτης.

Πίνακας 8-1: Τυπικά μορφομετρικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής μελέτης.

α/α	Θέση	Ποταμός	Εμβαδόν λεκάνης (km ²)	Μέσο υψόμετρο λεκάνης (m)
1	Γέφυρα	Γεροπόταμος (b03)	26.55	266
2	Σελλασία	Ευρώτας (b04)	1682.13	1156
3	Φράγμα	Λούρος (b05)	358.63	984
4	Σαρακίνα	Πηνειός (b02)	1076.14	1160
5	Έξοδος ορεινής λεκάνης	Σαρανταπόταμος (b06)	300.38	598
6	Πόρος Ρηγανίου	Εύηνος (b01)	883	979.6

Για να γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί, για την εκτίμηση της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcGIS, ένα λογισμικό που εφαρμόζει τη θεωρία που περιγράφεται από τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographical Information Systems, GIS) και δίνει τη δυνατότητα χωρικής επεξεργασίας δεδομένων, υπολογισμών στο χώρο και παρουσίασης των αποτελεσμάτων υπό μορφή χαρτών. Μαθηματικοί υπολογισμοί που δεν μπορούσαν να υπολογιστούν εντός του λογισμικού ArcGIS μοντελοποιήθηκαν εντός του

προγράμματος MatLab, με τη βοήθεια συναρτήσεων που δημιουργήθηκαν για να καλύπτουν τις ανάγκες των υπολογισμών της διατριβής.

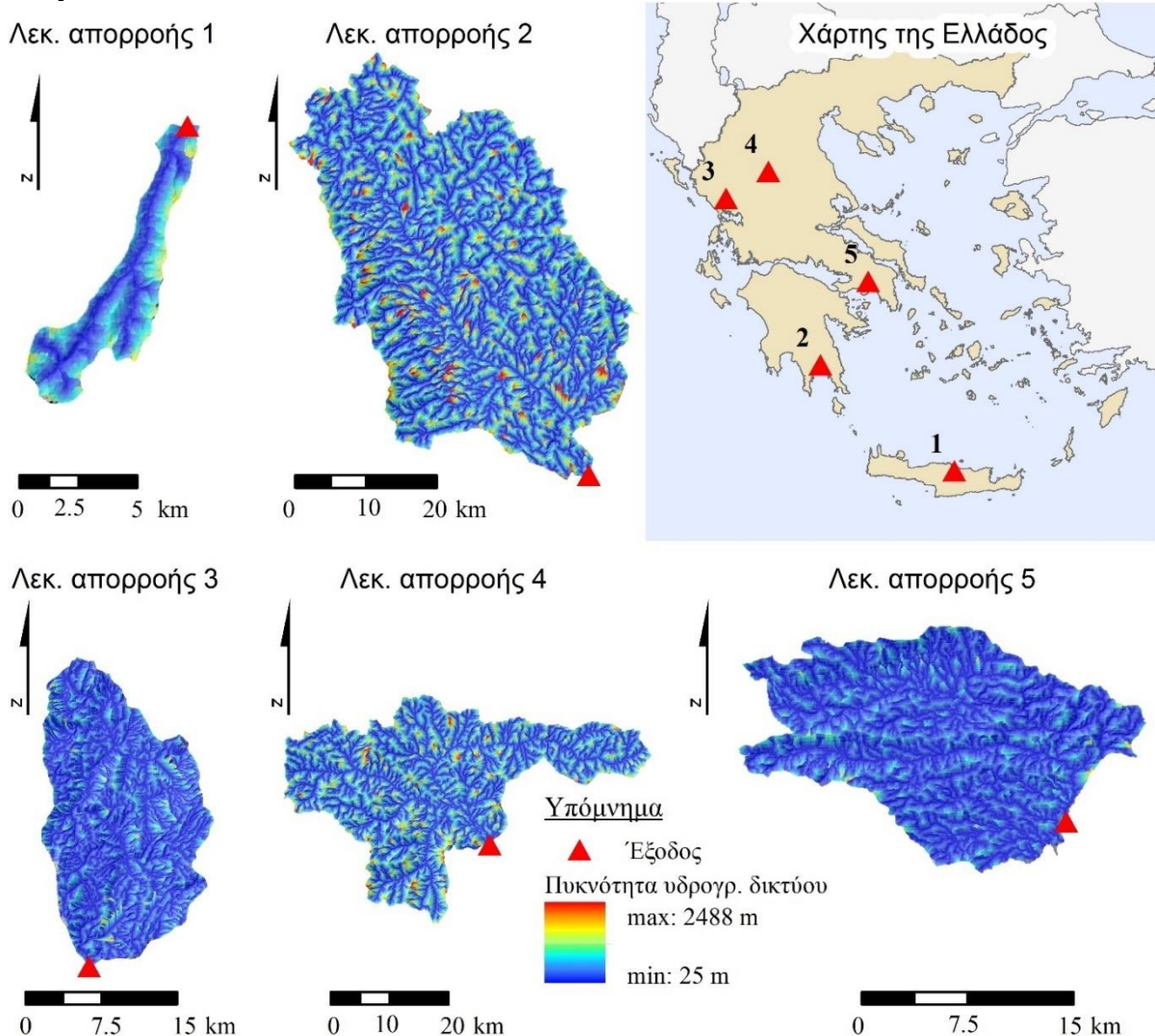


Σχήμα 8-2: Η κατανομή των υψομέτρων εδάφους για τις λεκάνες απορροής: (b01) Ευήνου· (b02) Πηνειού· (b03) Γεροποτάμου· (b04) Ευρώτα· (b05) Λούρου· (b06) Σαρανταποτάμου.

8.3 Αποτελέσματα

Ως προς τα αποτελέσματα, που προέκυψαν το 2015, αυτά παρουσιάζονται και αναλύονται παρακάτω. Για να καταστεί δυνατή η σύγκριση με το τριγωνικό Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα μίας ώρας του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (εδάφιο 5.7.2), εκτιμήθηκε τόσο η κλασική Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους (cRWF) (εδάφιο 5.7.3), όσο και η τροποποιημένη Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους (ddRWF) (εδάφιο 5.7.4) για κάθε λεκάνη του Πίνακα 8-1.

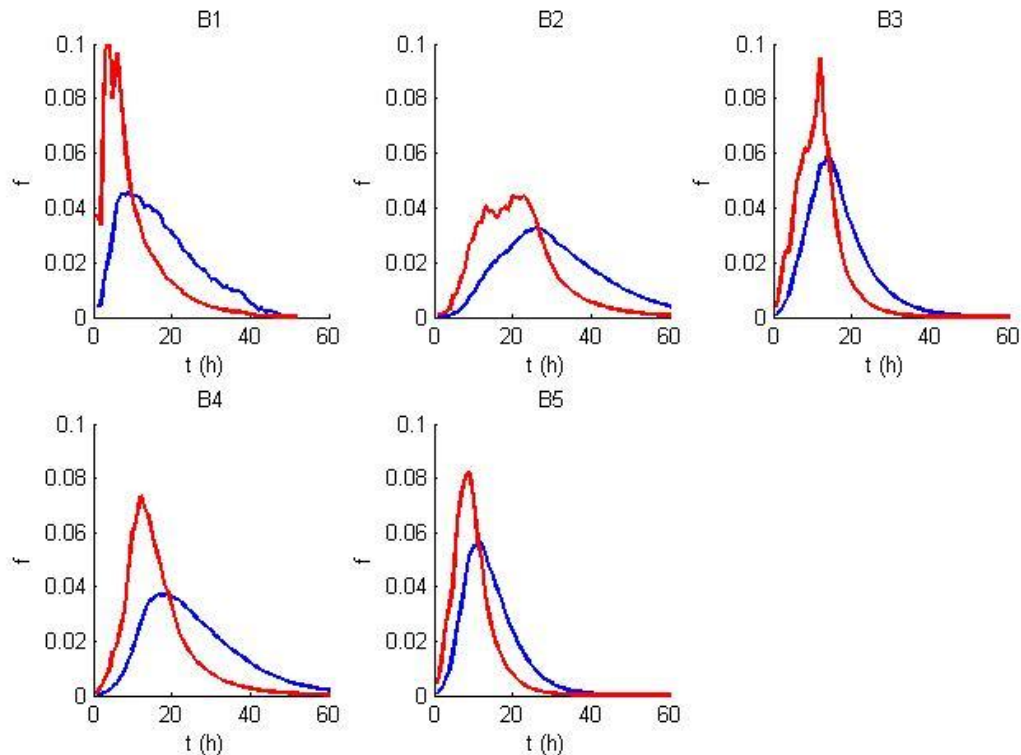
Για τη μέθοδο ddRWF, απαιτείται ο υπολογισμός της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου, όπως αυτή παρουσιάζεται στους χάρτες του Σχήματος 8-3, ανά λεκάνη απορροής. Σε αυτούς, παρατηρείται εμφάνιση συστηματικής μείωσης της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου στα κατάντη τμήματα των λεκανών, που εξετάστηκαν, ενώ δεν παρατηρούνται έντονες διαφορές μεταξύ λεκανών.



Σχήμα 8-3: Χάρτες της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου (αποτελέσματα 2015) για τις λεκάνες απορροής: (1) Γεροποτάμου · (2) Ευρώτα · (3) Λούρου · (4) Πηνειού · (5) Σαρανταποτάμου.

Οι Ανηγμένες Συναρτήσεις Πλάτους παρουσιάζονται στο Σχήμα 8-4. Σε ό,τι αφορά στις παραμέτρους της τροποποιημένης Ανηγμένης Συναρτησης Πλάτους, επιλέγονται οι τυπικές τιμές της εργασίας των Di Lazzaro et al. (2015): $u_c = 1$ m/s, $\theta = 100$, $\beta = 1$. Για την κλασική Ανηγμένη Συναρτηση Πλάτους χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες τιμές για τα μεγέθη u_c και θ που απαιτεί η μέθοδος.

Από το Σχήμα 8-4 προκύπτουν οι εξής διαπιστώσεις: (1) ότι σε όλες τις λεκάνες η μέθοδος ddRWF έδωσε υψηλότερη τιμή παροχής αιχμής και μικρότερο χρόνο εμφάνισης της παροχής αιχμής σε σχέση με την cRWF και (2) ότι η διαφορά αυτή είναι πιο έντονη για τις λεκάνες των ποταμών Γεροποτάμου (B1) και Πηνειού (B4).



Σχήμα 8-4: Ανηγμένες Συναρτήσεις Πλάτους: cRWF με μπλε και ddRWF με κόκκινο (f = συχνότητα, t = χρόνος), για τις λεκάνες απορροής του Σχήματος 8-3: (B1) Γεροποτάμου · (B2) Ευρώτα · (B3) Λούρου · (B4) Πηνειού · (B5) Σαρανταποτάμου.

Στους πίνακες 8-2 και 8-3, παρουσιάζονται, αντίστοιχα, ο χρόνος ανόδου και η παροχή αιχμής του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος διάρκειας 1 h για κάθε μία από τις 5 λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης για κάθε μέθοδο, που εφαρμόστηκε, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Η εξέταση των στοιχείων των πινάκων αυτών επιτρέπει να γίνουν οι εξής διαπιστώσεις: (1) η μέθοδος cRWF υπερεκτιμά τον χρόνο ανόδου κατά 33% (διάμεση τιμή) σε σχέση με την μέθοδο ddRWF, (2) η μέθοδος ddRWF υπερεκτιμά τον χρόνο ανόδου κατά περισσότερο από 100% (διάμεση τιμή) σε σχέση με την μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας, (3) η μέθοδος cRWF υποεκτιμά την παροχή αιχμής κατά 37% (διάμεση τιμή) σε σχέση με την μέθοδο ddRWF, και (4) η μέθοδος ddRWF υποεκτιμά την παροχή αιχμής κατά περίπου 50% (διάμεση τιμή) σε σχέση με την μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας.

Πίνακας 8-2: Χρόνος ανόδου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος διάρκειας 1 h για κάθε λεκάνη απορροής της περιοχής έρευνας και κάθε μέθοδο που εφαρμόστηκε.

	Ποταμός	Χρόνος ανόδου (h)			
		cRWF	ddRWF	IH	IH σε βήμα 1 h
1	Γεροπόταμος (b03)	7	4	3.8	4
2	Ευρώτας (b04)	26	20	6.7	7
3	Λούρος (b05)	14	12	4.4	4
4	Πηνειός (b02)	19	12	5.0	5
5	Σαρανταπόταμος (b06)	12	9	3.7	4

Πίνακας 8-3: Παροχή αιχμής Μοναδιαίου Υδρογραφήματος διάρκειας 1 h για κάθε λεκάνη απορροής της περιοχής έρευνας και κάθε μέθοδο που εφαρμόστηκε.

α/α	Ποταμός	Παροχή αιχμής (m ³ /s)			
		cRWF	ddRWF	IH	IH σε βήμα 1 h
1	Γεροπόταμος (b03)	3	8	14	14
2	Ευρώτας (b04)	153	207	523	509
3	Λούρος (b05)	59	95	170	154
4	Πηνειός (b02)	111	219	448	448
5	Σαρανταπόταμος (b06)	47	68	171	161

Ως προς τη συνέχεια της μελέτης που ακολούθησε το 2022, και σύμφωνα με την εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο Υποκεφάλαιο 5.7, εκτιμήθηκε το Μοναδιαίο Υδρογράφημα για κάθε μία από τις 6 εξεταζόμενες λεκάνες απορροής, μετά, δηλαδή, την προσθήκη της λεκάνης απορροής του π. Ευήνου. Επιλέχθηκε η διάρκεια της μίας ώρας, στην οποία έγινε αναγωγή της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους, η οποία εκφράζει το Στιγμαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα. Με βάση το Μοναδιαίο Υδρογράφημα 1 h της λεκάνης απορροής του Ευήνου, για την οποία υπήρχαν μετρήσεις βροχόπτωσης και απορροής, η παράμετρος u_c εκτιμήθηκε, και ισούται με 1.8 m/s, ενώ με την αναγωγή της ταχύτητας εντός του υδρογραφικού δικτύου στις υπόλοιπες λεκάνες προέκυψαν οι ταχύτητες ροής εντός του υδρογραφικού δικτύου για τις υπόλοιπες, μη μετρούμενες λεκάνες απορροής, οι οποίες είναι μικρότερες τιμές του u_c της λεκάνης του π. Ευήνου, αλλά πάντως μεγαλύτερες του 1 m/s.

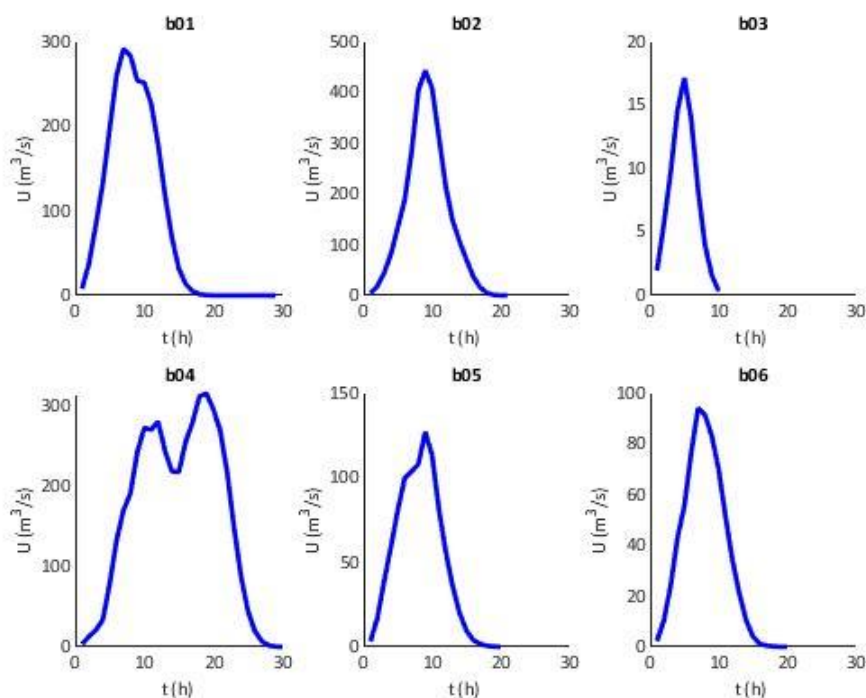
Στους πίνακες 8-4 και 8-5 παρουσιάζονται, αντίστοιχα, ο χρόνος ανόδου και η παροχή αιχμής του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος διάρκειας 1 h για κάθε λεκάνη απορροής της περιοχής μελέτης τόσο με βάση την μέθοδο RWF, όσο και με βάση το Τριγωνικό Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα (IH). Στο Σχήμα 8-5, παρουσιάζονται τα Μοναδιαία Υδρογραφήματα 1 h με βάση την μέθοδο RWF, όπως αυτή τροποποιήθηκε και εφαρμόστηκε στις 6 λεκάνες απορροής.

Πίνακας 8-4: Χρόνος ανόδου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος διάρκειας 1 h για κάθε λεκάνη απορροής με βάση τη μέθοδο RWF, τη μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (IH) και με βάση τα ιστορικά δεδομένα (Ιστ.).

α/α	Λεκάνη	Χρόνος ανόδου (h)		
		RWF	IH	Ιστ.
b01	Ευήνου	7	5	6
b02	Πηνειού	9	6	
b03	Γεροπόταμου	5	4	
b04	Ευρώτα	12 (19)*	8	
b05	Λούρου	9	5	
b06	Σαρανταπόταμου	7	4	

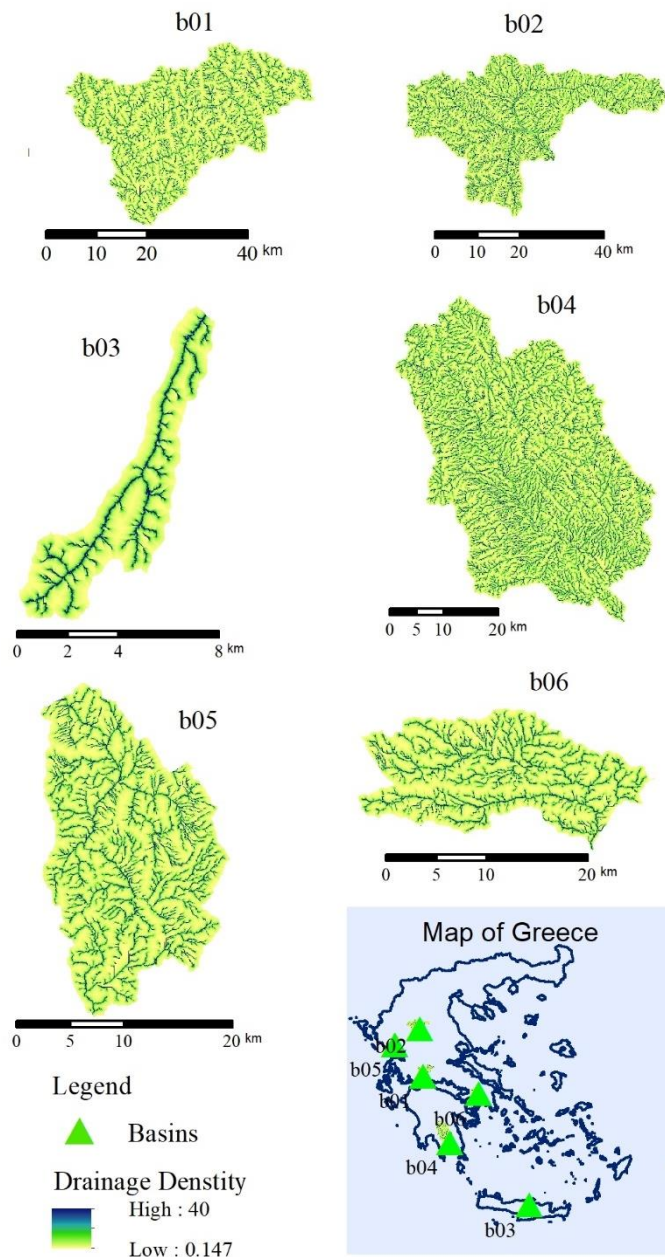
Πίνακας 8-5: Παροχή αιχμής Μοναδιαίου Υδρογραφήματος διάρκειας 1 h με βάση τη μέθοδο RWF, τη μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (IH) και με βάση τα ιστορικά δεδομένα (Ιστ.).

α/α	Λεκάνη	Παροχή αιχμής (m^3/s)		
		RWF	IH	Ιστ.
b01	Ευήνου	292	410	260
b02	Πηγειού	444	431	
b03	Γεροπόταμου	17	15	
b04	Ευρώτα	280 (315)*	461	
b05	Λούρου	127	147	
b06	Σαρανταπόταμου	94	136	



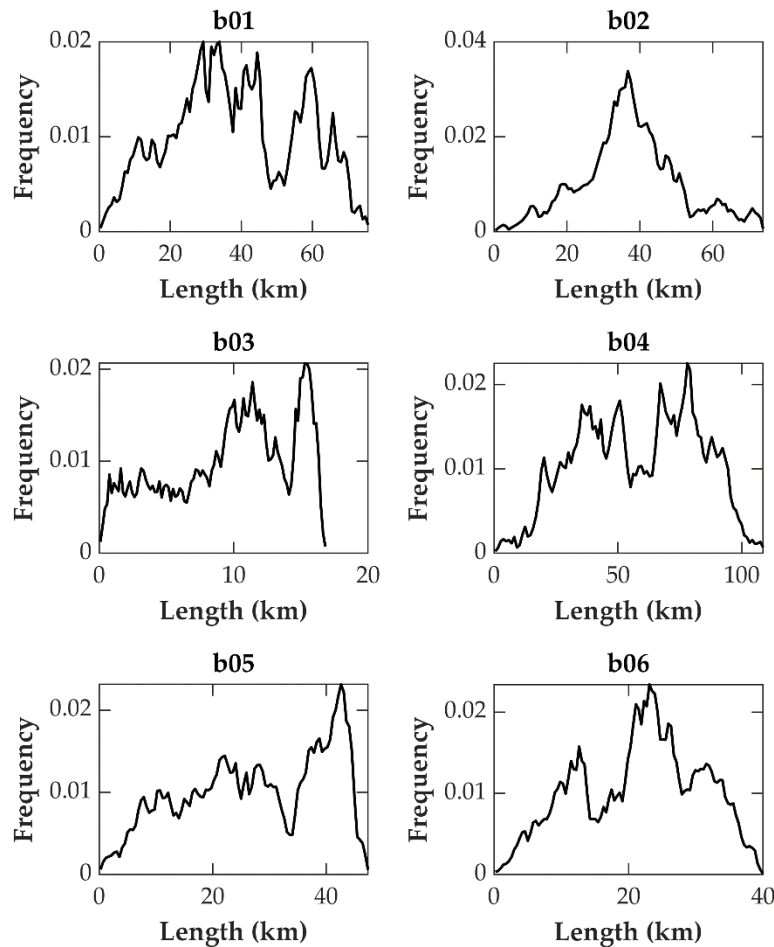
Σχήμα 8-5: Μοναδιαία Υδρογραφήματα (μέθοδος RWF) 1 h των λεκανών απορροής μελέτης: (b01) Ευήνου· (b02) Πηγειού· (b03) Γεροποτάμου· (b04) Ευρώτα· (b05) Λούρου· (b06) Σαρανταποτάμου.

Στο Σχήμα 8-6 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου στις λεκάνες απορροής, μετά την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου σύμφωνα με την εφαρμογή της ΑΣΕ.



Σχήμα 8-6: Η κατανομή της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου στις λεκάνες απορροής που μελετήθηκαν: (b01) Ευήνου· (b02) Πηνειού· (b03) Γεροποτάμου· (b04) Ευρώτα· (b05) Λούρου· (b06) Σαρανταποτάμου.

Στο Σχήμα 8-7, που ακολουθεί, παρουσιάζεται η Συνάρτηση Πλάτους για τις 6 λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης, ενώ στον Πίνακα 8-6, παρουσιάζονται η μέση τιμή (mean) και η τυπική απόκλιση (std) των μηκών επί πλαγιάς και των μηκών εντός του υδρογραφικού δικτύου για τις δύο μεθοδολογίες εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου που εφαρμόστηκαν: την προτεινόμενη μέθοδο με τη χρήση της ΑΣΕ (M1) και την μέθοδο των Tucker et al. (2001) (M2).



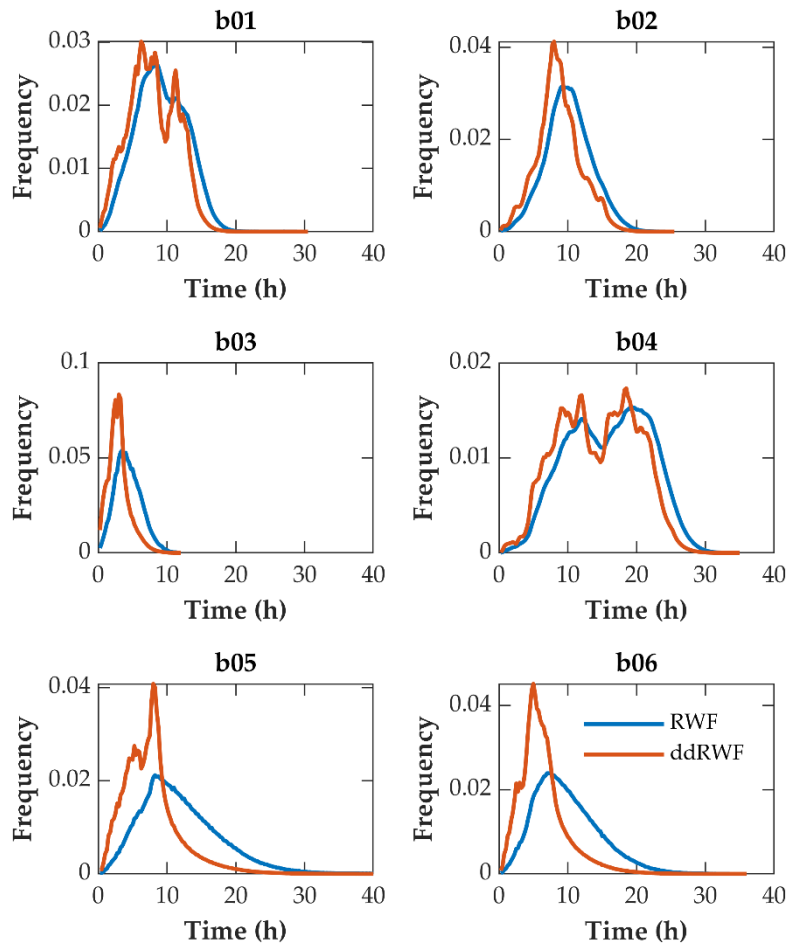
Σχήμα 8-7: Συνάρτηση Πλάτους για τις λεκάνες απορροής (b01) Ευήνου· (b02) Πηνηϊού· (b03) Γεροποτάμου· (b04) Ευρώτα· (b05) Λούρου· (b06) Σαρανταποτάμου.

Πίνακας 8-6: Στατιστικά για τα μήκη ροής των λεκανών απορροής, για τις δύο μεθόδους εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου: την προτεινόμενη μέθοδο (M1) και την μέθοδο κατά Tucker (M2).

ID	Μήκη επί πλαγιάς (km)				Μήκη στο υδρογραφικό δίκτυο (km)			
	Mean (M1)	StDev (M1)	Mean (M2)	StDev (M2)	Mean (M1)	StDev (M1)	Mean (M2)	StDev (M2)
b01	0.292	0.217	3.054	2.660	37.920	17.640	35.158	17.182
b02	0.231	0.170	2.140	2.077	37.371	13.689	35.462	13.879
b03	0.255	0.174	1.057	1.013	9.444	4.532	8.642	4.349
b04	0.229	0.172	1.657	2.471	57.968	23.533	56.541	23.413
b05	0.321	0.253	1.056	1.025	27.133	12.245	26.398	12.078
b06	0.301	0.224	1.100	1.177	21.268	8.850	20.469	8.539

Στο Σχήμα 8-8 παρουσιάζονται οι Ανηγμένες Συναρτήσεις Πλάτους για την κλασική εκδοχή της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους (μπλε) και την τροποποιημένη βάσει της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους (ddRWF) (κόκκινο) για τις λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης.

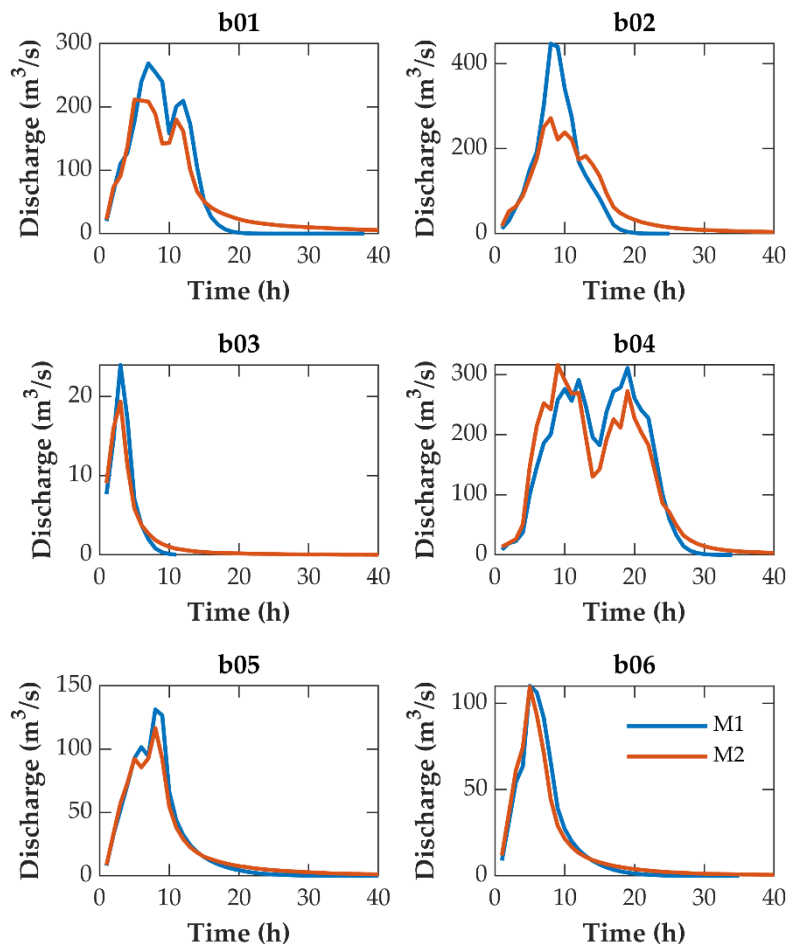
Από το Σχήμα 8-8 προκύπτουν οι εξής διαπιστώσεις: (1) ότι σε όλες τις λεκάνες η μέθοδος ddRWF έδωσε υψηλότερη τιμή παροχής αιχμής σε σχέση με την RWF και (2) ότι η διαφορά αυτή είναι πιο έντονη για τις λεκάνες των ποταμών Λούρου και Σαρανταποτάμου.



Σχήμα 8-8: Σύγκριση της κλασικής εκδοχής της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους και της τροποποιημένης βάσει της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους (ddRWF) για τις λεκάνες απορροής (b01) Ευήνου· (b02) Πηνειού· (b03) Γεροποτάμου· (b04) Ευρώτα· (b05) Λούρου· (b06) Σαρανταποτάμου.

Στο Σχήμα 8-9 δίνεται το Μοναδιαίο Υδρογράφημα μίας ώρας για τις δύο μεθόδους εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου την προτεινόμενη μέθοδο (M1) και την μέθοδο κατά Tucker (M2), για τις λεκάνες απορροής (b01) Ευήνου, (b02) Πηνειού, (b03) Γεροποτάμου, (b04) Ευρώτα, (b05) Λούρου και (b06) Σαρανταποτάμου. Από τη σύγκριση των Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων εντοπίζονται διαφορές στην παροχή αιχμής μόνο στη λεκάνη απορροής του π. Πηνειού.

Στους πίνακες 8-7 και 8-8 δίνονται η παροχή αιχμής και ο χρόνος ανόδου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος διάρκειας μιας ώρας με βάση την τροποποιημένη μέθοδο βάσει της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους (ddRWF) για τις δύο μεθόδους εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου την προτεινόμενη μέθοδο (M1) και την μέθοδο κατά Tucker (M2), τη μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (IH) και με βάση τα ιστορικά δεδομένα (Ιστ.).



Σχήμα 8-9: Το Μοναδιαίο Υδρογράφημα 1 h για τις δύο μεθόδους εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου την προτεινόμενη μέθοδο (M1) και την μέθοδο κατά Tucker (M2), για τις λεκάνες απορροής (b01) Εύηνου· (b02) Πηνειού· (b03) Γεροποτάμου· (b04) Ευρώτα· (b05) Λούρου· (b06) Σαρανταποτάμου.

Πίνακας 8-7: Παροχή αιχμής Μοναδιαίου Υδρογραφήματος διάρκειας 1 h με βάση τη μέθοδο ddRWF για τις δύο μεθόδους εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου την προτεινόμενη μέθοδο (M1) και την μέθοδο κατά Tucker (M2), τη μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (IH) και με βάση ιστορικά δεδομένα (Ιστ.).

ID	Ποταμός	Παροχή αιχμής (m ³ /s)			
		ddRWF (M1)	ddRWF (M2)	IH	Ιστ.
b01	Εύηνος	269	211	410	260
b02	Πηνειός	447	272	431	
b03	Γεροπόταμος	24	19	15	
b04	Ευρώτας	311	316	461	
b05	Λούρος	131	117	147	
b06	Σαρανταπόταμος	110	110	136	

Πίνακας 8-8: Χρόνος Ανόδου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος διάρκειας 1 h με βάση τη μέθοδο ddRWF για τις δύο μεθόδους εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου την προτεινόμενη μέθοδο (M1) και την μέθοδο κατά Tucker (M2), τη μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (IH) και με βάση ιστορικά δεδομένα (Ιστ.).

ID	Ποταμός	Χρόνος Ανόδου (h)			
		ddRWF (M1)	ddRWF (M2)	IH	Ιστ.
b01	Εύηνος	7	5	5	6
b02	Πηνειός	8	8	6	
b03	Γεροπόταμος	3	3	4	
b04	Ευρώτας	12	9	8	
b05	Λούρος	8	8	5	
b06	Σαρανταπόταμος	5	5	4	

Στους Πίνακες 8-9 και 8-10 παρουσιάζονται, αντίστοιχα, ο χρόνος ανόδου και η παροχή αιχμής του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος διάρκειας μιας ώρας για κάθε λεκάνη απορροής της περιοχής έρευνας τόσο με βάση την τροποποιημένη Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους (ddRWF), όσο και με βάση το Τριγωνικό Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα. Στο Σχήμα 8-9 παρουσιάζονται τα Μοναδιαία Υδρογραφήματα μιας ώρας με βάση την μέθοδο RWF όπως αυτή τροποποιήθηκε και εφαρμόστηκε εδώ.

Πίνακας 8-9: Χρόνος ανόδου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος διάρκειας 1 h για κάθε λεκάνη απορροής με βάση τη μέθοδο ddRWF, τη μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (IH) και με βάση ιστορικά δεδομένα (Ιστ.).

a/a	Λεκάνη	Χρόνος ανόδου (h)		
		ddRWF	IH	Ιστ
b01	Ευήνου	7	5	6
b02	Πηνειού	9	6	
b03	Γεροπόταμου	5	4	
b04	Ευρώτα	12 (19)*	8	
b05	Λούρου	9	5	
b06	Σαρανταπόταμου	7	4	

Πίνακας 8-10: Παροχή αιχμής Μοναδιαίου Υδρογραφήματος διάρκειας 1 h με βάση τη μέθοδο ddRWF, τη μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (IH) και με βάση ιστορικά δεδομένα (Ιστ.).

a/a	Λεκάνη	Παροχή αιχμής (m ³ /s)		
		ddRWF	IH	Ιστ
b01	Ευήνου	292	410	260
b02	Πηνειού	444	431	
b03	Γεροπόταμου	17	15	
b04	Ευρώτα	280 (315)*	461	
b05	Λούρου	127	147	
b06	Σαρανταπόταμου	94	136	

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 5 επέτρεψε να εκτιμηθεί η Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους η οποία αποτελεί έκφραση του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος. Για να καταστεί δυνατή η σύγκριση με το τριγωνικό Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα, όπως αυτό προτάθηκε από το Βρετανικό Ινστιτούτο Υδρολογίας (εδάφιο 5.7.1) -το οποίο αντιστοιχεί σε ωριαία διάρκεια- εκτιμήθηκε τόσο η κλασική Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους

(cRWF) (εδάφιο 5.7.3), όσο και η τροποποιημένη Ανηγμένη Συνάρτηση Πλάτους (ddRWF) (εδάφιο 5.7.4) για την ίδια (ωριαία) διάρκεια, για κάθε λεκάνη του Πίνακα 8-9. Για τη μέθοδο ddRWF, απαιτείται ο υπολογισμός της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου. Χάρτες του μεγέθους αυτού φαίνονται στο Σχήμα 8-6 ανά λεκάνη απορροής. Σε αυτούς παρατηρείται εμφάνιση συστηματικής μείωσης της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου στα κατάντη τμήματα των λεκανών που εξετάστηκαν, ενώ, δεν παρατηρούνται έντονες διαφορές μεταξύ των λεκανών.

8.4 Σύνοψη

Διερευνάται η δυνατότητα αξιοποίησης μιας νέας μεθόδου εκτίμησης του Γεωμορφολογικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος, στην εκτίμηση της παροχής σχεδιασμού υδραυλικών έργων και κατ' επέκταση η διερεύνηση της δυνατότητας αποκλειστικής χρήση τοπογραφικής πληροφορίας για την εκτίμηση των υδρογραφημάτων σχεδιασμού, δηλαδή, η δυνατότητα αξιοποίησης της μεθόδου Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους. Επίσης, κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της μεθοδολογίας, ελήφθη υπόψη και η ετερογένεια του υδρογραφικού δικτύου. Εξετάζονται και συγκρίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα, δύο μεθοδολογιών που αφορούν της εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου, της προτεινόμενης ΑΣΕ και της μεθόδου κατά Tucker. Από τα αποτελέσματα της διερεύνησης μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η μέθοδος της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους είναι μια πρόσφορη μέθοδος για την κατάρτιση Συνθετικών Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων, καθόσον αυτή απαιτεί, από άποψη δεδομένων, μόνον τη διαθεσιμότητα ενός ΨΜΕ της εξεταζόμενης λεκάνης. Η μέθοδος αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη για την κατάρτιση συνθετικών Μοναδιαίων.
- Η κλασική εκδοχή της μεθόδου (αναφέρεται ως μέθοδος cRWF) υποεκτιμά την παροχή αιχμής και υπερεκτιμά τον χρόνο ανόδου του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος σε σχέση με τη νέα, την τροποποιημένη εκδοχή της μεθόδου (μέθοδος ddRWF).
- Με χρήση τυπικών τιμών των κινηματικών μεταβλητών της μεθόδου, και οι δύο εκδοχές αυτής υποεκτιμούν την παροχή αιχμής και υπερεκτιμούν τον χρόνο ανόδου του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος, σε σχέση με την καταξιωμένη μέθοδο του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας. Οι διαφορές είναι αρκετά μικρότερες στην περίπτωση της εκδοχής ddRWF, γεγονός που συνηγορεί υπέρ αυτής.
- Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από τη συνέχεια της μελέτης που ακολουθήθηκε το 2022, οι τυπικές τιμές της ταχύτητας ροής σε πλαγιά και σε υδατόρευμα που πρότειναν οι Di Lazzaro et al. (2015) είναι υπερβολικά μικρές όπως αποδείχθηκε από το Μοναδιαίο Υδρογράφημα με βάση τις μετρήσεις βροχόπτωσης και απορροής στη λεκάνη απορροής του Ευήνου. Η προσαρμογή της ταχύτητας ροής σε υδατόρευμα στην εν λόγω λεκάνη επέτρεψε μια πολύ καλή εκτίμηση του χρόνου ανόδου (με υστέρηση μόνον 1 h) και της παροχής αιχμής (με υπερεκτίμηση 12%) του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος 1 h.
- Η αναγωγή της ταχύτητας ροής από τη λεκάνη απορροής του Ευήνου σε άλλες πέντε λεκάνες απορροής του ελληνικού χώρου με βάση την μέση κλίση των ρεμάτων, έδωσε χρόνο ανόδου του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος μιας ώρας με υστέρηση 1 h έως 4 h και αποκλίσεις στην παροχή αιχμής από +11 % έως -45 % σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας.

- Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου, με χρήση της ΑΣΕ αποδεικνύεται ότι έχει επίπτωση στο μοναδιαίο υδρογράφημα. Να σημειωθεί ότι η μεθοδολογία εκτίμησης της ΑΣΕ, δεν εφαρμόστηκε στη μελέτη του 2015, καθώς η γνώση κερδήθηκε αργότερα (2018).
- Από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου με χρήση της ΑΣΕ (M1), και την εφαρμογή της μεθόδου κατά Tucker et al. (M2) για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου, αποδεικνύεται ότι η M1 υπολογίζει μικρότερα μήκη επί πλαγιάς σε σχέση με την M2, σε όλες τις εξεταζόμενες λεκάνες απορροής. Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των μηκών στο υδρογραφικό δίκτυο, όπως αυτά προκύπτουν από την εφαρμογή των μεθόδων M1 και M2, έχουν μικρές αποκλίσεις σε όλες τις λεκάνες.

Σύμφωνα τη σύγκριση των Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων μίας ώρας για τις δύο μεθόδους εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου, την προτεινόμενη μέθοδο M1 και την μέθοδο κατά Tucker et al. (M2), δεν εντοπίζονται σημαντικές διαφορές, παρά μόνο στην παροχή αιχμής στη λεκάνη απορροής του π. Πηνειού.

9 Ημικατανεμημένη ταξινόμηση γήινου αναγλύφου

9.1 Γενικά

Στο Κεφάλαιο 9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μεθοδολογικού πλαισίου, που προτείνεται στο Κεφάλαιο 5 για την ημικατανεμημένη ταξινόμηση τοπίου (semi-distributed landscape classification). Σύμφωνα με το πλαίσιο εκείνο, για την προσομοίωση της υδρολογικής συμπεριφοράς μιας λεκάνης απορροής, υιοθετείται ένα ημικατανεμημένο μοντέλο βροχόπτωσης απορροής και η ταξινόμηση της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής σε κατηγορίες τοπίου, οι οποίες αργότερα θα χρησιμοποιηθούν εντός του υδρολογικού μοντέλου ως οι χωρικές μονάδες με συγκεκριμένη και διακριτή υδρολογική συμπεριφορά.

Στο παρελθόν έχουν ελεγχθεί διάφορες μέθοδοι ταξινόμησης του γήινου αναγλύφου μιας λεκάνης απορροής, σε κατηγορίες τοπίου (Papageorgaki and Nalbantis, 2013). Από τη γνώση που κερδήθηκε τότε, επιλέγεται η εφαρμογή επιβλεπόμενης ταξινόμησης για την ανάδειξη διακριτών κατηγοριών τοπίου, οι οποίες αργότερα θα βοηθήσουν, μέσω της θεώρησης του κατάλληλου μηχανισμού γένεσης της επιφανειακής απορροής, στην εκτίμηση της απορροής της εξεταζόμενης λεκάνης. Αποτελέσματα μιας εφαρμογής επιβλεπόμενης και μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης του γήινου αναγλύφου, σε δύο λεκάνες απορροής της Αττικής, έχουν ανακοινωθεί σε συνέδριο (Papageorgaki and Nalbantis, 2013) και αποδεικνύουν ότι προτιμάται η χρήση της επιβλεπόμενης έναντι της μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης.

Για την ταξινόμηση σε κατηγορίες τοπίου χρησιμοποιείται τοπογραφική πληροφορία η οποία εξάγεται από Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ), καθώς και ποιοτική πληροφορία η οποία λαμβάνεται από εικόνες (ορθοεικόνες και δορυφορικές εικόνες) με απλή οπτική παρατήρηση. Η ποιοτική πληροφορία που εξάγεται από την παρατήρηση των εικόνων, μπορεί να συμπληρωθεί ή και να αντικατασταθεί με πληροφορία που συλλέγεται με επιτόπια έρευνα. Η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται ως δείγμα εκπαίδευσης του συστήματος το οποίο εκτελεί την επιβλεπόμενη ταξινόμηση. Το σύστημα ταξινόμησης, το οποίο επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί, στην παρούσα εφαρμογή είναι ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο, το οποίο, με βάση τα δεδομένα εκπαίδευσης, βαθμονομείται και, στη συνέχεια, εκτελεί την ταξινόμηση του συνόλου της λεκάνης απορροής σε κατηγορίες τοπίου. Η προτεινόμενη μεθοδολογία αποτελείται από τρία γενικά βήματα. Στο Βήμα 1, εκτελούνται διαδικασίες που αφορούν την ανάλυση της πληροφορίας από κλασικούς τοπογραφικούς χάρτες και ΨΜΕ, την εκτίμηση της ΑΣΕ, εφαρμόζοντας την προτεινόμενη μεθοδολογία του Εδαφίου 5.3.2, την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής, και τον υπολογισμό των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής. Τα τελευταία θα αποτελέσουν, στη συνέχεια, τα κριτήρια για την επιβλεπόμενη ταξινόμηση του συνόλου της λεκάνης και υπολογίζονται από την πληροφορία του υψομέτρου του εδάφους, που παρέχεται με τη μορφή ενός ΨΜΕ. Στο Βήμα 2, γίνεται η συλλογή του δείγματος εκπαίδευσης του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου (ΤΝΔ), η εκπαίδευσή του, και τελικά, μέσω της εφαρμογής του, η ταξινόμηση της λεκάνης απορροής σε κατηγορίες τοπίου. Το αποτέλεσμα της ταξινόμησης, ανεξαρτήτως της μεθόδου που χρησιμοποιείται, είναι η εκτίμηση της χωρικής κατανομής, καθεμίας από τις αρχικώς οριζόμενες κατηγορίες τοπίου, στη λεκάνη απορροής. Οι τέσσερις κατηγορίες τοπίου που

επελέγησαν στην παρούσα διατριβή παρουσιάζονται σε χάρτες. Η απόδοση της υδρολογικής συμπεριφοράς σε κάθε κατηγορία τοπίου γίνεται μέσω των μηχανισμών γένεσης απορροής, ενώ τα χαρακτηριστικά κάθε κατηγορίας τοπίου αναλύονται στο εδάφιο των Αποτελεσμάτων (εδάφιο 9.6). Στο Βήμα 3, που είναι και το τελευταίο βήμα της προταθείσας μεθοδολογίας, εκτελείται η ημικατανεμημένη υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής με χρήση του υδρολογικού μοντέλου βροχόπτωσης απορροής FLEX–Toro (Savenije, 2010) και λαμβάνεται η εκτίμηση της παροχής της λεκάνης απορροής. Το μοντέλο παρουσιάζεται συνοπτικά στο εδάφιο 5.6.4. Είναι ένα ευέλικτο μοντέλο το οποίο, με κατάλληλη προσαρμογή, εφαρμόστηκε στην παρούσα διατριβή. Εντός του υδρολογικού μοντέλου FLEX–Toro, καθεμία από τις κατηγορίες τοπίου του προηγούμενου βήματος, μοντελοποιείται με χρήση ενός αδιαμέριστου εννοιολογικού μοντέλου βροχόπτωσης - απορροής. Το μοντέλο βασίζεται στην τοπογραφία και στην αδιαμέριστη αναπαράσταση των κυρίαρχων υδρολογικών διεργασιών των υδρολογικών κατηγοριών τοπίου εντός ενός γενικότερου ημικατανεμημένου μοντέλου. Η βασική ιδέα της δομής του μοντέλου, όπως αναφέρθηκε προηγουμένα, είναι ότι η δομή του μοντέλου εξαρτάται από έναν περιορισμένο αριθμό κατηγοριών τοπίου οι οποίες ορίζονται από την τοπογραφική πληροφορία της λεκάνης απορροής που εξετάζεται. Οι κατηγορίες τοπίου της λεκάνης αντιπροσωπεύονται από αδιαμέριστα εννοιολογικά υπο-μοντέλα τα οποία τρέχουν παράλληλα σε ένα γενικότερο ημικατανεμημένο μοντέλο. Έτσι, επιτυγχάνεται η μέγιστη απλότητα με τη διατήρηση, παράλληλα, της απόδοσης των υδρολογικών διεργασιών. Το μοντέλο βαθμονομείται και επικυρώνεται με βάση ημερήσια δεδομένα. Καταληκτικά, να σημειωθεί ότι η χιονόπτωση και η τήξη του χιονιού λαμβάνονται υπόψιν με τη διαβαθμισμένη απόδοση σε οκτώ υψομετρικές ζώνες της λεκάνης απορροής.

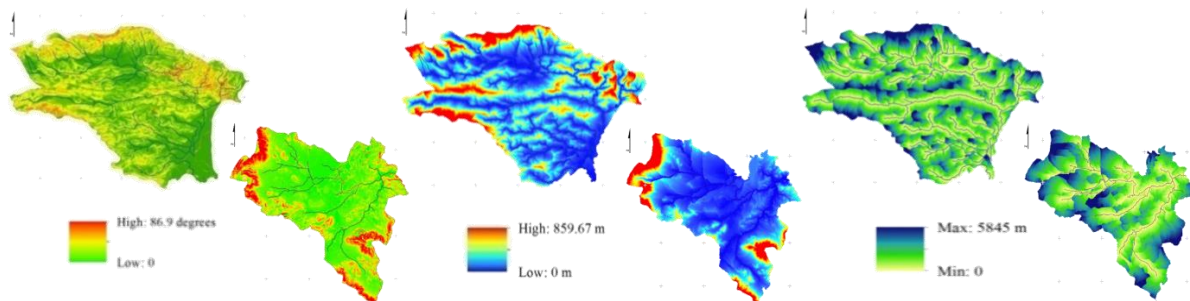
Στόχος της προσέγγισης της μοντελοποίησης της συμπεριφοράς των κατηγοριών τοπίου είναι η γενικότερη εφαρμογή στην προτεινόμενη μεθοδολογία για την πρόβλεψη της υδρολογικής συμπεριφοράς των λεκανών απορροής υπό συγκεκριμένες συνθήκες (είτε πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας λεκάνης απορροής στην οποία υπάρχουν μετρήσεις, αλλά εξετάζεται η περίπτωση αβέβαιων μελλοντικών συνθηκών, είτε πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας μη μετρούμενης λεκάνης απορροής με ένα μη βαθμονομημένο μοντέλο, μέσω απλής μεταφοράς παραμέτρων). Η χρήση ενός ευέλικτου μοντέλου σε υδρολογικές εφαρμογές είναι μεγάλης σημασίας, μιας και η ετερογένεια που καλείται να αντιμετωπίσει ένα μοντέλο, είναι μεγάλη, και σε διαφορετικά πεδία, όπως για παράδειγμα στην τοπογραφία και στην επιφάνεια του εδάφους της περιοχής μελέτης, στο τοπίο, στη γεωλογία και στις κατακρημνίσεις.

9.2 Υδρολογική ταξινόμηση τοπίου με βάση Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους και Ορθοεικόνες

Η έννοια της κατηγορίας του υδρολογικού τοπίου βασίζεται στην ιδέα του Winter (2001) ότι μια ενιαία, απλή, φυσική οντότητα τοπίου είναι το θεμελιώδες στοιχείο όλων των τοπίων. Αυτή η οντότητα ονομάζεται θεμελιώδης υδρολογική μονάδα τοπίου (fundamental hydrologic landscape unit) και ορίζεται ως ο τόπος ενός υψιπέδου δίπλα σε πεδινή περιοχή που χωρίζονται από την πλαγιά μιας κοιλάδας (Winter, 2001). Πάνω σε αυτή την ιδέα, και με τη γνώση που αποκομίστηκε στο παρελθόν, εξετάζεται η υδρολογική ταξινόμηση του γήινου αναγλύφου, ως μια εναλλακτική της προσέγγισης των μονάδων υδρολογικής απόκρισης ενός ημικατανεμημένου μοντέλου.

Στο παρελθόν, στη δημοσιευμένη έρευνα των Parageorgaki and Nalbantis (2013), η ταξινόμηση τοπίου επικεντρώθηκε στον προσδιορισμό περιοχών, οι οποίες είναι διακριτές σε σχέση με τον κυρίαρχο μηχανισμό γένεσης της επιφανειακής απορροής. Πραγματοποιήθηκε

επιβλεπόμενη ταξινόμηση του γήινου αναγλύφου δύο ελληνικών λεκανών απορροής σε κατηγορίες τοπίου, ενώ χρησιμοποιήθηκαν τρία μορφομετρικά κριτήρια, τα οποία υπολογίζονται από το ΨΜΕ. Αυτά είναι η κλίση του εδάφους, ο δείκτης HAND, και η απόσταση κάθε κελιού της λεκάνης από τον πλησιέστερο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου, υπολογισμένη κατά μήκος της μέγιστης κλίσης της διεύθυνσης ροής. Η χωρική κατανομή των κριτηρίων στις δύο λεκάνες των ποταμών, που μελετήθηκαν φαίνεται στο Σχήμα 9-1.



Σχήμα 9-1: Η χωρική κατανομή των τριών κριτηρίων, στις δύο λεκάνες απορροής: η κλίση του εδάφους σε μοίρες (αριστερά), ο δείκτης HAND σε m (μέσον), και η απόσταση από τον πλησιέστερο κλάδο σε m (δεξιά) (πηγή: Parageorgaki and Nalbantis, 2013).

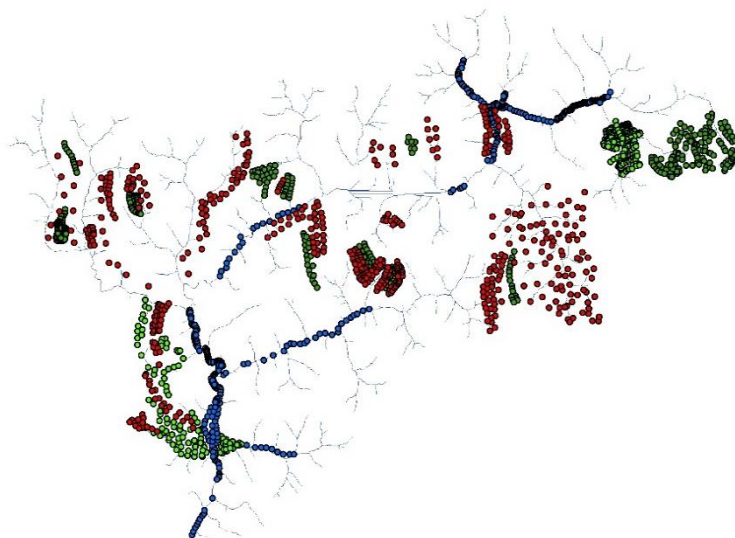
Στην παρούσα ταξινόμηση, η οποία υλοποιείται στις δύο λεκάνες απορροής που περιγράφονται παρακάτω, τα κριτήρια που επιλέγονται να χρησιμοποιηθούν, είναι πέντε και υπολογίζονται εύκολα από ΨΜΕ, ενώ για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιείται η ΑΣΕ, όπως ορίζεται στο εδάφιο 5.3.2. Αυτά είναι η κλίση του εδάφους, οι χρήσεις γης, ο δείκτης HAND, υπολογισμένος σύμφωνα με το υδρογραφικό δίκτυο, το οποίο προκύπτει με εφαρμογή της ΑΣΕ των δύο εποχών, η Απόσταση από τον εγγύτερο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου υπολογισμένη για το υδρογραφικό δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό του δείκτη HAND, και ο προσανατολισμός των κελιών της λεκάνης απορροής (aspect).

Επίσης, η μέθοδος των ΤΝΔ χρησιμοποιείται ως κύρια μέθοδος ταξινόμησης. Δεδομένου ότι αυτή είναι μια επιβλεπόμενη μέθοδος ταξινόμησης, απαιτείται ένα υποσύνολο δεδομένων, μέσω του οποίου συγκεκριμένες περιοχές της λεκάνης απορροής ταξινομούνται ανεξάρτητα σε κάθε κατηγορία τοπίου, με στόχο τη δημιουργία δειγμάτων δεδομένων για την εκπαίδευση, την δοκιμή και την επικύρωση του ΤΝΔ. Η δομή του ΤΝΔ που χρησιμοποιήθηκε υλοποιήθηκε σε περιβάλλον MatLab, ως δίκτυο δύο ή τριών επιπέδων πρόσθιας τροφοδότησης (feed forward network) με σιγμοειδή συνάρτηση μετάβασης και δύο επίπεδα (ένα κρυφό και της εξόδου). Εντός του ΤΝΔ επιλέγονται, τελικά, 10 κρυφοί νευρώνες και 4 νευρώνες εξόδου, όσες δηλαδή και οι κατηγορίες τοπίου. Έγιναν επιπλέον δοκιμές κατά τις οποίες εφαρμόστηκαν διαφορετικά ΤΝΔ στα δεδομένα. Οι δοκιμές αφορούν το πλήθος των νευρώνων εξόδου, το ποσοστό των αρχικών δεδομένων που χρησιμοποιείται στα στάδια της βαθμονόμησης του ΤΝΔ, της επαλήθευσης και του ελέγχου, καθώς και στον αριθμό των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση των κατηγοριών τοπίου. Ως προς το πλήθος των νευρώνων εξόδου ελέγχθηκαν οι περιπτώσεις των τριών και τεσσάρων, μιας και αντίστοιχος είναι ο αριθμός των κατηγοριών τοπίου που κρίθηκε σημαντικός. Ως προς τα ποσοστά των αρχικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στα στάδια της βαθμονόμησης, της επαλήθευσης και του ελέγχου, επιλέγεται τελικά η εφαρμογή τυπικών τιμών (Hippert et al., 2001) μιας και η απόδοση του ΤΝΔ δεν διαφοροποιείται σημαντικά από δοκιμή σε δοκιμή, καθώς αυτή κυμαίνεται κατά μέσο όρο στο 76%. Επίσης, ελέγχθηκαν από 4 έως 6 κριτήρια ταξινόμησης των κατηγοριών τοπίου. Ως προς τα κριτήρια η αυξημένη επίδοση του ΤΝΔ (κατά μέσο όρο στο 77%), στον έλεγχο που έγινε με 4, 5 και 6 κριτήρια, οδήγησε στην τελική επιλογή των 5 κριτηρίων.

Επομένως, ως προς τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, τα οποία επιλέγονται ως κριτήρια για την ταξινόμηση του τοπίου, έχει αποδειχθεί ότι η χρήση του δείκτη HAND (Gharari et al., 2011) είναι κατάλληλη για τη διάκριση των κατηγοριών τοπίου για υδρολογικούς σκοπούς. Επομένως, επιλέγονται συνολικά πέντε κριτήρια, τα εξής: ο δείκτης HAND, η κλίση του εδάφους (ground slope), ο προσανατολισμός (aspect), η απόσταση κάθε κελιού της λεκάνης από τον πλησιέστερο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου, και η βλάστηση, από το Corine Land Cover 2018.

Για τον υπολογισμό των κριτηρίων, είναι απαραίτητος ο καθορισμός του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής, ο οποίος ακολουθεί την προτεινόμενη μεθοδολογία του Εδαφίου 5.3.2, και σύμφωνα με την εκτίμηση της ΑΣΕ, όπως αυτή εκτιμάται από τοπογραφικούς χάρτες, καθορίζονται τρεις τιμές ΑΣΕ, μια για κάθε συνθήκη υγρασίας. Επομένως, για καθεμία από τις τιμές της ΑΣΕ, εξάγεται και το αντίστοιχο υδρογραφικό δίκτυο. Οι τιμές της ΑΣΕ αφορούν την υγρή περίοδο, την ξηρή περίοδο και την ενδιάμεση αυτών των δύο περιόδου, για την οποία λαμβάνεται ο μέσος όρος των τιμών ΑΣΕ για τις προηγούμενες δύο περιόδους. Επομένως, για τον υπολογισμό των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών, αξιοποιείται η προτεινόμενη μεθοδολογία εκτίμησης της ΑΣΕ, και το υδρογραφικό δίκτυο που προκύπτει. Επίσης, έγινε χρήση αλγορίθμων, οι οποίοι έχουν συνταχθεί σε περιβάλλον MatLab και έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν, και χρήση του προγράμματος ArcMap. Στο τελευταίο, επίσης, έγινε η ανάλυση των δεδομένων τοπογραφικού χαρακτήρα και η χαρτοσύνθεση των χαρτών που παρουσιάζονται εδώ. Να σημειωθεί ότι, σε υδρολογικές ταξινομήσεις του γήινου αναγλύφου, η χρήση της βλάστησης εφαρμόζεται για πρώτη φορά και, επομένως, αποτελεί καινοτόμο προσέγγιση, η οποία αναμένεται να συμβάλει στην ακριβέστερη εκτίμηση μιας εκ των τεσσάρων κατηγοριών τοπίου.

Η χωρική κατανομή του συνόλου των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του δείγματος εκπαίδευσης του ΤΝΔ παρουσιάζεται στο Σχήμα 9-2, για την λεκάνη του π. Ευήνου. Το υδρογραφικό δίκτυο, το οποίο φαίνεται στο σχήμα, έχει εξαχθεί με χρήση του μέσου όρου των διάμεσων τιμών της ΑΣΕ των δύο ακραίων περιόδων του έτους. Το εκπαιδευμένο ΤΝΔ, μετά την εκπαίδευση μέσω του υποσυνόλου δεδομένων από την λεκάνη του π. Ευήνου, αποθηκεύεται και εφαρμόζεται στην ταξινόμηση του συνόλου της λεκάνης τόσο του π. Ευήνου, όσο και του π. Αγραφιώτη.



Σχήμα 9-2: Η χωρική κατανομή του δείγματος εκπαίδευσης του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου. Τα κόκκινα σημεία αντιστοιχούν στην class 1, τα σκούρα πράσινα στην class 2, τα πράσινα (ανοιχτό) στην class 3 και τα μπλε στην class 4.

9.3 Συμβολή κατηγοριών τοπίου στο μοντέλο FLEX-Topo

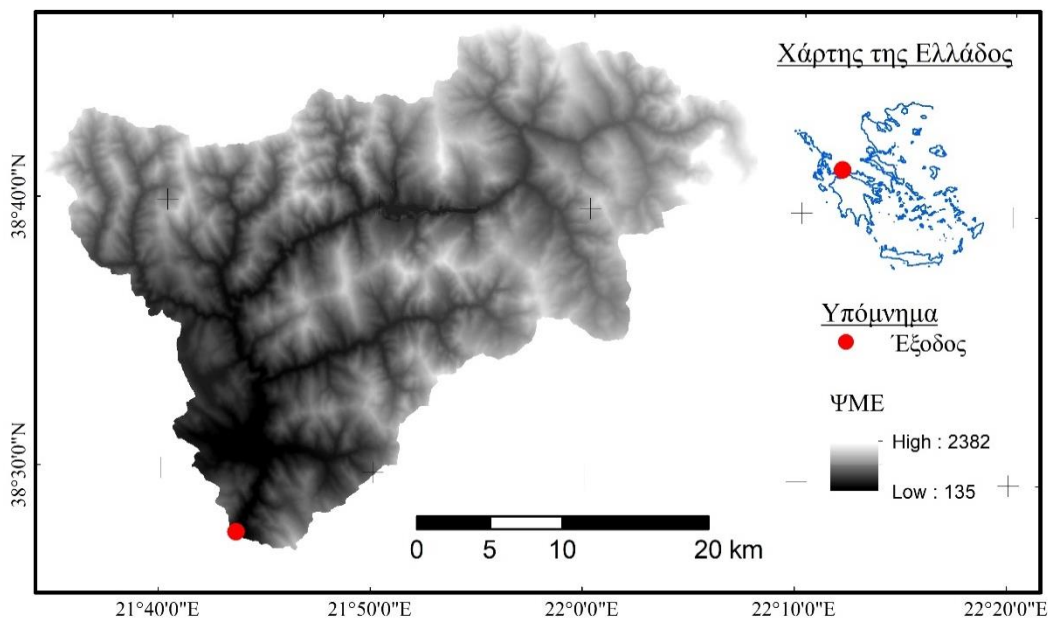
Από την μελέτη της βιβλιογραφίας γίνεται σαφές ότι η τοπογραφία είναι στενά συνδεδεμένη με τη γεωλογία, τα εδάφη, το κλίμα και τις χρήσεις γης. Παρά το γεγονός ότι τα ΨΜΕ είναι ευρέως διαθέσιμα, είναι υπό διερεύνηση το κατά πόσον, και με ποιο τρόπο, αξιοποιείται η πληροφορία αυτή μέσω των μοντέλων βροχόπτωσης απορροής.

Για τον παραπάνω λόγο, το ημικατανεμημένο μοντέλο βροχόπτωσης - απορροής FLEX-Topo (Savenije, 2010) χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση της αξιοποίησης των κατηγοριών τοπίου στην πρόβλεψη της απορροής. Η εφαρμογή καλείται να διευκρινίσει πώς οι κατηγορίες τοπίου μιας λεκάνης απορροής που έχουν προκύψει από ταξινόμηση της λεκάνης, θα εισαχθούν εντός του μοντέλου βροχόπτωσης - απορροής, ως μονάδες του μοντέλου, για πρόβλεψη της απορροής. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ένα ημικατανεμημένο μοντέλο, όπου κάθε κατηγορία τοπίου μοντελοποιείται ως ένα αδιαμέριστο μοντέλο και στο σύνολό τους όλα αυτά τα επί μέρους μοντέλα για τις κατηγορίες τοπίου εκτελούνται παράλληλα μέσα στο ημικατανεμημένο μοντέλο. Τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά και ενισχύουν τον ισχυρισμό ότι τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, όπως ο δείκτης HAND, η κλίση του εδάφους, ο προσανατολισμός (aspect), η απόσταση από τον πλησιέστερο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου, και η βλάστηση, μπορούν με επιτυχία να συμβάλλουν, ως κριτήρια, στην κατανεμημένη ταξινόμηση της λεκάνης απορροής.

9.4 Περιοχή Μελέτης

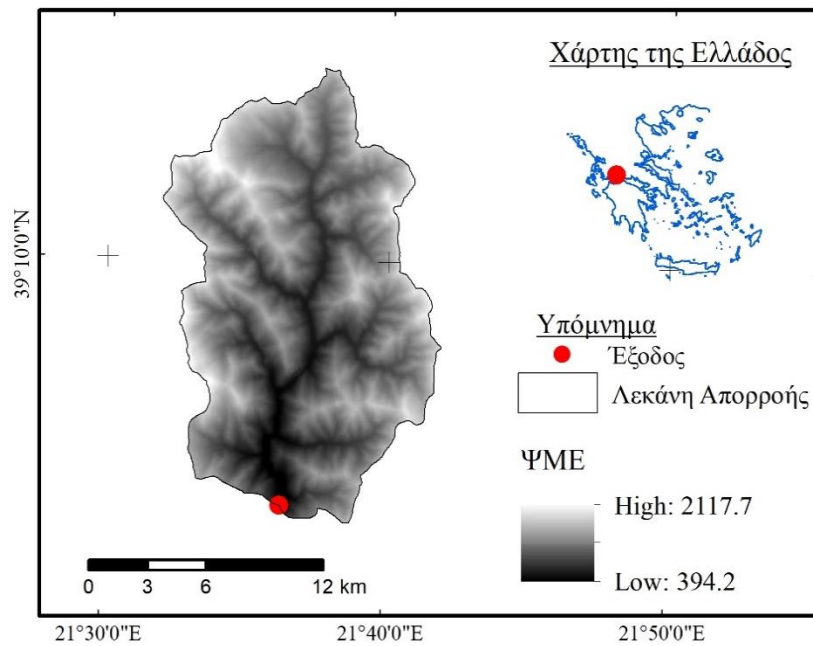
Η μεθοδολογία ταξινόμησης τοπίου της λεκάνης, όπως περιγράφεται στο Υποκεφάλαιο 5.6, εφαρμόζεται σε τρεις λεκάνες απορροής, αυτήν του π. Ευήνου, του π. Αγραφιώτη και αυτήν του π. Κρικελιώτη. Στο Σχήμα 9-3, παρουσιάζεται η κατανομή των υψομέτρων της λεκάνης του π. Ευήνου, έτσι, όπως αποδίδεται από το ΨΜΕ EU-DEM, θεωρώντας την έξοδο της λεκάνης στη θέση του υδρομετρικού σταθμού Πόρος Ρηγανίου. Η λεκάνη του Ευήνου βρίσκεται στη Δυτική Ελλάδα, όπως φαίνεται πάνω δεξιά στο ίδιο σχήμα. Η συνολική λεκάνη απορροής του Ευήνου έχει επιφάνεια 1164 km², ενώ ανάντη του υδρομετρικού σταθμού έχει

έκταση 882 km². Το μέγιστο, το μέσο και το ελάχιστο υψόμετρο (στον σταθμό) της λεκάνης, είναι 2382 m, 979.6 m και 135 m αντίστοιχα. Η λεκάνη περιλαμβάνει κυρίως τον π. Εύηνο, με μήκος 93 km, και την τεχνητή λίμνη Ευήνου, με έκταση 2.9 km². Γενικά, η λεκάνη χαρακτηρίζεται από απότομες κλίσεις, με μέση κλίση εδάφους ίση με 23°, έχει μέση ετήσια απορροή ίση με 694×10⁶ m³ (Μαμάσης και Ναλμπάντης, 1995), ενώ η χωρικά και χρονικά μέση ετήσια βροχόπτωση είναι 1282 mm. Ως έξοδος της λεκάνης έχει επιλεγθεί η θέση του σταθμημετρικού σταθμού Πόρος Ρηγανίου με κωδικό αναγνώρισης στη βάση του Υδροσκοπίου 400030720 και υψόμετρο ίσο με 135 m.



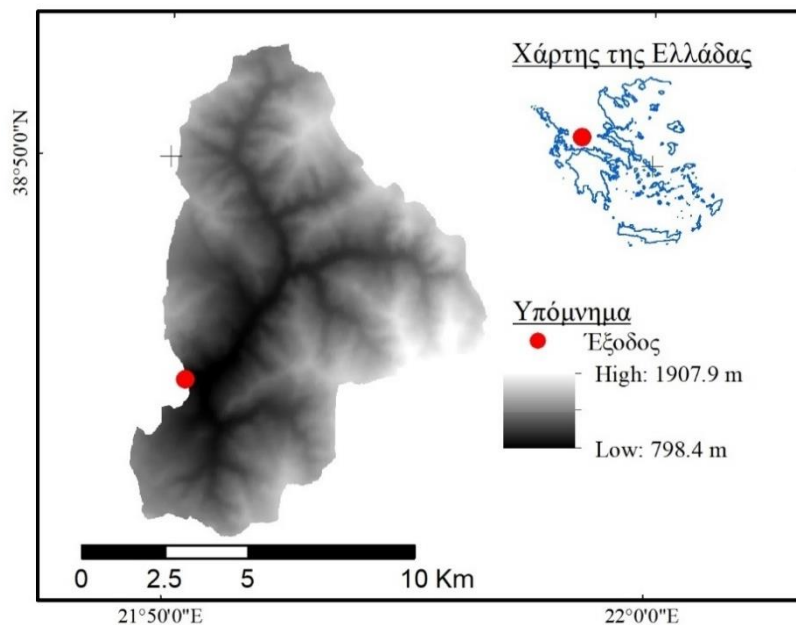
Σχήμα 9-3: Η λεκάνη απορροής του π. Ευήνου.

Στο Σχήμα 9-4, παρουσιάζονται η κατανομή των υψομέτρων της λεκάνης του π. Αγραφιώτη, έτσι όπως αποδίδεται από το ΨΜΕ, θεωρώντας την έξοδο της λεκάνης στη θέση της Γέφυρας Βαρβαριάδας. Η λεκάνη του π. Αγραφιώτη βρίσκεται και αυτή στη Δυτική Ελλάδα, όπως φαίνεται πάνω δεξιά στο ίδιο σχήμα. Έχει επιφάνεια 218.21 km² ανάντη της θέσης Γεφ. Βαρβαριάδας και μήκος κύριου ρέματος ίσο με 27 km. Το μέγιστο, το μέσο και το ελάχιστο υψόμετρο, στην έξοδο της λεκάνης, είναι 2117.7 m, 1189.9 m και 394.2 m, αντίστοιχα. Η μέση κλίση του εδάφους της λεκάνης είναι 28.49 °.



Σχήμα 9-4: Η λεκάνη απορροής του π. Αγραφιώτη.

Στο Σχήμα 9-5, παρουσιάζονται η κατανομή των υψομέτρων της λεκάνης του π. Κρικελιώτη ή Κρικελλοπόταμου, παραποτάμου του π. Αγελλώου, έτσι όπως αποδίδεται από το ΨΜΕ, θεωρώντας την έξοδο της λεκάνης στη θέση Κρίκελλο. Η λεκάνη του π. Κρικελιώτη βρίσκεται στη Δυτική Ελλάδα, πηγάζει από την οροσειρά της Πίνδου και έχει επιφάνεια 88.6 km² ανάντη της θέσης της εξόδου στη Γέφυρα Δομνίστας. Στη θέση Γέφ. Δομνίστα λειτουργούσε σταθμημετρικός σταθμός. Το μέγιστο, το μέσο και το ελάχιστο υψόμετρο, στην έξοδο της λεκάνης, είναι 1907.9 m, 1297.5 m και 798.4 m, αντίστοιχα. Η μέση κλίση του εδάφους της λεκάνης είναι 18.66 °.



Σχήμα 9-5: Η λεκάνη απορροής του Κρικελλοποτάμου.

Το κλίμα των λεκανών ποικίλει από πολύ θερμά καλοκαίρια με πολλή υγρασία, σε ήπιους χειμώνες στις χαμηλού υψομέτρου περιοχές. Κρύοι χειμώνες κυριαρχούν στις ορεινές περιοχές, ενώ, σε ακόμα μεγαλύτερα υψόμετρα, συναντώνται χιόνια τους χειμερινούς μήνες, ενώ τα

καλοκαίρια είναι δροσερά. Βάσει των περισσότερων κλιματικών τύπων της Ελλάδας, και στις δύο λεκάνες, ο χειμώνας είναι η υγρότερη εποχή του έτους και το καλοκαίρι η ξηρότερη, ενώ το φθινόπωρο υπερέχει από πλευράς ύψους βροχής, έναντι της άνοιξης. Στις λεκάνες σημειώνονται βροχοπτώσεις με ετήσιες τιμές μεγαλύτερες από 1200 mm, ενώ εξαίρεση αποτελεί η χαμηλών υψομέτρων πεδινή περιοχή των εκβολών των ποταμών, στην οποία η μέση ετήσια τιμή βροχόπτωσης είναι περίπου 700 mm. Να σημειωθεί, ότι οι μεγάλοι όγκοι νερού βροχής οφείλονται στην επίδραση του προσανατολισμού των ορεινών όγκων της ευρύτερης περιοχής και στους υετοφόρους ανέμους (Risva, 2016).

9.5 Δεδομένα

Για τη μελέτη των λεκανών απορροής, χρησιμοποιήθηκαν τοπογραφικά και υδρομετεωρολογικά δεδομένα. Στα τοπογραφικά δεδομένα ανήκουν κλασικοί τοπογραφικοί χάρτες, ΨΜΕ και ορθοεικόνες. Πρόσφατα, προτάθηκε ένα βελτιωμένο ΨΜΕ που έγινε γνωστό ως Copernicus DEM (Fahrland, 2020). Το Ευρωπαϊκό ΨΜΕ, Copernicus EU-DEM version 1.1, με μέγεθος κανάβου ίσο με 25 m, επιλέχθηκε ως υπόβαθρο για τον υπολογισμό και εξαγωγή των μορφομετρικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής, καθώς και του υδρογραφικού δικτύου. Για την εκτίμηση της ΑΣΕ της λεκάνης απορροής χρησιμοποιήθηκαν χάρτες κλίμακας 1/50000, της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού.

Ακόμα, ως προς τα τοπογραφικά δεδομένα, χρησιμοποιήθηκαν ορθοεικόνες και δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης (εικόνες αυτής της μορφής είναι διαθέσιμες μέσω Google Earth), οι οποίες κάλυπταν την περιοχή μελέτης και συνέβαλαν στην αναγνώριση των περιοχών/κατηγοριών τοπίου. Οι τελευταίες χρησιμοποιήθηκαν, στη συνέχεια, ως δείγμα για την εκπαίδευση του ΤΝΔ. Οι ορθοεικόνες και οι δορυφορικές εικόνες διατίθενται ελεύθερα, χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν στη διαδικασία συλλογής των απαραίτητων δεδομένων για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου και, κατ' επέκταση, τη διαδικασία της χειροκίνητης ταξινόμησης.

Οι ορθοεικόνες που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούν υποπροϊόν της φωτογραμμετρικής διαδικασίας κατασκευής ΨΜΕ μέσω της χρήσης φωτογραμμετρικών μεθόδων. Είναι κλίμακας 1/5000 και η διακριτική τους ικανότητα είναι 0.50 m, γεγονός που επιτρέπει την ορθή αντιπροσώπευση κάθε κατηγορίας τοπίου στο δείγμα εκπαίδευσης. Η χρήση των ορθοεικόνων είναι αναγκαία μιας και επιτρέπει τη συλλογή ενός σημαντικού αριθμού σημείων, γρήγορα και με χαμηλό κόστος, ενώ, παράλληλα, προσφέρει το πλεονέκτημα του χαμηλότερου χρόνου επεξεργασίας σε σχέση με τη συλλογή δεδομένων πεδίου. Τα σημεία αυτά χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εκπαίδευσης του ΤΝΔ.

Επίσης, χρησιμοποιήθηκε το αρχείο χρήσεων γης που καλύπτει την περιοχή μελέτης, δηλαδή τις λεκάνες των ποταμών Ευήνου, Αγραφιώτη και Κρικελιώτη, έτσι όπως αυτές ορίζονται σύμφωνα με το πρόσφατο πακέτο δεδομένων Corine Land Cover του 2018. Από το συγκεκριμένο πακέτο χρήσεων γης, μόνον η βλάστηση είναι απαραίτητη για την ταξινόμηση, και, γι' αυτό, αυτή απομονώθηκε από τα υπόλοιπα δεδομένα χρήσεων γης.

Ως προς τα υδρομετεωρολογικά δεδομένα, αυτά καλύπτουν την περίοδο από το 1977–78 έως το 1985–86, και περιλαμβάνουν ημερήσια ύψη βροχόπτωσης, προερχόμενα από 5 μετεωρολογικούς σταθμούς, μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες αέρα, προερχόμενες από 5 σταθμούς, και μέσες ημερήσιες παροχές, μετρημένες στη θέση Πόρος Ρηγανίου (στόμιο εξόδου της λεκάνης απορροής του π. Ευήνου), στη θέση Γέφυρα Βαρβαριάδας (στόμιο εξόδου της λεκάνης απορροής του π. Αγραφιώτη) και στη θέση Γέφυρα Δομνίστας (στόμιο εξόδου της

λεκάνης απορροής του π. Κρικελιώτη). Οι βροχομετρικοί σταθμοί των οποίων τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής: Πόρος Ρηγανίου, Ανάληψη, Γρηγόριο, Δρυμόνας, Αράχοβα, Γραμμένη Οξιά, Επινιανά, Τροβάτο, Μοναστηράκι και Κρίκελλο. Σύμφωνα και με τα διαθέσιμα δεδομένα, επιλέγεται η ημερήσια χρονική κλίμακα για όλα τα υδρομετεωρολογικά δεδομένα.

9.6 Αποτελέσματα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθοδολογίας που περιγράφεται στο εδάφιο 5.6.2. Αρχικά, για την προετοιμασία των τοπογραφικών δεδομένων, το ΨΜΕ διορθώνεται ως προς τα πιθανά βυθίσματα και τις ασυνέχειες, που ίσως παρουσιάζει. Με βάση το διορθωμένο υδρολογικά ΨΜΕ, στο οποίο όλα τα κελιά αποστραγγίζονται στην έξοδο της λεκάνης, υπολογίστηκαν τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, χωρικά κατανεμημένα σε μορφή κανάβου. Αυτά είναι η κλίση του εδάφους (ground slope), ο προσανατολισμός των κελιών (aspect), ο δείκτης HAND, και η απόσταση των κελιών της λεκάνης από τον πλησιέστερο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου.

Προηγουμένως, για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου των λεκανών απορροής από το ΨΜΕ, εφαρμόζεται η προταθείσα μέθοδος της Ανάντη Συμβάλλουσας Έκτασης (ΑΣΕ), όπως περιγράφεται από τους Parageorgaki and Nalbantis (2018) και συνοψίζεται στο εδάφιο 5.3.2. Στο στάδιο αυτό της γενικότερης διαδικασίας, αρχικά, εντοπίστηκαν οι κεφαλές του υδρογραφικού δικτύου στους χάρτες κλίμακας 1/50000 για τις δύο περιόδους, υγρή και ξηρή, και υπολογίστηκε η ΑΣΕ για κάθε περίοδο, ως η διάμεση τιμή των εκτάσεων ανάντη των κεφαλών των ρεμάτων. Επιπλέον των δύο διάμεσων τιμών ΑΣΕ για κάθε περίοδο, ο μέσος όρος των δύο τελευταίων τιμών υπολογίζεται και αναφέρεται ως ο μέσος όρος των ΑΣΕ των δύο περιόδων, της υγρής και της ξηρής. Καθεμία από τις τρεις ΑΣΕ (διάμεση της υγρής περιόδου, διάμεση της ξηρής περιόδου και μέσος όρος των δύο προηγούμενων διάμεσων τιμών) χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου της αντίστοιχης περιόδου (υγρής, ξηρής, ενδιάμεσης).

Να σημειωθεί, ότι η εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου, και ο υπολογισμός της κλίσης του εδάφους και του προσανατολισμού, έγιναν σε περιβάλλον GIS, ενώ ο υπολογισμός του δείκτη HAND και της απόστασης από τον πλησιέστερο κλάδο, έγιναν στο μαθηματικό πακέτο MatLab (v. 2021).

Ο μέσος όρος της ΑΣΕ για τη λεκάνη του π. Ευήνου είναι ίσος με 1383 κελιά. Επίσης στο MatLab, εκτελέστηκαν όλα τα στάδια της επιβλεπόμενης ταξινόμησης, όπως η βαθμονόμηση, η επαλήθευση (επικύρωση) και η εφαρμογή της στο σύνολο της λεκάνης απορροής, καθώς και στις δύο άλλες λεκάνες απορροής.

Κατά τη μελέτη της επιβλεπόμενης ταξινόμησης δοκιμάστηκαν πολλά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Τα επικρατέστερα σενάρια θα περιγραφούν στη συνέχεια, ενώ λεπτομερή αποτελέσματα θα παρουσιαστούν μόνον για τις τελικές αποφάσεις που λήφθηκαν.

Από την επιβλεπόμενη ταξινόμηση της λεκάνης απορροής του π. Ευήνου, αναγνωρίστηκαν 4 κατηγορίες τοπίου. Στην πρώτη κατηγορία τοπίου (class 1), που ονομάζεται «γυμνό έδαφος», ανήκουν περιοχές της λεκάνης με γυμνό έδαφος ή/και βράχια. Συνήθως, βρίσκονται στα πιο ορεινά τμήματα της λεκάνης και χαρακτηρίζονται από απότομες κλίσεις εδάφους. Η δεύτερη κατηγορία ονομάζεται «δασωμένες πλαγιές» (class 2), και σε αυτή ανήκουν περιοχές οι οποίες βρίσκονται σε ενδιάμεσα υψόμετρα με ηπιότερες κλίσεις εδάφους, πιθανότατα κοντά σε μισγάγγειες και τείνουν να είναι καλυμμένες από δάση. Στην τρίτη κατηγορία εδάφους, που

ονομάζεται «καλλιεργούμενες πλαγιές» (class 3), ανήκουν περιοχές με σχεδόν επίπεδα εδάφη, τα οποία έχουν ενδιάμεσα υψόμετρα ή και χαμηλά (π.χ. στους πρόποδες των βουνών) και πιθανότατα νότιο προσανατολισμό, μιας και ο προσανατολισμός αυτός χαρακτηρίζει τις περιοχές με αποδοτικότερες καλλιέργειες. Στην τέταρτη κατηγορία τοπίου (class 4), που ονομάζεται «παρόχθιες περιοχές», ανήκουν περιοχές κυρίως σε κοντινή απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο και σε χαμηλά υψόμετρα.

Για τις ανάγκες της υδρολογικής προσομοίωσης στο μοντέλο, οι λεκάνες χωρίστηκαν σε υψομετρικές ζώνες κυμαινόμενων ορίων, σύμφωνα με τους πίνακες 9-1, 9-2 και 9-3 που ακολουθούν. Επίσης, παρουσιάζονται τα ποσοστά κάθε κατηγορίας τοπίου, σε κάθε υψομετρική ζώνη.

Πίνακας 9-1: Υψομετρική κατανομή κατηγοριών τοπίου λεκάνης Ευήνου.

Ζώνη	Κάτω	Άνω	Ποσοστό έκτασης στη ζώνη για κάθε κατηγορία τοπίου			
	όριο (m)	όριο (m)	1	2	3	4
1	135*	500	0.0	5.5	1.8	4.3
2	500	700	0.0	10.1	1.3	1.8
3	700	900	0.8	13.2	1.0	1.6
4	900	1100	2.3	14.3	2.0	0.6
5	1100	1300	4.5	11.7	3.1	0.0
6	1300	1500	6.1	5.4	1.2	0.0
7	1500	1700	3.6	1.2	0.3	0.0
8	1700	2382**	2.2	0.1	0.0	0.0
ΣΥΝΟΛΑ			19.5	61.6	10.6	8.3
Σημ.	*	Υψόμετρο στομίου εξόδου				
	**	Μέγιστο υψόμετρο				

Όμοια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις άλλες δύο λεκάνες απορροής. Τα αποτελέσματα αυτής, δηλαδή τα ποσοστά της κάθε λεκάνης απορροής των ποταμών σε κάθε υψομετρική ζώνη παρουσιάζονται στους πίνακες 9-2 και 9-3.

Πίνακας 9-2: Υψομετρική κατανομή κατηγοριών τοπίου λεκάνης π. Αγραφιώτη.

Ζώνη	Κάτω όριο (m)	Άνω όριο (m)	Ποσοστό έκτασης στη ζώνη για κάθε κατηγορία τοπίου			
			1	2	3	4
1	394.2*	500	-	0.1	0.6	0.8
2	500	700	0.0	1.1	3.2	2.4
3	700	900	0.0	6.1	5.4	2.9
4	900	1100	0.4	15.7	4.6	3.7
5	1100	1300	1.7	21.8	2.7	1.8
6	1300	1600	4.5	7.2	0.9	0.3
7	1600	1900	4.2	6.6	0.0	-
8	1900	2117.7**	0.6	0.7	-	-
ΣΥΝΟΛΑ			11.4	59.3	17.4	11.9
Σημ.	*	Υψόμετρο εξόδου	στομίου			
	**	Μέγιστο υψόμετρο				

Πίνακας 9-3: Υψομετρική κατανομή κατηγοριών τοπίου λεκάνης π. Κρικελιώτη.

Ζώνη	Κάτω όριο (m)	Άνω όριο (m)	Ποσοστό έκτασης στη ζώνη για κάθε κατηγορία τοπίου			
			1	2	3	4
1	798.4*	900	-	0.07	0.98	1.84
2	900	1100	-	0.23	12.30	4.81
3	1100	1300	-	0.89	25.83	4.23
4	1300	1600	0.24	9.33	27.27	1.70
5	1600	1907.9**	0.48	8.45	0.89	0.46
ΣΥΝΟΛΑ			0.72	18.97	67.27	13.04
Σημ.	*	Υψόμετρο εξόδου	στομίου			
	**	Μέγιστο υψόμετρο				

9.6.1 Κλάσεις

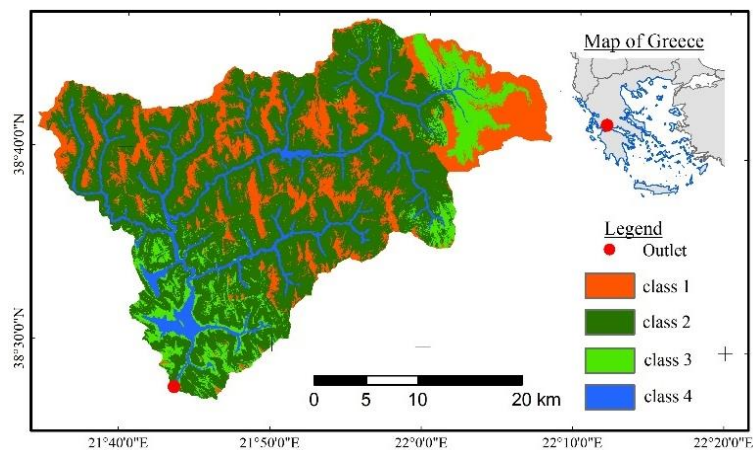
Η χωρική κατανομή των 4 κατηγοριών τοπίου, όπως αυτή προέκυψε μετά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της επιβλεπόμενης ταξινόμησης στο χώρο, φαίνεται στο Σχήμα 9-6, για την λεκάνη απορροής του π. Ευήνου. Όμοια, στο Σχήμα 9-7 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των 4 κατηγοριών τοπίου για την λεκάνη απορροής του π. Αγραφιώτη και στο Σχήμα 9-8 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των 4 κατηγοριών τοπίου για την λεκάνη απορροής του π. Κρικελιώτη.

Οι κατηγορίες τοπίου συναρτώνται, στη συνέχεια, με αδιαμέριστα υδρολογικά μοντέλα τα οποία συναποτελούν το ημικαταναμημένο μοντέλο βροχόπτωσης απορροής FLEX-Topo, καθώς, μέσω αυτών, εκφράζεται η πολυπλοκότητα της υδρολογικής συμπεριφοράς της εξεταζόμενης λεκάνης.

Οι κατηγορίες τοπίου ορίζονται σε κάθε εξεταζόμενη λεκάνη απορροής, με την εφαρμογή ενός ΤΝΔ. Το ΤΝΔ εκπαιδεύεται και ελέγχεται μέσω της χωρικής πληροφορίας που αντλείται από

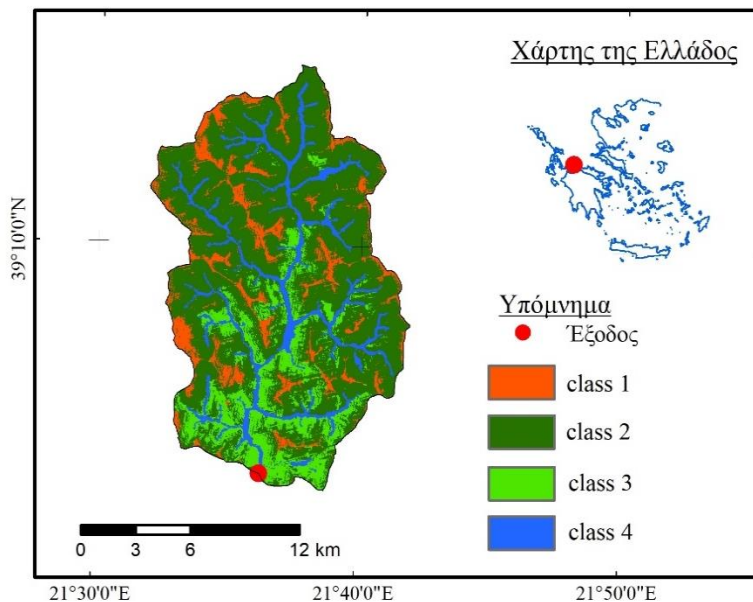
το ΨΜΕ της κάθε λεκάνης απορροής, και, επομένως για κάθε λεκάνη απορροής χρησιμοποιείται πληροφορία σχετική με το γήινο ανάγλυφο. Να σημειωθεί ότι οι λεκάνες απορροής θεωρούνται μη μετρούμενες από υδρολογική άποψη, ενώ η χωρική πληροφορία είναι απαραίτητη και πάντα διαθέσιμη.

Για την λεκάνη απορροής του π. Ευήνου χρησιμοποιήθηκαν 1000 περίπου σημεία για την εκπαίδευση του ΤΝΔ. Τα ποσοστά της λεκάνης απορροής του Ευήνου σε κάθε κατηγορία τοπίου είναι 19.5%, 61.6%, 10.6% και 8.3% για τις κατηγορίες class 1, class 2, class 3, και class 4, αντίστοιχα.



Σχήμα 9-6: Χωρική κατανομή των τεσσάρων κατηγοριών τοπίου στη λεκάνη απορροής του π. Ευήνου.

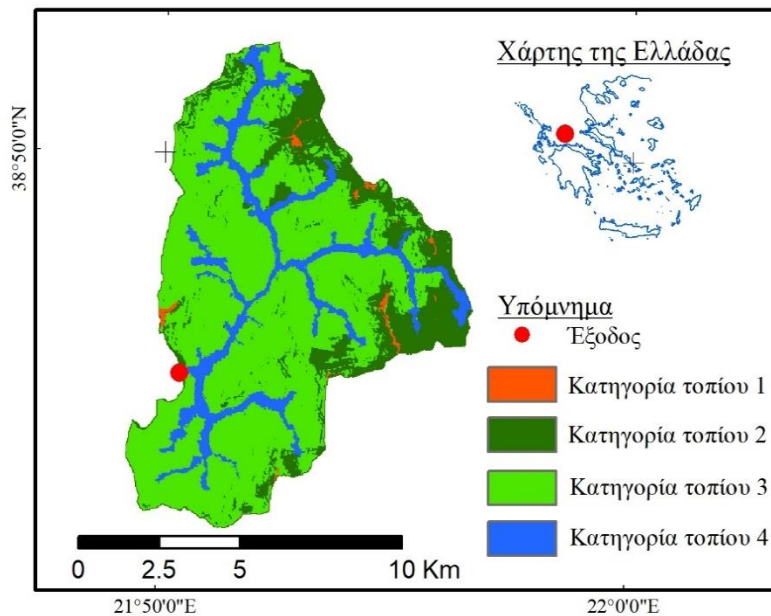
Μετά τη συλλογή ενός δείγματος 900 περίπου σημείων και την εκπαίδευση και την εφαρμογή του ΤΝΔ, τα ποσοστά της λεκάνης απορροής του π. Αγραφιώτη στις τέσσερις κατηγορίες τοπίου είναι 9.73%, 66.38%, 14.11% και 9.78% για τις κατηγορίες class 1, class 2, class 3, και class 4, αντίστοιχα (Σχήμα 9-7).



Σχήμα 9-7: Χωρική κατανομή των τεσσάρων κατηγοριών τοπίου στη λεκάνη απορροής του π. Αγραφιώτη.

Όμοια, για τη λεκάνη απορροής του π. Κρικελιώτη χρησιμοποιήθηκαν περίπου 1300 σημεία και προέκυψαν τα ποσοστά της λεκάνης απορροής στις τέσσερις κατηγορίες τοπίου ως εξής:

0.72%, 18.97%, 67.27% και 13.04% για τις κατηγορίες class 1, class 2, class 3, και class 4, αντίστοιχα (Σχήμα 9-8).



Σχήμα 9-8: Χωρική κατανομή των τεσσάρων κατηγοριών τοπίου στη λεκάνη απορροής του π. Κρικελιώτη.

Στην πρώτη κατηγορία τοπίου αναμένεται η συγκράτηση (interception) του νερού από φυσικά εμπόδια να είναι αμελητέα, λόγω απουσίας φυτών και του ριζικού συστήματος αυτών. Τα εδάφη της κατηγορίας αυτής χαρακτηρίζονται από ένα λεπτό στρώμα που καλύπτει εν μέρει το βραχώδες υπόστρωμα. Σε αυτή την κατηγορία αποδίδονται δύο μηχανισμοί γένεσης της απορροής, οι οποίοι περιγράφουν τα αναμενόμενα κυρίαρχα καθεστάτα απορροής, την επιφανειακή απορροή κατά Horton (Hortonian overland flow, HOF), και την κορεσμένη επιφανειακή απορροή (Saturated overland flow, SOF). Ένα μέρος, της επιφανειακής απορροής είναι πιθανό να κατεισδύσει τοπικά, τροφοδοτώντας έτσι τις πλαγιές και τα υπόγεια νερά, ενώ το υπόλοιπο μέρος της επιφανειακής απορροής καταλήγει στο υδρογραφικό δίκτυο μεταφέροντας αυξημένες ποσότητες φερτών υλικών.

Οι κατηγορίες τοπίου «Δασωμένες Πλαγιές» και «Καλλιεργούμενες Πλαγιές», παρουσιάζουν ως κυρίαρχο καθεστώς την υποερμική ροή (subsurface storm flow ή interflow, SSF), το οποίο είναι αποτέλεσμα ενός ισχυρού υπεδάφιου δικτύου αποστράγγισης που επηρεάζει τον μηχανισμό σχηματισμού απορροής επί πλαγιάς (Beven and Germann, 2013). Είναι αναμενόμενο ότι οι Δασωμένες Πλαγιές χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης και μεγαλύτερα ποσοστά διαπνοής από ό,τι συμβαίνει στις Καλλιεργούμενες Πλαγιές, λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους των φύλλων των δέντρων και του βαθύτερου ριζικού συστήματος που έχει αναπτυχθεί στις πρώτες από τις παραπάνω περιοχές αυτές.

Στην τελευταία, την τέταρτη κατηγορία τοπίου, δηλαδή τις «παρόχθιες περιοχές», ο κυρίαρχος μηχανισμός γένεσης της απορροής είναι η κορεσμένη επιφανειακή απορροή, λόγω της γειτνίασης με το υδρογραφικό δίκτυο, του μικρό βάθους των υπόγειων υδάτων και της υψηλής εδαφικής υγρασίας. Για τους ίδιους λόγους, τα ποσοστά εξάτμισης είναι μεγαλύτερα στις παρόχθιες περιοχές. Επιπλέον, δεδομένης της μικρής απόστασης από το υδρογραφικό δίκτυο, ο χρόνος υστέρησης για τη δημιουργία της απορροής μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος σε καθημερινή κλίμακα.

Ως προς τη διαδικασία της επιβλεπόμενης ταξινόμησης, χρησιμοποιήθηκαν όλα τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής που είναι τα εξής: η κλίση του εδάφους, υπολογισμένη από το υδρολογικά διορθωμένο ΨΜΕ, ο προσανατολισμός των κελιών της λεκάνης (aspect), η βλάστηση, ο δείκτης HAND της λεκάνης απορροής, υπολογισμένος όταν για το υδρογραφικό δίκτυο έχει χρησιμοποιηθεί ως κατώφλι η μέση τιμή της ΑΣΕ της υγρής και της ξηρής περιόδου) και η υδρολογική απόσταση, η οποία είναι υπολογισμένη με το ίδιο υδρογραφικό δίκτυο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στον υπολογισμό του δείκτη HAND.

Να σημειωθεί, ότι ο προσανατολισμός των κελιών της λεκάνης (aspect), ουσιαστικά είναι η γωνία προσανατολισμού σε μοίρες που έχει η κλίση του κελιού προς τα χαμηλότερα υψόμετρα. Για τη βόρεια διεύθυνση, η τιμή είναι μηδέν, και η γωνία αυξάνει κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Στην περίπτωση κατά την οποία η επιφάνεια του κελιού είναι επίπεδη, η τιμή του aspect είναι ίση με 1000. Να σημειωθεί, ότι οι καλλιεργούμενες εκτάσεις έχουν συνήθως νότιο προσανατολισμό, γεγονός που σημαίνει ότι η χρήση του προσανατολισμού ως κριτηρίου ταξινόμησης τοπίου συμβάλλει στον ξεκάθαρο διαχωρισμό της class 3 από την class 2.

9.6.2 Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο

Για την επιβλεπόμενη ταξινόμηση, τα ποσοστά επιτυχίας αυτής, υπολογίζονται μέσω των περιοχών, για τις οποίες είναι ήδη γνωστή η κατηγορία τοπίου στην οποία ανήκουν. Από το Σχήμα 9-9, φαίνεται ότι, κατά την εκτέλεση των τριών σταδίων της επιβλεπόμενης ταξινόμησης (training, validation and testing), τα ποσοστά των κελιών της λεκάνης που ταξινομήθηκαν στη σωστή κατηγορία, υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται στην διαγώνιο των πινάκων. Το συνολικό ποσοστό σωστής ταξινόμησης του συνόλου της λεκάνης απορροής, είναι 89.8% (με βάση τον Πίνακα Σύγκυσης), ποσοστό που χαρακτηρίζει την ταξινόμηση ως επιτυχημένη.

		Training Confusion Matrix				
		1	2	3	4	
Output Class	1	308 26.3%	30 2.6%	5 0.4%	6 0.5%	88.3% 11.7%
	2	47 4.0%	288 24.6%	0 0.0%	1 0.1%	85.7% 14.3%
	3	11 0.9%	0 0.0%	263 22.5%	3 0.3%	94.9% 5.1%
	4	3 0.3%	3 0.3%	2 0.2%	201 17.2%	96.2% 3.8%
		83.5% 16.5%	89.7% 10.3%	97.4% 2.6%	95.3% 4.7%	90.5% 9.5%
		1	2	3	4	
		1	2	3	4	
Output Class	1	85 25.4%	8 2.4%	3 0.9%	5 1.5%	84.2% 15.8%
	2	7 2.1%	80 23.9%	0 0.0%	0 0.0%	92.0% 8.0%
	3	6 1.8%	0 0.0%	74 22.1%	2 0.6%	90.2% 9.8%
	4	2 0.6%	0 0.0%	2 0.6%	61 18.2%	93.8% 6.2%
		85.0% 15.0%	90.9% 9.1%	93.7% 6.3%	89.7% 10.3%	89.6% 10.4%
		1	2	3	4	
		1	2	3	4	
Output Class	1	49 29.3%	5 3.0%	1 0.6%	0 0.0%	89.1% 10.9%
	2	10 6.0%	41 24.6%	0 0.0%	0 0.0%	80.4% 19.6%
	3	6 3.6%	0 0.0%	30 18.0%	1 0.6%	81.1% 18.9%
	4	1 0.6%	0 0.0%	1 0.6%	22 13.2%	91.7% 8.3%
		74.2% 25.8%	89.1% 10.9%	93.8% 6.2%	95.7% 4.3%	85.0% 15.0%
		1	2	3	4	
		1	2	3	4	
Output Class	1	442 26.4%	43 2.6%	9 0.5%	11 0.7%	87.5% 12.5%
	2	64 3.8%	409 24.4%	0 0.0%	1 0.1%	86.3% 13.7%
	3	23 1.4%	0 0.0%	367 21.9%	6 0.4%	92.7% 7.3%
	4	6 0.4%	3 0.2%	5 0.3%	284 17.0%	95.3% 4.7%
		82.6% 17.4%	89.9% 10.1%	96.3% 3.7%	94.0% 6.0%	89.8% 10.2%

Σχήμα 9-9: Πίνακες σύγκυσης (Confusion Matrices) των τριών σταδίων της ταξινόμησης και του συνόλου των δεδομένων

Έγιναν αρκετές δοκιμές ως προς τη συμβολή των κριτηρίων, για να διαπιστωθεί ποια κριτήρια είναι απαραίτητα για την περιγραφή των αντίστοιχων κατηγοριών τοπίου. Εν τέλει, η ταξινόμηση στην οποία χρησιμοποιήθηκε το σύνολο των κριτηρίων που περιγράφεται

παραπάνω, θεωρήθηκε επιτυχής. Επομένως, τα παραπάνω κριτήρια θεωρούνται όλα αναγκαία για την ταξινόμηση τοπίου μιας λεκάνης απορροής στις συγκεκριμένες κατηγορίες τοπίου.

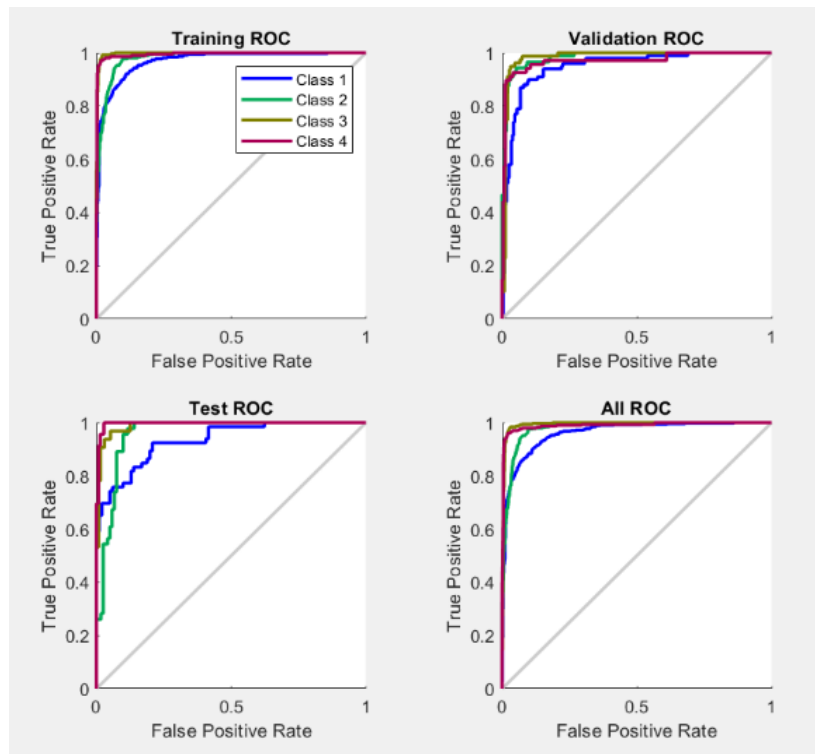
Αναλυτικότερα, για την κατηγορία «γυμνό έδαφος», το κριτήριο της κλίσης του εδάφους, η μεγάλη τιμή της υδρολογικής απόστασης και οι χρήσεις γης από το Corine, έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην κατάταξη των κελιών της λεκάνης. Η συμβολή των χρήσεων γης επιβεβαιώθηκε, μετά την προσθήκη του κριτηρίου αυτού, σε δεύτερη δοκιμή. Η χρήση του κριτηρίου αυτού αύξησε το ποσοστό επιτυχίας της ταξινόμησης για τη συγκεκριμένη κατηγορία. Ως προς τον εντοπισμό της κατηγορίας τοπίου «δασωμένες πλαγιές», αυτός έγινε με χρήση των κριτηρίων της κλίσης του εδάφους, του δείκτη HAND, και των χρήσεων γης. Η κατηγορία τοπίου «Καλλιεργούμενες πλαγιές» εντοπίστηκε κυρίως με τη χρήση των κριτηρίων της κλίσης του εδάφους, του aspect, και των χρήσεων γης.

Στην κατηγορία τοπίου «Καλλιεργούμενες πλαγιές» εντάσσονται περιοχές, οι οποίες περιγράφονται από ήπιες κλίσης εδάφους, προφανώς, λόγω διαμόρφωσης του εδάφους για την καλλιέργεια σε ενιαίες περιοχές ή σε επίπεδους αναβαθμούς, οι οποίες απέχουν συνήθως μια μέση απόσταση από το υδρογραφικό δίκτυο, γεγονός που αποτυπώνεται στο δείκτη HAND και στην υδρολογική απόσταση, και που έχουν συνήθως νότιο προσανατολισμό. Το aspect είναι σημαντικό κριτήριο για την κατάταξη αυτής της κατηγορίας τοπίου.

Η τέταρτη κατηγορία τοπίου, «παρόχθιες περιοχές», περιγράφεται με βεβαιότητα από τις μικρές τιμές του δείκτη HAND, από τις ήπιες κλίσεις εδάφους, και από τις μικρές τιμές της υδρολογικής απόστασης, μιας και η συγκεκριμένη κατηγορία τοπίου είναι σε γειτνίαση με το υδρογραφικό δίκτυο. Να σημειωθεί εδώ ότι το ανάπτυγμα του υδρογραφικού δικτύου είναι σημαντική παράμετρος για τον εντοπισμό των κελιών σε αυτή την κατηγορία, καθώς, επίσης, ότι πρέπει να γίνει έλεγχος των τιμών των χρήσεων γης, μιας και, πολύ συχνά, τα επιφανειακά ύδατα εμφανίζονται να έχουν στις χρήσεις γης σημαντικά διαφορετική χωρική κατανομή από το χρησιμοποιούμενο στη μελέτη υδρογραφικό δίκτυο.

Συμπερασματικά, να σημειωθεί ότι η βλάστηση, ως πρόσθετο κριτήριο ταξινόμησης, δοκιμάστηκε και αποδείχθηκε ότι συμβάλλει στην αύξηση της επιτυχίας της ταξινόμησης με ένα επιπλέον ποσοστό της τάξης του 4%. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν ταξινομήσεις με πολλούς συνδυασμούς κριτηρίων και αριθμού κλάσεων και φαίνεται, για τη συγκεκριμένη λεκάνη, να μπορούν να εξαχθούν με επιτυχία 3 ή 4 κατηγορίες τοπίου. Στην παρούσα διατριβή επιλέχθηκαν τελικά οι τέσσερις κατηγορίες τοπίου, μιας και η ταξινόμηση είναι πιο ρεαλιστική και πιο κοντά στην εικόνα της λεκάνης απορροής του Ευήνου, είτε μέσω της οπτικής παρατήρησης ενός έμπειρου παρατηρητή, είτε μέσω της κατανομής των χρήσεων γης.

Η ταξινόμηση διατηρήθηκε καθώς το ποσοστό επιτυχίας της ταξινόμησης, στον πίνακα του Σχήματος 9-9, είναι μεγαλύτερο από 85%. Το ποσοστό της έκτασης της λεκάνης απορροής του Ευήνου που ανήκει σε κάθε κατηγορία τοπίου, όπως αποτυπώνεται στα σχήματα 9-8 και 9-9, είναι 19.5%, 61.6% 10.6% και 8.3%, για την κατηγορία τοπίου 1, την κατηγορία τοπίου 2, την κατηγορία τοπίου 3 και την κατηγορία τοπίου 4, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 9-10, φαίνεται η σταδιακή προσαρμογή των τεσσάρων κατηγοριών τοπίου κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου της ταξινόμησης. Παρατηρείται ότι, κατά τη διάρκεια του ελέγχου, η κατηγορία τοπίου 1, με μπλε χρώμα, δεν προσαρμόζεται άμεσα, αλλά αργεί περισσότερο από τις υπόλοιπες.



Σχήμα 9-10: Η προσαρμογή και των τεσσάρων κατηγοριών τοπίου.

Για την κατανόηση των πληροφοριών που εξάγονται από τα γραφήματα του Σχήματος 9-10, είναι κρίσιμο να αναφερθούν τα παρακάτω μετρητικά στοιχεία της απόδοσης της ταξινόμησης, όπως η Καμπύλη Λειτουργικών Χαρακτηριστικών (Receiver Operating Characteristic, ROC) καθώς και η εκτίμηση της περιοχής κάτω από την καμπύλη ROC (Area Under a ROC Curve, AUC).

Η ROC είναι μια μέτρηση αξιολόγησης για προβλήματα ταξινόμησης. Πρόκειται για μια καμπύλη πιθανότητας που σχεδιάζει την εξειδίκευση (specificity) ή αλλιώς Αληθώς Θετική Αναλογία (True Positive Rate, TPR) έναντι της Ψευδούς Θετικής Αναλογίας (False Positive Rate, FPR), όπως ορίζεται στην Εξίσωση 9.1.

$$\text{Specificity} = \frac{\text{True Negative}}{\text{True Positive} + \text{False Positive}} \quad (9.1)$$

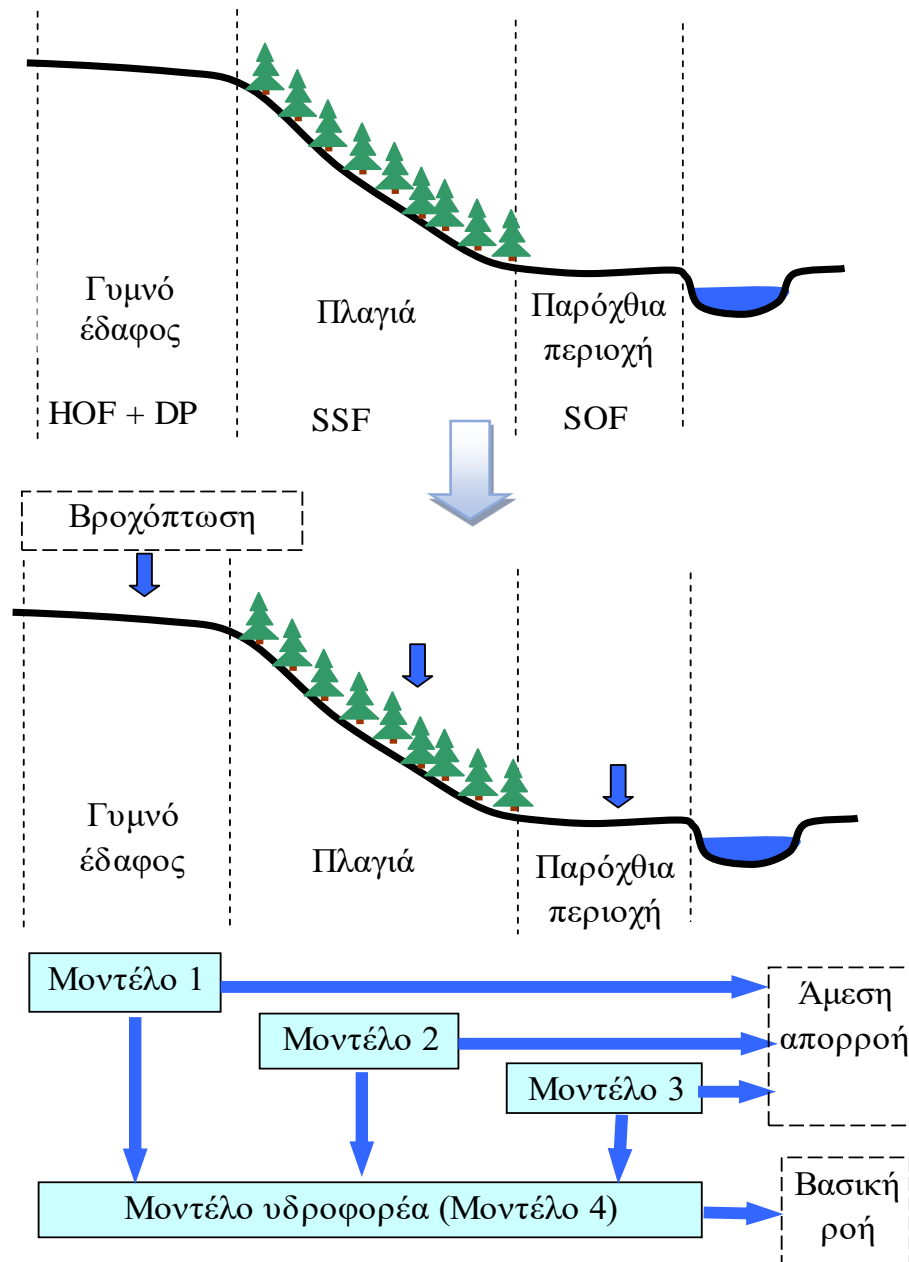
Η AUC είναι το μέτρο της ικανότητας ενός ταξινομητή να διακρίνει μεταξύ των κλάσεων και χρησιμοποιείται ως σύνοψη της καμπύλης ROC. Όσο υψηλότερη είναι η AUC, τόσο καλύτερη είναι η απόδοση του μοντέλου στη διάκριση μεταξύ θετικών και αρνητικών κλάσεων. Ο μέσος όρος της πιστότητας (Average Precision Score, AP) υπολογίζεται ως η μέση τιμή της πιστότητας (Precision, βλ. Εξίσωση 9.2) σε όλες τις κλάσεις και της συνολικής επικάλυψης που παρουσιάζουν οι κλάσεις στην ένωσή τους.

$$\text{Precision} = \frac{\text{True Positive}}{\text{True Positive} + \text{False Positive}} \quad (9.2)$$

9.6.3 Πρόβλεψη της απορροής μέσω του μοντέλου βροχόπτωσης - απορροής

Ως προς την επεξεργασία των υδρομετεωρολογικών δεδομένων, έγινε αναγωγή του χωρικά μέσου ημερήσιου ύψους βροχόπτωσης και της χωρικά μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας αέρα, στο μέσο υψόμετρο κάθε υψομετρικής ζώνης.

Σύμφωνα με τη βασική υδρολογική μονάδα τοπίου του υδρολογικού μοντέλου FLEX-Toro, δηλαδή τον συνδυασμό ενός υψιπέδου, το οποίο διαχωρίζεται από μια παρόχθια περιοχή με μία πλαγιά, σε καθένα από τα τρία στοιχεία του υδρολογικού τοπίου επιλέγεται ένα καθεστώς απορροής, το οποίο περιγράφεται από ένα αδιαμέριστο υδρολογικό μοντέλο (Σχήμα 9-11).



Σχήμα 9-11: Οι κατηγορίες τοπίου εντός του μοντέλου FLEX-Toro (προσαρμογή από Gao et al., 2014) (περίπτωση με τρεις κατηγορίες).

Μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου, για κάθε κατηγορία τοπίου, υπολογίζονται οι παράμετροι καθενός από τα επιμέρους αδιαμέριστα μοντέλα. Οι παράμετροι είναι συνολικά 21. Εξ αυτών οι 6 είναι κοινές σε όλες τις κατηγορίες, ενώ στην κατηγορία τοπίου 1, στην κατηγορία τοπίου 2, στην κατηγορία τοπίου 3, και στην κατηγορία τοπίου 4 οι επιπλέον παράμετροι είναι 4, 3, 3, και 5, αντίστοιχα.

Η επίδοση του υδρολογικού μοντέλου στη λεκάνη του π. Ευήνου με χρήση των αντίστοιχων υδρομετεωρολογικών δεδομένων περιγράφεται από τις τιμές του δείκτη NSE, όπως αυτές

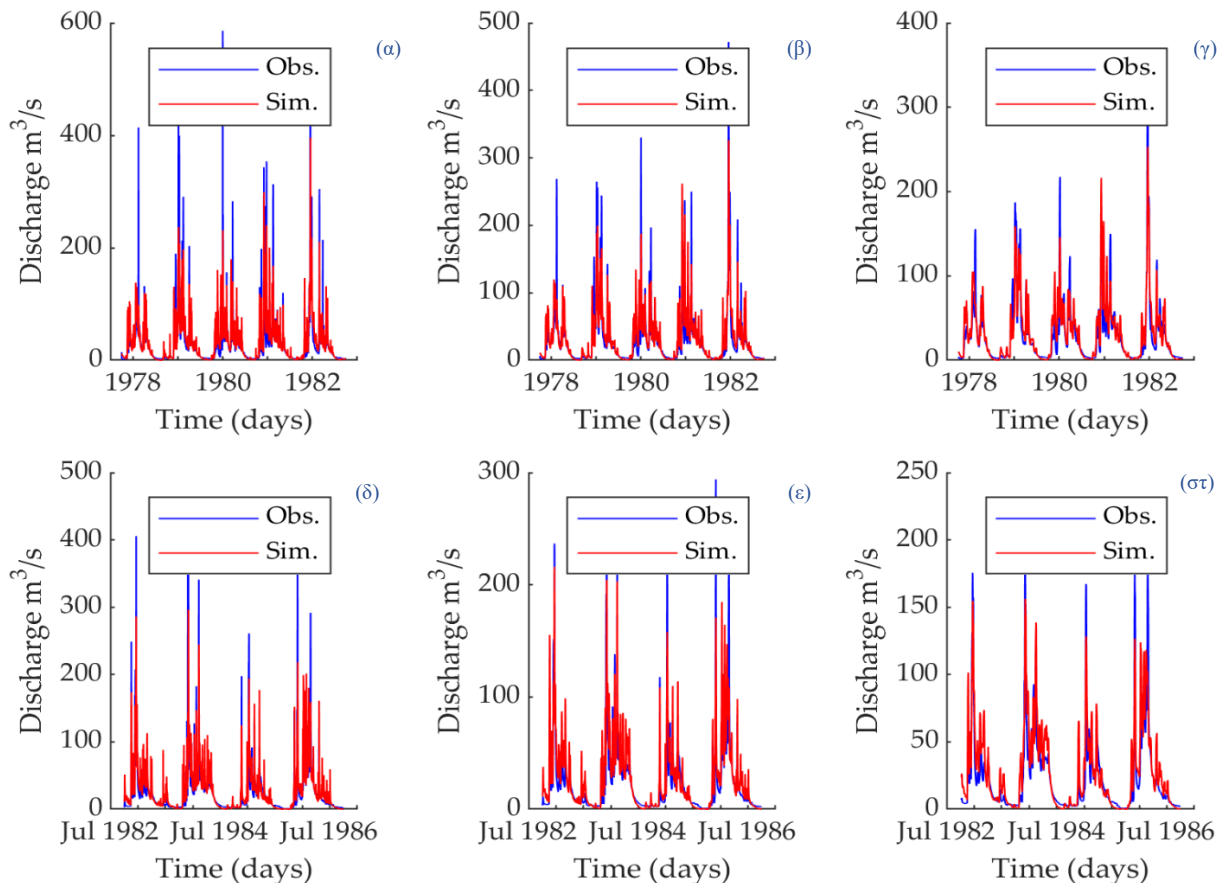
παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-4. Η βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου για την πενταετία 1977-78 έως 1981-82, έδειξε επίδοση ίση με 0.682, σύμφωνα με το δείκτη Nash Sutcliffe (NSE), ενώ κατά την επικύρωση του μοντέλου, στην υπόλοιπη τετραετία της περιόδου διαθεσιμότητας δεδομένων, η τιμή του δείκτη NSE βρέθηκε ίση με 0.631. Αντίστοιχα στον ίδιο Πίνακα, παρουσιάζεται η απόδοση του ημικατανεμημένου μοντέλου βροχόπτωσης απορροής στις παροχές που έχουν προκύψει ως κυλιόμενοι μέσοι όροι των ημερήσιων παροχών για το χρονικό παράθυρο των τριών και επτά ημερών (2η στήλη και 3η στήλη του ίδιου Πίνακα, αντίστοιχα).

Πίνακας 9-4: Οι τιμές του δείκτη NSE για τη λεκάνη απορροής του π. Ευήνου.

	Οι τιμές του δείκτη NSE στη χρονική κλίμακα (d)		
	1 ημέρα	3 ημέρες	7 ημέρες
Βαθμονόμηση 1977-78 ως 1981-82	0.682	0.804	0.855
Επαλήθευση 1982-83 ως 1985-86	0.631	0.759	0.815

Ως προς τα αποτελέσματα που αφορούν την απορροή, στο Σχήμα 9-12 παρουσιάζονται η μετρημένη (Obs.) και η μοντελοποιημένη (Sim.) ημερήσια παροχή μέσω του ημικατανεμημένου μοντέλου, για την λεκάνη του π. Ευήνου, για ημερήσιο χρονικό βήμα, και για τους κυλιόμενους μέσους όρους των ημερήσιων παροχών για το χρονικό παράθυρο των τριών και επτά ημερών, για την χρονική περίοδο της βαθμονόμησης και τη χρονική περίοδο της επαλήθευσης.

Στο Σχήμα 9-12 παρουσιάζονται τα υδρογραφήματα για τα στάδια της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στον Πίνακα πιο πάνω (Πίνακας 9-4). Αναλυτικότερα, για το ίδιο σχήμα (Σχήμα 9-12) τα υδρογραφήματα (α), (β), (γ) αφορούν τη χρονική περίοδο της βαθμονόμησης από το 1977-78 ως 1981-82, τα υδρογραφήματα (δ), (ε), (στ) αφορούν τη χρονική περίοδο της επαλήθευσης από το 1982-83 ως 1985-86 της λεκάνης απορροής του π. Ευήνου σύμφωνα με τη χρήση των υδρομετεωρολογικών δεδομένων, που καλύπτουν 9 υδρολογικά έτη. Να σημειωθεί ότι η δεύτερη στήλη αφορά τα υδρογραφήματα, όπως αυτά προκύπτουν με την εφαρμογή των κυλιόμενων μέσων όρων των ημερήσιων παροχών για το χρονικό παράθυρο των τριών ημερών, δηλαδή τα υδρογραφήματα του Σχήματος 9-12 (β), (ε) για τη χρονική περίοδο της βαθμονόμησης (υδρογράφημα (β)), και τη χρονική περίοδο της επαλήθευσης (υδρογράφημα (ε)). Όμοια, η τρίτη στήλη αφορά τα υδρογραφήματα, όπως αυτά προκύπτουν με την εφαρμογή των κυλιόμενων μέσων όρων της ημερήσιας παροχής για το χρονικό παράθυρο των επτά ημερών, δηλαδή τα υδρογραφήματα (γ), (στ) για τη χρονική περίοδο της βαθμονόμησης (υδρογράφημα (γ)), και τη χρονική περίοδο της επαλήθευσης (υδρογράφημα (στ)).



Σχήμα 9-12: Οι μετρημένες (Obs.), με μπλε γραμμή, και οι μοντελοποιημένες (Sim.) παροχές, με κόκκινη γραμμή, για την λεκάνη του π. Ευήνου.

Η επίδοση του ημικαταναμημένου μοντέλου βροχόπτωσης απορροής στη λεκάνη του π. Αγραφιώτη περιγράφεται από τις τιμές του δείκτη NSE, όπως αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-6. Η βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου για την τετραετία 1979-80 έως 1982-83, έδειξε επίδοση ίση με 0.396, σύμφωνα με το δείκτη Nash Sutcliffe (NSE), ενώ κατά την επικύρωση του μοντέλου, στην υπόλοιπη πενταετία της περιόδου διαθεσιμότητας δεδομένων, η τιμή του δείκτη NSE βρέθηκε ίση με 0.451. Για τη λεκάνη απορροής του π. Αγραφιώτη ελέγχθηκαν δύο περιπτώσεις, μετά τα στάδια της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης (1) η περίπτωση προσομοίωσης των παροχών της λεκάνης με τις δικές τις παραμέτρους, έτσι δηλαδή όπως αυτές προέκυψαν μετά τη βαθμονόμηση, και (2) η περίπτωση προσομοίωσης των παροχών της λεκάνης με χρήση των παραμέτρων της δότριας λεκάνης απορροής, που στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι η λεκάνη απορροής του π. Ευήνου. Σύμφωνα με τον δείκτη NSE, η προσομοίωση της λεκάνης του π. Αγραφιώτη με τις δικές της παραμέτρους, επιστρέφει τιμή NSE ίση με 0.42, ενώ η προσομοίωση με τη χρήση των παραμέτρων της λεκάνης του π. Ευήνου επιστρέφει τιμή NSE ίση με 0.26.

Αντίστοιχα στον ίδιο Πίνακα, παρουσιάζεται η επίδοση του ημικαταναμημένου μοντέλου βροχόπτωσης απορροής στις παροχές που έχουν προκύψει ως κυλιόμενοι μέσοι όροι για το χρονικό παράθυρο των τριών ημερών και επτά ημερών (2η στήλη και 3η στήλη του ίδιου Πίνακα, αντίστοιχα).

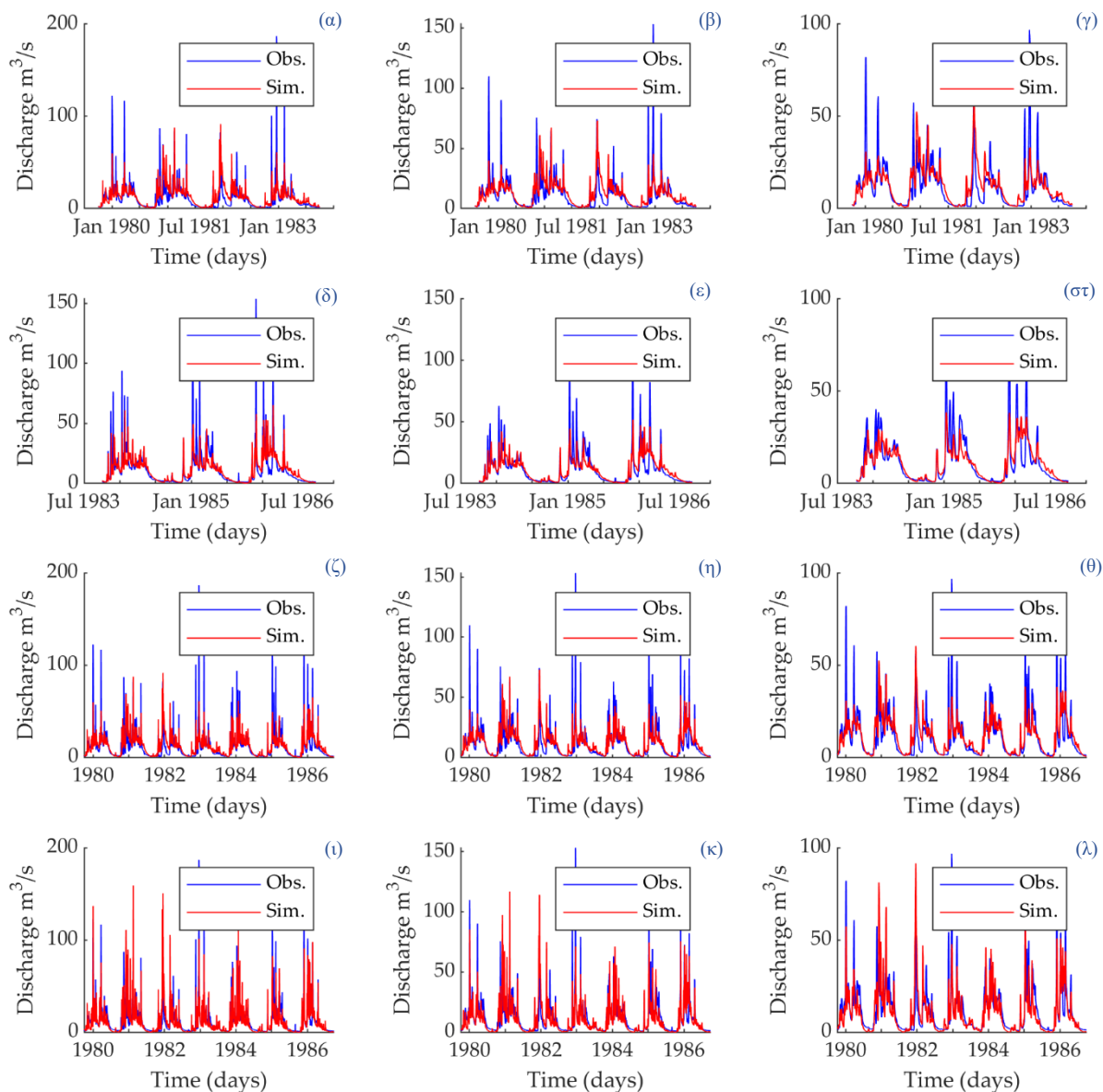
Πίνακας 9-5: Οι τιμές του δείκτη NSE για τη λεκάνη απορροής του π. Αγραφιώτη.

	Οι τιμές του δείκτη NSE στη χρονική κλίμακα (d)		
	1	3	7
Βαθμονόμηση 1979-80 ως 1982-83	0.396	0.480	0.543
Επαλήθευση 1982-83 ως 1985-86	0.451	0.590	0.691
Προσομοίωση με δικές της παραμέτρους 1979-80 ως 1985-86	0.420	0.529	0.610
Προσομοίωση με παραμέτρους λεκάνης Ευήνου 1979-80 ως 1985-86	0.260	0.464	0.580

Ως προς τα αποτελέσματα που αφορούν την απορροή, στο Σχήμα 9-13 παρουσιάζονται η μετρημένη (Obs.) και η μοντελοποιημένη (Sim.) απορροή του ημικαταναμημένου μοντέλου, για την λεκάνη του π. Αγραφιώτη, με ημερήσιο χρονικό βήμα, και κυλιόμενο μέσο όρο των ημερήσιων παροχών για το χρονικό παράθυρο των τριών ημερών και επτά ημερών, για την χρονική περίοδο της βαθμονόμησης, της επαλήθευσης και της προσομοίωσης με τις δικές της παραμέτρους (παραμέτροι λεκάνης π. Αγραφιώτη), καθώς και της προσομοίωσης με τις παραμέτρους της δότριας λεκάνης (λεκάνη του π. Ευήνου).

Στο Πίνακα 9-7 παρουσιάζονται τα υδρογραφήματα για τα στάδια της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 9-5). Αναλυτικότερα, για το Σχήμα 9-13, τα υδρογραφήματα (α), (β), (γ) αφορούν τη χρονική περίοδο της βαθμονόμησης από το 1979-80 ως 1982-83, τα υδρογραφήματα (δ), (ε), (στ) αφορούν τη χρονική περίοδο της επαλήθευσης από το 1982-83 ως 1985-86 της λεκάνης απορροής του π. Αγραφιώτη σύμφωνα με τη χρήση των υδρομετεωρολογικών δεδομένων, που καλύπτουν 9 υδρολογικά έτη. Να σημειωθεί ότι η δεύτερη στήλη του Σχήματος 9-13 αφορά τα υδρογραφήματα, όπως αυτά προκύπτουν με την εφαρμογή των κυλιόμενων μέσων όρων της ημερήσιας παροχής για το χρονικό παράθυρο τριών ημερών, δηλαδή τα υδρογραφήματα στο Σχήμα 9-13 (β), (ε), (η) και (κ) για το στάδιο, το οποίο εξετάζεται κάθε φορά. Όμοια, η τρίτη στήλη του ίδιο σχήματος αφορά τα υδρογραφήματα, όπως αυτά προκύπτουν με την εφαρμογή των κυλιόμενων μέσων όρων της ημερήσιας παροχής για το κυλιόμενο χρονικό παράθυρο των επτά ημερών, δηλαδή τα υδρογραφήματα του Σχήματος 9-13 (γ), (στ), (θ) και (λ).

Από τα υδρογραφήματα για τη λεκάνη απορροής του π. Αγραφιώτη, υπολογίζεται η ποσοστιαία διαφορά (%) του δείκτη NSE μεταξύ της περίπτωσης με προσομοίωση για τη χρονική περίοδο 1979-80 ως 1985-86 με την εφαρμογή των παραμέτρων της λεκάνης απορροής του π. Αγραφιώτη και με εφαρμογή των παραμέτρων της λεκάνης απορροής του π. Ευήνου. Οι τιμές της ποσοστιαίας διαφοράς για τις ημερήσιες παροχές, τον κυλιόμενο μέσο όρο για το χρονικό παράθυρο των τριών ημερών και τον κυλιόμενο μέσο όρο για το χρονικό παράθυρο των επτά ημερών είναι μειωμένες κατά 38.1%, 12.3% και 4.9% αντίστοιχα.



Σχήμα 9-13: Οι μετρημένες (Obs.), με μπλε γραμμή, και οι μοντελοποιημένες (Sim.) παροχές, με κόκκινη γραμμή, για την λεκάνη του π. Αγραφιώτη.

Η επίδοση του ημικατανεμημένου μοντέλου βροχόπτωσης απορροής στη λεκάνη του Κρικελοπόταμου περιγράφεται από τις τιμές του δείκτη NSE, όπως αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-6. Η βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου για την χρονική περίοδο 1977-78 έως 1979-80, έδειξε επίδοση ίση με 0.402, σύμφωνα με το δείκτη Nash Sutcliffe (NSE), ενώ κατά την επικύρωση του μοντέλου, την χρονική περίοδο 1982-83 έως 1985-86, η τιμή του δείκτη NSE βρέθηκε ίση με 0.312. Για τη λεκάνη απορροής του Κρικελοπόταμου ελέγχθηκαν επίσης δύο περιπτώσεις, μετά τα στάδια βαθμονόμησης και επαλήθευσης (1) η περίπτωση της προσομοίωσης των παροχών της λεκάνης με χρήση των παραμέτρων της δότριας λεκάνης απορροής, που, στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι η λεκάνη απορροής του π. Αγραφιώτη, για τη χρονική περίοδο 1977-78 έως 1979-80, και (2) η περίπτωση της προσομοίωσης των παροχών της λεκάνης με χρήση των παραμέτρων της δότριας λεκάνης απορροής (λεκάνη του π. Αγραφιώτη), για τη χρονική περίοδο 1982-83 έως 1985-86. Αντίστοιχα στον ίδιο πίνακα, παρουσιάζεται η απόδοση του ημικατανεμημένου μοντέλου βροχόπτωσης απορροής στις παροχές που έχουν προκύψει ως κυλιόμενοι μέσοι όροι τριμήνου και επταήμερου (2^η στήλη και 3^η στήλη του ίδιου πίνακα, αντίστοιχα).

Πίνακας 9-6: Οι τιμές του δείκτη NSE για τη λεκάνη απορροής του Κρικελλοπόταμου.

	Οι τιμές του δείκτη NSE στη χρονική κλίμακα (d)		
	1	3	7
Βαθμονόμηση 1977-78 ως 1979-80	0.402	0.504	0.561
Επαλήθευση 1982-83 ως 1985-86	0.312	0.396	0.463
Προσομοίωση με παραμέτρους λεκάνης Αγραφιώτη 1977-78 ως 1979-80	0.312	0.393	0.438
Προσομοίωση με παραμέτρους λεκάνης Αγραφιώτη 1982-83 ως 1985-86	0.363	0.434	0.495

Ως προς τα αποτελέσματα που αφορούν την απορροή, στο Σχήμα 9-14 παρουσιάζονται η μετρημένη (Obs.) και η μοντελοποιημένη (Sim.) απορροή του ημικατανεμημένου μοντέλου, για την λεκάνη του Κρικελλοπόταμου, με ημερήσιο χρονικό βήμα, και κυλιόμενο μέσο όρο των παροχών για το χρονικό παράθυρο των τριών και επτά ημερών, για την χρονική περίοδο της βαθμονόμησης, της επαλήθευσης, και της προσομοίωσης με τις παραμέτρους της δότριας λεκάνης (μεταφορά παραμέτρων από τη λεκάνη του π. Αγραφιώτη) για την περίοδο 1977-78 έως 1979-80 και της προσομοίωσης με τις παραμέτρους της δότριας λεκάνης για την περίοδο 1982-83 έως 1985-86.

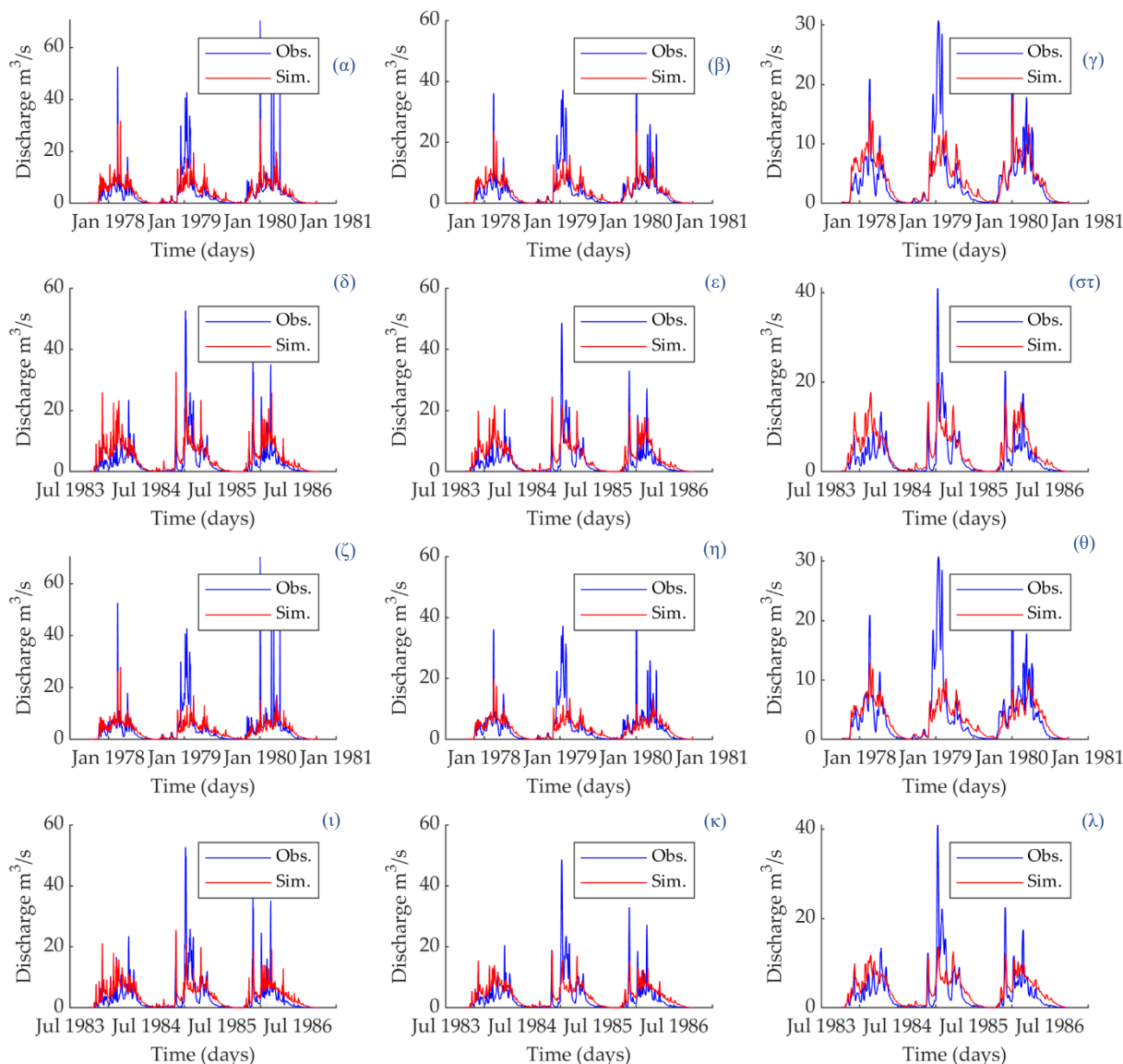
Στο Σχήμα 9-14 Σχήμα 9-8 παρουσιάζονται τα υδρογραφήματα για τα στάδια της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στον Πίνακα πιο πάνω (Πίνακας 9-6). Αναλυτικότερα, για το Σχήμα 9-14 τα υδρογραφήματα (α), (β), (γ) αφορούν τη χρονική περίοδο της βαθμονόμησης από το 1977-78 ως 1979-80, τα υδρογραφήματα (δ), (ε), (στ) αφορούν τη χρονική περίοδο της επαλήθευσης από το 1982-83 ως 1985-86 της λεκάνης απορροής του Κρικελλοπόταμου σύμφωνα με τη χρήση των υδρομετεωρολογικών δεδομένων. Να σημειωθεί ότι η δεύτερη στήλη του Σχήματος 9-14 αφορά τα υδρογραφήματα, όπως αυτά προκύπτουν με την εφαρμογή των κυλιόμενων μέσων όρων της ημερήσιας παροχής για το χρονικό παράθυρο των τριών, δηλαδή τα υδρογραφήματα Σχήμα 9-14 (β), (ε), (η) και (κ) για το στάδιο, το οποίο εξετάζεται κάθε φορά. Όμοια, η τρίτη στήλη του ίδιου σχήματος αφορά τα υδρογραφήματα, όπως αυτά προκύπτουν με την εφαρμογή των κυλιόμενων μέσων όρων της παροχής για το χρονικό παράθυρο των επτά ημερών, δηλαδή τα υδρογραφήματα του Σχήματος 9-14 (γ), (στ), (θ) και (λ).

Από τα υδρογραφήματα για τη λεκάνη απορροής του Κρικελλοπόταμου, υπολογίζεται η ποσοστιαία διαφορά (%) του δείκτη NSE μεταξύ των περιπτώσεων με προσομοίωση για το διάστημα 1977-78 ως 1979-80 με εφαρμογή των παραμέτρων της λεκάνης απορροής του π. Αγραφιώτη και με εφαρμογή παραμέτρων από βαθμονόμηση στην ίδια τη λεκάνη απορροής.

Οι τιμές της ποσοστιαίας διαφοράς του δείκτη NSE για την προσομοίωση της χρονικής περιόδου 1977-78 έως 1979-80 για τις ημερήσιες παροχές, τον κυλιόμενο μέσο όρο για το χρονικό παράθυρο των τριών ημερών και τον κυλιόμενο μέσο όρο για το χρονικό παράθυρο των επτά ημερών είναι μειωμένες κατά 22.4%, 22% και 21.9% αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι οι κυλιόμενοι μέσοι όροι επί των παροχών, δεν βελτίωσαν παρά ελάχιστα την προσαρμογή.

Οι τιμές της ποσοστιαίας διαφοράς του δείκτη NSE για την προσομοίωση της χρονικής περιόδου 1982-83 έως 1985-86 για τις ημερήσιες παροχές, τον κυλιόμενο μέσο όρο για το

χρονικό παράθυρο των τριών ημερών και τον κυλιόμενο μέσο όρο για το χρονικό παράθυρο των επτά ημερών είναι αυξημένες κατά 16.3%, 9.6% και 6.9% αντίστοιχα. Εδώ η βελτίωση με την αύξηση του εύρους του χρονικού παραθύρου είναι σημαντική.



Σχήμα 9-14: Οι μετρημένες (Obs.), με μπλε γραμμή, και οι μοντελοποιημένες (Sim.) παροχές, με κόκκινη γραμμή, για την λεκάνη του Κρικελλοποτάμου.

9.7 Σύνοψη

Η ταξινόμηση λεκανών απορροής σε κατηγορίες τοπίου θεωρείται ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο για την κατάρτιση μοντέλων βροχόπτωσης απορροής τα οποία επιτρέπουν την πρόβλεψη της υδρολογικής συμπεριφοράς των μη μετρούμενων λεκανών. Αυτό αποδείχθηκε ότι συμβαίνει με τις δοκιμαστικές λεκάνες απορροής που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εφαρμογή. Οι έλεγχοι που έγιναν, είτε για τρεις είτε για τέσσερις κατηγορίες τοπίου και διάφορους συνδυασμούς μορφομετρικών χαρακτηριστικών, αποκάλυψαν ότι απαιτούνται επιπρόσθετα δεδομένα, όπως, η βλάστηση, για την επίτευξη μιας επιτυχούς ταξινόμησης στο στάδιο επικύρωσης του μοντέλου ταξινόμησης. Το ποσοστό επιτυχίας της ταξινόμησης για τέσσερις κατηγορίες τοπίου ήταν αρκετά μικρότερο χωρίς τη συμβολή της βλάστησης ως κριτηρίου ταξινόμησης.

Επιπλέον, είναι κρίσιμο το γεγονός ότι όλα τα χρησιμοποιούμενα μορφομετρικά χαρακτηριστικά που συμμετείχαν στην ταξινόμηση, βρέθηκαν να είναι απαραίτητα για την επίτευξη μιας επιτυχημένης ταξινόμησης τοπίου. Για παράδειγμα, η συμβολή του δείκτη HAND έχει εξεταστεί σε προηγούμενες μελέτες και αναγνωρίζεται μέχρι και σήμερα, η ικανότητα του δείκτη αυτού να εντοπίζει περιοχές οι οποίες συνδέονται δυναμικά με το υδρογραφικό δίκτυο.

Ως προς την επιλογή του υδρολογικού μοντέλου για τις ανάγκες της εφαρμογής, επιδίωξη ήταν να χρησιμοποιηθεί ένα απλό, ευέλικτο μοντέλο. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε το υδρολογικό μοντέλο FLEX-Topo λόγω της σχετικά απλής δομής του. Η χρήση εντός του μοντέλου, μόνον 21 παραμέτρων, επιτρέπει τη μοντελοποίηση των διεργασιών στο περιβάλλον του MatLab.

Η ακρίβεια πρόβλεψης της απορροής με χρήση του υδρολογικού ημικαταναμημένου μοντέλου FLEX-Topo, αν και χαρακτηρίζεται ως μετρίως καλή, χρειάζεται περαιτέρω βελτίωση, π.χ. μέσω της καλύτερης εξέτασης της χωρικής διακύμανσης των δεδομένων εισόδου. Το μοντέλο FLEX-Topo είναι ελκυστικό, λόγω της απλότητας του, σε σχέση με τα άλλα μοντέλα που έχουν προτείνει συγγραφείς που έχουν ασχοληθεί με την ταξινόμηση του γήινου αναγλύφου. Η δομή του μοντέλου είναι τέτοια ώστε να προσαρμόζεται μεταξύ διαφορετικών κλιμάκων, συνθήκων και περιοχών μελέτης. Να σημειωθεί ότι η τελική μορφή του υδρολογικού μοντέλου, μετά την προσαρμογή του στις συνθήκες της λεκάνης απορροής του π. Ευήνου, αποτελεί μια ελαφρά διαφοροποιημένη προσέγγιση από αυτή του του αρχικού μοντέλου (Savenije, 2010).

Επίσης, ως προς τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται ως κριτήρια στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση τοπίου, βασικά κριτήρια θεωρούνται η κλίση του εδάφους και ο δείκτης HAND, ενώ, στη συνέχεια, προστίθενται κριτήρια ώστε να συμβάλλουν στη διάκριση μεταξύ των κατηγοριών τοπίου. Τέλος, προτείνεται η εφαρμογή επιβλεπόμενης ταξινόμησης μέσω της χρήσης ΤΝΔ.

Ως προς τη συγκεκριμένη εφαρμογή, η ταξινόμηση, με χρήση μορφομετρικών χαρακτηριστικών, σε κατηγορίες τοπίου του γήινου αναγλύφου επιπλέον λεκανών απορροής, όπως αυτών του π. Αγραφιώτη και του π. Κρικελιώτη, επιτρέπει την κατάρτιση μοντέλου βροχόπτωσης απορροής στις εν λόγω λεκάνες απορροής. Επίσης, το ΤΝΔ μελετήθηκε και εφαρμόστηκε στις συγκεκριμένες λεκάνες μέσω της χρήσης τοπικής πληροφορίας σχετικής με το γήινο ανάγλυφο της κάθε λεκάνης απορροής, ελέγχθηκε δειγματοληπτικά και επιβεβαιώθηκε η επιτυχημένη ταξινόμηση των περιοχών της κάθε λεκάνης απορροής στην κατάλληλη κατηγορία τοπίου. Ο έλεγχος του ΤΝΔ έγινε με την χρήση περίπου 1000 σημείων από κάθε λεκάνη και τα ποσοστά επιτυχούς ταξινόμησης ήταν μεγαλύτερα από 80%.

Για κάθε κατηγορία τοπίου, γίνεται υπολογισμός των παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου, η μεταφορά των οποίων σε άλλη λεκάνη επιτρέπει την πρόβλεψη της υδρολογικής συμπεριφοράς μιας μη μετρούμενης λεκάνης. Μόνη προϋπόθεση, για τη μεταφορά είναι η ταξινόμηση της λεκάνης σε κατηγορίες τοπίου με χρήση γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών, τα οποία εύκολα εξάγονται από δεδομένα από το ευρέως διαθέσιμο ΨΜΕ.

Σύμφωνα με το μεθοδολογικό πλαίσιο της υδρολογικής ταξινόμησης είναι δυνατή η μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας μεταξύ των ίδιων κατηγοριών τοπίου σε άλλες λεκάνες απορροής, καθώς οι τιμές του δείκτη NSE έχουν μικρές αριθμητικές διαφορές στην περίπτωση κατά την οποία μεταφέρονται οι παράμετροι από άλλη λεκάνη, σε σχέση με τη χρήση των παραμέτρων της βαθμονόμησης στην ίδια τη λεκάνη.

Οι διαφορές των τιμών του δείκτη NSE στην περίπτωση κατά την οποία η λεκάνη απορροής βαθμονομείται με βάση τις πραγματικές μετρημένες παροχές στην έξοδό της σε σύγκριση με

την περίπτωση κατά την οποία μεταφέρονται και χρησιμοποιούνται οι παράμετροι του μοντέλου βροχόπτωσης απορροής της δότριας λεκάνης απορροής προέκυψαν μικρές. Να σημειωθεί ότι λόγω της ποιότητας και της ακρίβειας των δεδομένων βροχόπτωσης και απορροής, οι τιμές του δείκτη NSE είναι γενικά χαμηλές αλλά αντίστοιχης τάξης μεγέθους και στις δύο περιπτώσεις.

Συμπεραίνεται από τα αποτελέσματα ότι η μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας στο πλαίσιο της ταξινόμησης των λεκανών απορροής σε κατηγορίες τοπίου ακολουθώντας όρους υδρολογικής ομοιότητας, οδηγεί σε μικρή απώλεια πληροφορίας και ασφαλή συμπεράσματα ως προς την υδρολογική συμπεριφορά της.

Η εφαρμογή κυλιόμενου μέσου όρου στις μετρημένες και μοντελοποιημένες ημερήσιες παροχές στην έξοδο των λεκανών απορροής αποδίδει ελαφρώς υψηλότερες τιμές του δείκτη NSE, όπως ήταν αναμενόμενο.

10 Εκτίμηση της επίδρασης της ακρίβειας των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους στα όρια των κατακλυζόμενων περιοχών λόγω πλημμύρας

10.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε στο Υποκεφάλαιο 5.8, η χαρτογράφηση των κατακλυζόμενων εκτάσεων λόγω πλημμύρας αποτελεί το τελευταίο στάδιο μιας υπολογιστικής διαδικασίας μετά την εκτίμηση της χωροχρονικής εξέλιξης των υδραυλικών χαρακτηριστικών μιας πλημμύρας μέσω υδρολογικών και, στη συνέχεια, υδραυλικών μοντέλων. Η κλασική αυτή προσέγγιση αποτέλεσε και αποτελεί και σήμερα τη βάση για τον σχεδιασμό έργων και την λήψη άλλων, μη κατασκευαστικών, μέτρων αντιπλημμυρικής προστασίας. Μάλιστα, αντί της μελέτης της πλήρους χωροχρονικής εξέλιξης του φαινομένου, χρησιμοποιείται μόνον η παροχή αιχμής της εξεταζόμενης πλημμύρας σε αντιπροσωπευτικές διατομές του κύριου υδατορεύματος και σε πολύ λεπτό χρονικό βήμα ώστε να προσεγγίζονται οι συνθήκες μέγιστης παροχής.

Στο κεφάλαιο εξετάζεται η επίδραση της αβεβαιότητας του ΨΜΕ στις κατακλυζόμενες εκτάσεις λόγω πλημμύρας, το οποίο ΨΜΕ χρησιμοποιείται για τη χάραξη των πλημμυρικών ορίων. Τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό αποτελούν συνέχεια εκείνων που έχουν εξαχθεί στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου με τίτλο «Επίδραση της αβεβαιότητας των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους στην αβεβαιότητα των κατακλυζόμενων εκτάσεων λόγω πλημμύρας» που ανατέθηκε από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο στο πλαίσιο του Προγράμματος Ενίσχυσης Βασικής Έρευνας (ΠΕΒΕ) τον Νοέμβριο 2009 σε ερευνητική ομάδα του Τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ με επιστημονικό υπεύθυνο τον τότε Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ Ι. Ναλμπάντη. Στο πλαίσιο της διατριβής η επίδραση της αβεβαιότητας του ΨΜΕ εξετάζεται ως προς τον προσδιορισμό των ορίων της κατακλυζόμενης ζώνης.

Η μεθοδολογία η οποία προτείνεται στο εδάφιο 5.8.3 εφαρμόζεται σε δύο λεκάνες απορροής του ελληνικού χώρου. Κατά τη χάραξη του πλημμυρικού πεδίου, η αβεβαιότητα είναι γνωστό ότι οφείλεται στα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, στα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης, και στα υδρολογικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τις υδρολογικές διεργασίες όπως π.χ., για τη διήθηση και τις συνθήκες αρχικής εδαφικής υγρασίας. Η αβεβαιότητα της βροχόπτωσης και η αβεβαιότητα στην εκτίμηση της παροχής αιχμής δεν απασχολούν την παρούσα διατριβή.

10.2 Χαρτογράφηση των κατακλυζόμενων εκτάσεων

Το μεγαλύτερο μέρος του νερού που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους μέσω των κατακρημνίσεων οδηγείται στους ωκεανούς και τις λίμνες μέσω της επιφανειακής απορροής. Σε παγκόσμια κλίμακα το νερό αυτό είναι λιγότερο από 2% (Gleick, 1993) και σχετίζεται με την εμφάνιση πλημμυρικών γεγονότων. Σε μικρότερα ποσοστά, μια ποσότητα νερού συγκρατείται στα φυλλώματα των δέντρων και των άλλων φυτών και μια άλλη διηθείται στο έδαφος και είτε αποθηκεύεται ως εδαφική υγρασία και επιστρέφει στην ατμόσφαιρα μέσω των φυτών είτε κατεισδύει σε βαθύτερα στρώματα και τροφοδοτεί υπόγειους υδροφορείς (Μιμίκου

και Μπαλτάς, 2003). Η ενδεχόμενη εμφάνιση πλημμυρικών γεγονότων, περιγράφεται μέσω της σχέσης βροχόπτωσης απορροής.

Συνοπτικά αναφέρεται ότι η κλασική υδρολογική προσομοίωση της απόκρισης μιας λεκάνης απορροής για την χαρτογράφηση των κατακλυζόμενων εκτάσεων περιλαμβάνει επιμέρους στάδια. Αυτά είναι: η συλλογή και επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων (π.χ. ΨΜΕ, πληροφορίας σχετικής με τις χρήσεις γης και τους τύπους του εδάφους, κλιματολογικά δεδομένα κ.ά.), η προσομοίωση της λεκάνης για την εκτίμηση των καταιγίδων και των πλημμυρών σχεδιασμού για συγκεκριμένες περιόδους επαναφοράς, η υδραυλική προσομοίωση της ροής κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου ή του κύριου ρέματος, και η χάραξη των ορίων των πλημμυρισμένων εκτάσεων.

Τα βήματα για τη χαρτογράφηση των κατακλυζόμενων εκτάσεων λόγω πλημμύρας στο πλαίσιο του προαναφερθέντος ερευνητικού έργου περιγράφονται στο τεύχος της Τεχνικής Έκθεσης (Ναλμπάντης, 2011) και αυτά ήταν:

- Κατάρτιση πλημμυρικού υδρογραφήματος στην διατομή εξόδου του ανάντη τμήματος της θεωρούμενης λεκάνης απορροής (δεν αποτελεί αντικείμενο της διατριβής)
- Διόδευση του παραπάνω πλημμυρικού υδρογραφήματος στο κατάντη τμήμα της θεωρούμενης λεκάνης (δεν αποτελεί αντικείμενο της διατριβής)
- Εκτίμηση, με βάση την παροχή αιχμής στην κάθε διατομή του κατάντη τμήματος, της μέγιστης πλημμυρικής στάθμης στη διατομή (δεν αποτελεί αντικείμενο της διατριβής)
- Χάραξη, με βάση το ίχνος της πλημμυρικής στάθμης σε κάθε διατομή, της μέγιστης κατακλυζόμενης περιοχής λόγω πλημμύρας υπό μορφή πολυγώνου.

Από τα παραπάνω βήματα, στο πλαίσιο της διατριβής μελετήθηκε το τελευταίο βήμα, και παρουσιάζονται αποτελέσματα ενώ γίνεται χρήση εξαχθέντων αποτελεσμάτων από προηγούμενα βήματα τα οποία εκτελέστηκαν στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου. Για την εύρεση του ορίου της κατακλυζόμενης περιοχής, θεωρούνται οι παρακάτω παραδοχές: (α) λαμβάνεται υπόψιν ότι πάνω σε κάθε διατομή η επιφάνεια του νερού είναι οριζόντια, και (β) ότι μεταξύ δύο διατομών η στάθμη του νερού μεταβάλλεται γραμμικά. Η υπολογιστική διαδικασία συνεχίζεται και ακολουθεί ο εντοπισμός των ορίων της κατακλυζόμενης ζώνης σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα και χρήση του υπολογιστικού περιβάλλοντος MatLab:

- Βήμα 1: Μετατροπή της πληροφορίας «υψόμετρα νερού στις αρχικές και τις ενδιάμεσες διατομές» από διανυσματική (vector) σε κανονικοποιημένη μορφή (raster)
- Βήμα 2: Προσδιορισμός των υψομέτρων νερού (επιφάνεια νερού) σε όλη την περιοχή η οποία καθορίζεται οριζοντιογραφικά από τα άκρα των αρχικών διατομών ως ένα πολύγωνο, με παρεμβολή στα υψόμετρα (με τη μέθοδο IDW)
- Βήμα 3: Εύρεση των φατνίων τομής του ΨΜΕ και της επιφάνειας νερού
- Βήμα 4: Εντοπισμός των φατνίων τομής των πλησιέστερων στον άξονα του υδατορεύματος
- Βήμα 5: Μετατροπή αυτών σε διανυσματική μορφή (όρια κατακλυζόμενης ζώνης).

10.3 Εκτίμηση της επίδρασης της ακρίβειας των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους στις κατακλυζόμενες περιοχές

Για την κάθε λεκάνη απορροής που επιλέγεται να μελετηθεί, αναζητείται ένα ΨΜΕ, κατά το δυνατόν υψηλής ακρίβειας, ώστε αυτό να αποτελεί τη βάση για τους περαιτέρω υπολογισμούς. Από το ΨΜΕ αυτό που αναφέρεται ως ΨΜΕ αναφοράς ή «σωστό» ΨΜΕ παράγεται μεγάλος αριθμός «εσφαλμένων» ΨΜΕ που αντιστοιχούν σε συνθήκες φτωχότερης πληροφορίας. Επομένως, κατά τη διαδικασία παραγωγής των «εσφαλμένων» ΨΜΕ εντάσσονται: (α) η παραγωγή του ΨΜΕ αναφοράς ή, η απευθείας χρήση ενός έτοιμου ΨΜΕ, που όμως συνηθίζεται να είναι γενικά διαφορετικό για τα ανάντη τμήματα της λεκάνης απορροής μελέτης και τα κατάντη πεδινά τμήματα (περιοχές των κατακλυζόμενων εκτάσεων), (β) η παραγωγή των «εσφαλμένων» ΨΜΕ, και (γ) η παραγωγή (εκτίμηση) των μορφομετρικών χαρακτηριστικών υδρολογικού ενδιαφέροντος επί των «εσφαλμένων» ΨΜΕ. Την παραπάνω διαδικασία ακολουθούν οι υδρολογικοί και υδραυλικοί υπολογισμοί, που δεν αφορούν τη διατριβή, ενώ, στη συνέχεια, εκτελούνται οι τελικοί υπολογισμοί επί των κατακλυζόμενων εκτάσεων. Στους τελικούς υπολογισμούς ανήκουν: η χάραξη (εντοπισμός), για κάθε σενάριο, των ορίων της κατακλυζόμενης έκτασης, ο υπολογισμός, για κάθε σενάριο, των μορφομετρικών χαρακτηριστικών της κατακλυζόμενης έκτασης, και η στατιστική επεξεργασία των παραπάνω και εξαγωγή χρήσιμων σχέσεων που εκφράζουν την αβεβαιότητα της κατακλυζόμενης έκτασης. Η ποσοτική εκτίμηση της αβεβαιότητας στο ΨΜΕ ακολουθεί τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο εδάφιο 5.8.4, ενώ η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας στην κατακλυζόμενη έκταση λόγω πλημμύρας πραγματοποιείται με στατιστικό τρόπο και τη χρήση στατιστικών παραμέτρων.

Η επίδραση της ακρίβειας των ΨΜΕ είναι είτε άμεση, είτε έμμεση μέσω της εισαγωγής αβεβαιότητας στα μορφομετρικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής και των ρεμάτων. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η χρήση ΨΜΕ εντός των υδρολογικών μοντέλων προσομοίωσης είναι ευρύτατη, αποτέλεσμα αυτής είναι η αναπόφευκτη επίπτωση της αβεβαιότητας στα τελικά εξαγόμενα της υδρολογικής ή της υδραυλικής ανάλυσης. Εδώ επιλέγεται η μελέτη της επίδρασης της αβεβαιότητας του χρησιμοποιούμενου ΨΜΕ στην αβεβαιότητα στο τελικό εξαγόμενο, που είναι η θέση του ορίου της κατακλυζόμενης έκτασης λόγω πλημμύρας. Στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου εξετάζεται και η επίπτωση της κυριότερης (πέραν του ΨΜΕ) πηγής αβεβαιότητας που είναι η αβεβαιότητα στα υδρογραφήματα εισόδου λόγω της έντονης χρονικής διακύμανσης της βροχόπτωσης. Όμως η τελευταία αυτή πηγή αβεβαιότητας δεν αφορά το αντικείμενο της παρούσας διατριβής.

Γίνεται η παραδοχή ότι διατίθεται «σωστό» ΨΜΕ από το οποίο λαμβάνεται ένας μεγάλος αριθμός «εσφαλμένων» ΨΜΕ με δεδομένη αβεβαιότητα η οποία αντιστοιχεί στην αβεβαιότητα δεδομένης μεθόδου παραγωγής ΨΜΕ. Υπενθυμίζεται ότι η παραγωγή ΨΜΕ περιλαμβάνει τη λήψη των πρωτογενών δεδομένων και την επεξεργασία αυτών για εξαγωγή του ΨΜΕ το οποίο, πλέον, αποτελεί δευτερογενή πληροφορία.

10.4 Περιοχή μελέτης

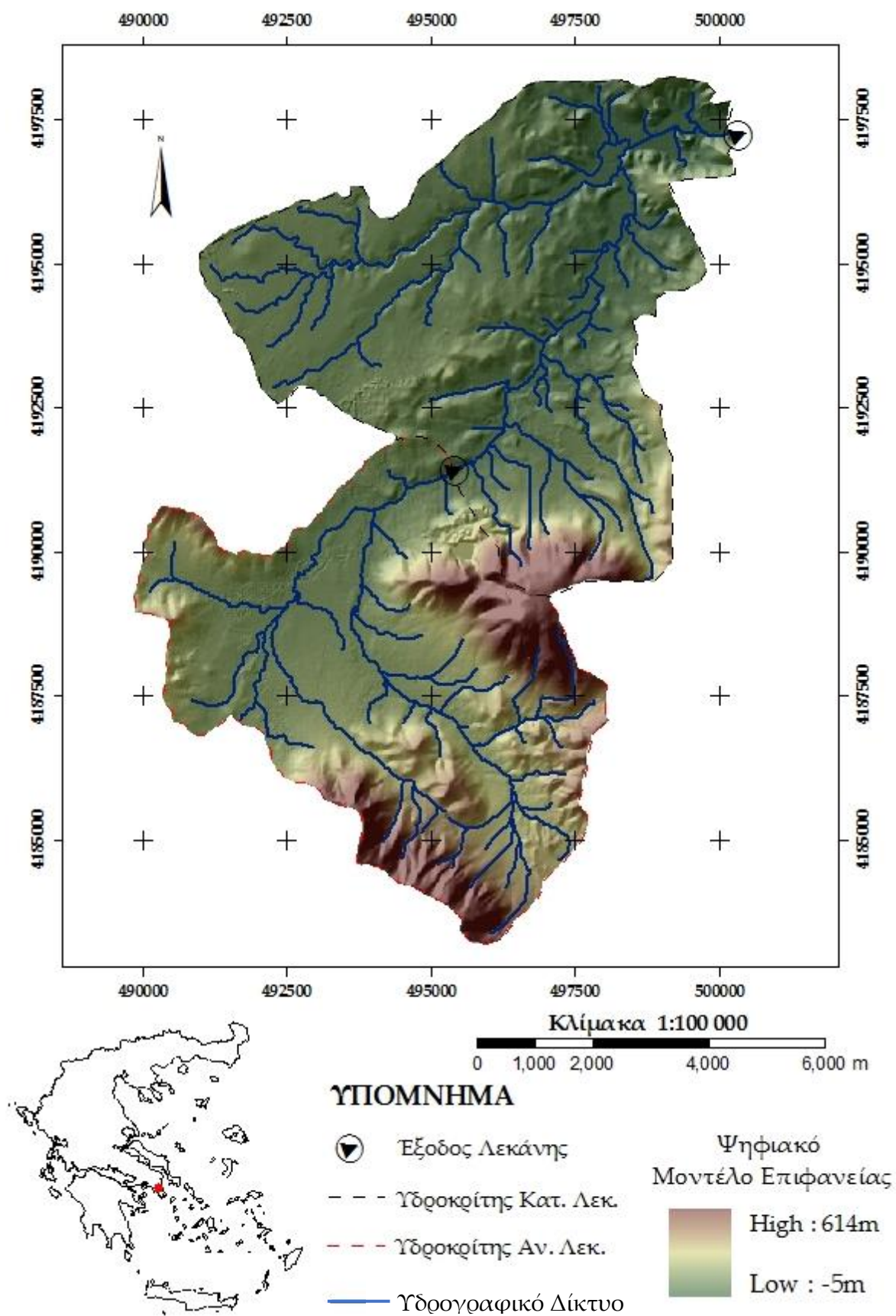
Η μεθοδολογία εκτίμησης της αβεβαιότητας των κατακλυζόμενων εκτάσεων μιας λεκάνης απορροής λόγω πλημμύρας, όπως αυτή περιγράφεται στο Υποκεφάλαιο 5.8, εφαρμόζεται σε δύο λεκάνες απορροής του ελληνικού χώρου οι οποίες είναι: η λεκάνη του Νοτιοδυτικού ρέματος Καλυβίων Αττικής με δύο υπολεκάνες, αυτή των Καλυβίων και αυτή του ρέματος Αγίου Γεωργίου, και η λεκάνη απορροής του π. Κερυνίτη στο Νομό Αχαΐας. Σημειώνεται ότι

για τις ανάγκες του σχετικού ερευνητικού έργου, η κάθε λεκάνη απορροής μελετήθηκε με δύο οπτικές: Η πρώτη αφορά το ορεινό ή ανάντη τμήμα, και η δεύτερη αφορά το πεδινό ή κατάντη τμήμα στο οποίο και γίνεται η χάραξη των πλημμυρικών πεδίων. Οι υπολογισμοί που αφορούν τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά συνήθως αναφέρονται στη συνολική έκταση της λεκάνης.

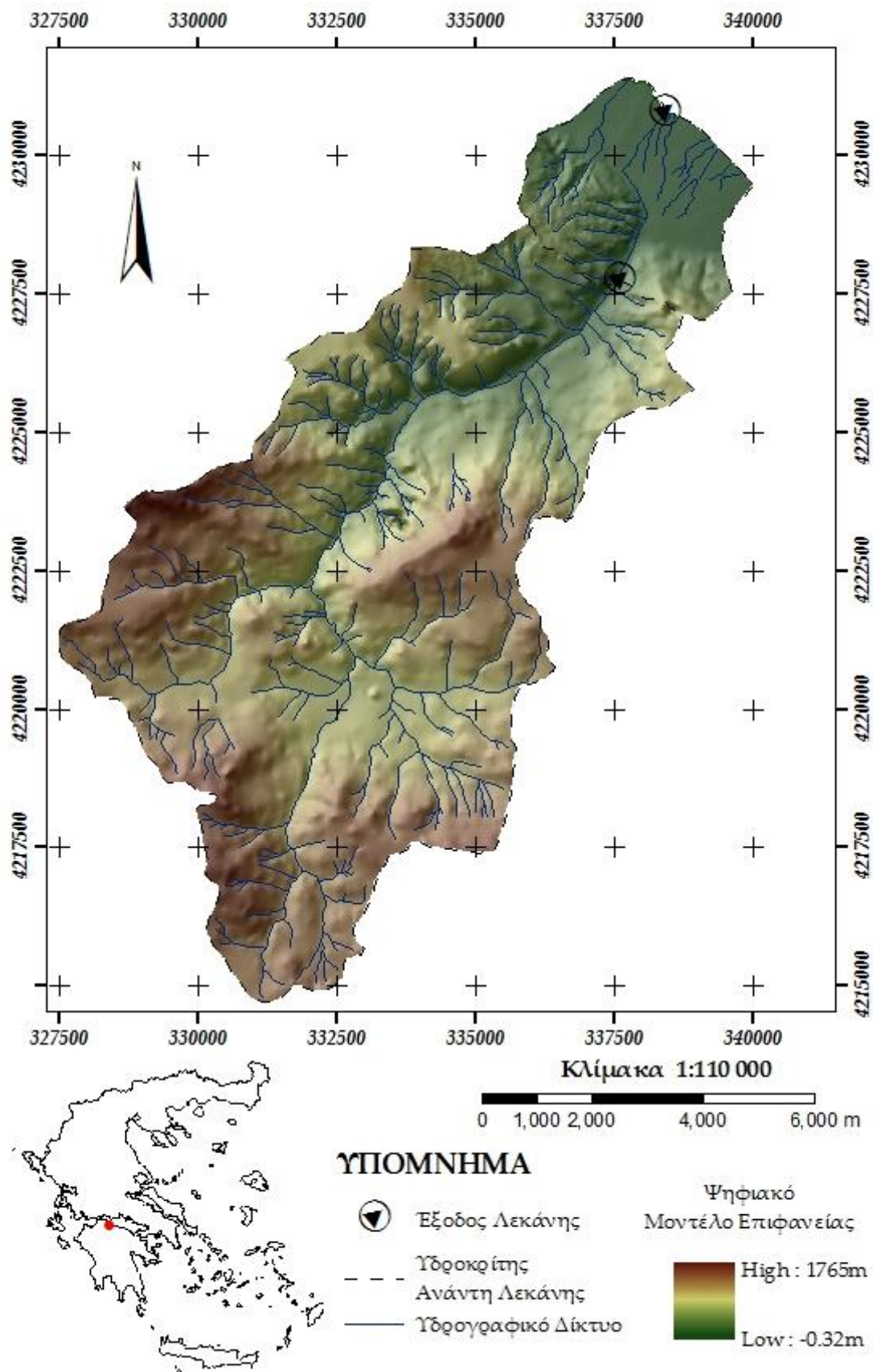
Συγκεκριμένα, οι λεκάνες απορροής μελέτης είναι:

- η λεκάνη Καλυβίων, η οποία αποτελείται από τις υπολεκάνες: του Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων στην περιοχή των Καλυβίων Θορικού με εμβαδό 17.6 km^2 , και την υπολεκάνη του ρέματος Αγίου Γεωργίου του Δήμου Σαρωνικού και έως τη Συμβολή του Νοτιοδυτικού ρέματος Καλυβίων σε αυτό, σε θέση πλησίον της Λεωφόρου Ιπποδρόμου στο βόρειο όριο των Καλυβίων Θορικού, και
- η λεκάνη του π. Κερυνίτη του Δήμου Αιγιαλείας Νομού Αχαΐας στη Βόρεια Πελοπόννησο.

Το συνολικό εμβαδόν των λεκανών απορροής είναι 38.28 km^2 και 89.8 km^2 , αντίστοιχα. Παρακάτω παρουσιάζονται η λεκάνη απορροής Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων (Σχήμα 10-1) και η λεκάνη απορροής του π. Κερυνίτη (Σχήμα 10-2). Η χωρική κατανομή των υψομέτρων για τις δύο λεκάνες απορροής φαίνεται στα σχήματα, καθώς, επίσης, το μέγιστο και το ελάχιστο υψόμετρο στο στόμιο της εξόδου.



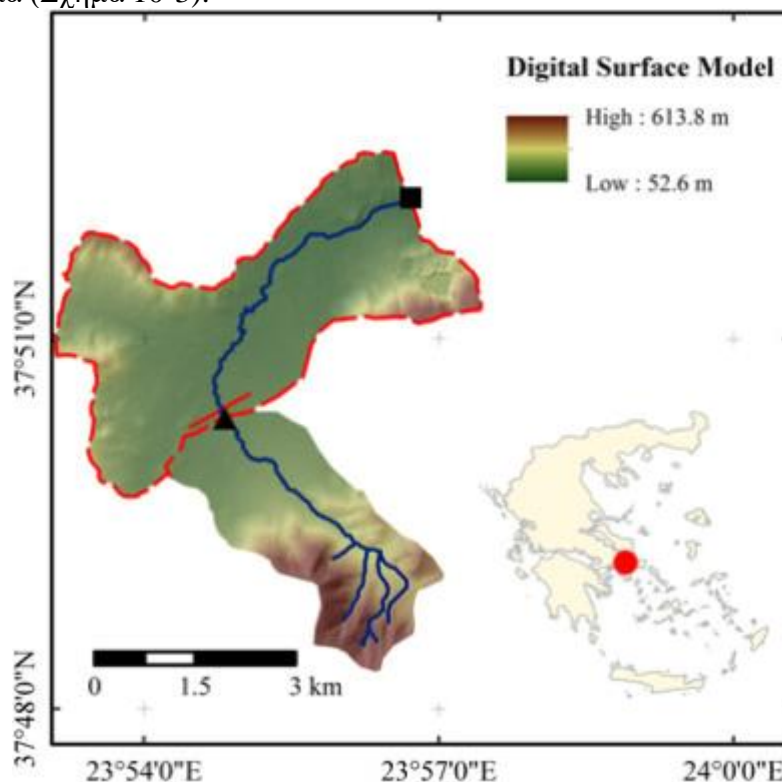
Σχήμα 10-1: Λεκάνη απορροής Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων, Ν. Αττικής.



Σχήμα 10-2: Λεκάνη απορροής ποταμού Κερνίτη, Ν. Αχαΐας.

Από την ευρύτερη λεκάνη του ρέματος Καλυβίων, μελετάται ένα τμήμα της ανάντη λεκάνης, ως το πλέον κατάλληλο για τους υπολογισμούς, συγκεκριμένα, το τμήμα της λεκάνης του

κύριου κλάδου του Νότιου Ρέματος Καλυβίων με εμβαδόν 21.7 km². Το τμήμα αυτό αποτελείται από δύο επιμέρους υπολεκάνες, αυτή του ρέματος του Ερασίνου, με εμβαδόν 14.3 km² και την ανάντη αυτής υπολεκάνη, με εμβαδόν 7.4 km². Η υπολεκάνη του ρέματος Ερασίνου είναι ημορεινή με μέσο υψόμετρο εδάφους, ίσο με 213.4 m και μέση κλίση εδάφους ίση με 19.3%, ενώ η ανάντη υπολεκάνη έχει αντίστοιχα 115.6 m μέσο υψόμετρο και 17.6% μέση κλίση εδάφους. Οι δύο λεκάνες που περιγράφονται παραπάνω παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 10-3).



Σχήμα 10-3: Τμήμα της λεκάνης του κύριου κλάδου του Νότιου Ρέματος Καλυβίων, με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή περιγράφεται το κατάντη τμήμα, ενώ με τρίγωνο δηλώνεται η έξοδος της ανάντη υπολεκάνης και με τετράγωνο η έξοδος της κατάντη λεκάνης.

Ως προς την δεύτερη λεκάνη απορροής, δηλαδή του π. Κερυνίτη, αυτή αποτελείται από το ανάντη ορεινό τμήμα, έκτασης 79.6 km², με μέσο υψόμετρο 886.9 m και μέση κλίση εδάφους 41.8% και ένα πιο πεδινό κατάντη τμήμα, έκτασης 10.2 km², με μέσο υψόμετρο 135.3 m και μέση κλίση εδάφους 22.7% (Σχήμα 10-2).

Ορισμένοι από τους λόγους που επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες λεκάνες απορροής, είναι (α) ότι αυτές έχουν κατά το δυνατό σαφώς διαχωριζόμενα μεταξύ τους, το ορεινό (ανάντη) και το πεδινό (κατάντη) τμήμα της συνολικής λεκάνης, (β) η μέση κλίση της κύριας μισγάγγειας στο πεδινό τμήμα να είναι όσο το δυνατό μικρότερη, και (γ) ότι ήταν ζητούμενο, το πεδινό τμήμα της λεκάνης να είναι κατά το δυνατό πεπλατυσμένο, δηλαδή να μην παρουσιάζεται στένωση στο πλέον κατάντη τμήματα της λεκάνης, κοντά στην εκβολή της.

10.5 Δεδομένα

Για την παραγωγή του ΨΜΕ αναφοράς, γενικότερα, χρησιμοποιούνται δεδομένα από δύο βασικές πηγές, τα οποία στη συνέχεια αναλύονται για κάθε λεκάνη απορροής χωριστά. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται συνδυαστικά για την παραγωγή ενός ΨΜΕ αναφοράς, το οποίο, στη συνέχεια, θα αναφέρεται ως αληθές ΨΜΕ και είναι υψηλής ακρίβειας. Γενικότερα,

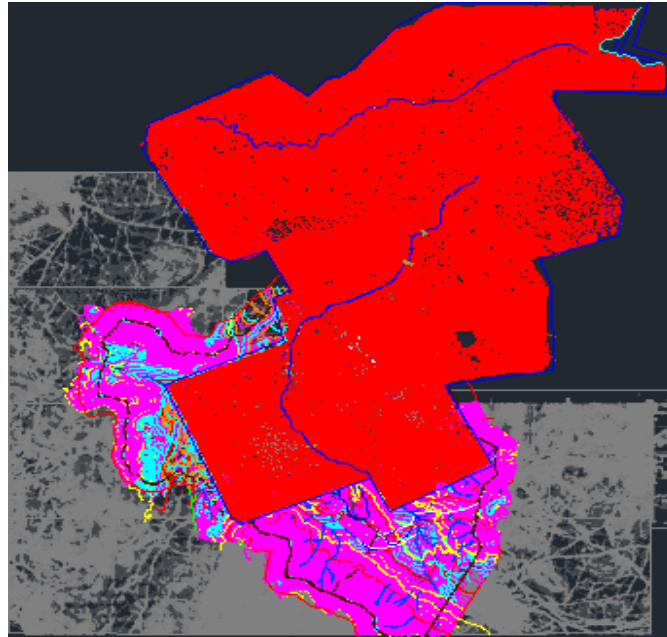
τα τοπογραφικά δεδομένα που είναι απαραίτητα για τη δημιουργία ενός ΨΜΕ, προέρχονται: (1) από τα παράγωγα προϊόντα, μετά την εφαρμογή της κλασικής φωτογραμμετρικής διαδικασίας για την παραγωγή ενός ΨΜΕ, όπως ένα νέφος σημείων το οποίο προέκυψε από τη φωτογραμμετρική επεξεργασία δεδομένων αεροφωτογραφιών, και (2) από δεδομένα, τα οποία αντλούνται μέσω ψηφιοποίησης από Τοπογραφικά Διαγράμματα, κλίμακας 1:5000 τα οποία καλύπτουν τμήμα της περιοχής μελέτης.

10.5.1 Η λεκάνη του ρέματος Καλυβίων

Για τη λεκάνη του ρέματος Καλυβίων χρησιμοποιήθηκαν αρχικά δεδομένα από δύο πηγές, δηλαδή, χρησιμοποιήθηκαν φωτογραμμετρικά προϊόντα και Τοπογραφικά Διαγράμματα. Για τα πρώτα, τα φωτογραμμετρικά, να σημειωθεί ότι το νέφος σημείων είχε παραχθεί στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος με τίτλο «DISaster MAnagement GIS with emphasis on cultural sites» (Tsakiris et al., 2007) και καλύπτει επιφάνεια 4.5 km² από την επιφάνεια των 17.6 km² της λεκάνης του Ν.Δ. Ρέματος Καλυβίων και επιφάνεια 12.5 km² από τη συνολική επιφάνεια των 19.78 km² της υπολεκάνης του ρ. Αγίου Γεωργίου. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι το νέφος σημείων καλύπτει το σύνολο του πεδινού τμήματος των δύο λεκανών.

Για την παραγωγή του νέφους σημείων, εφαρμόστηκε η κλασική φωτογραμμετρική μεθοδολογία, χρησιμοποιήθηκαν 25 αεροφωτογραφίες της ΓΥΣ που λήφθηκαν τον Σεπτέμβριο 2005 με κλίμακα περίπου 1:17000, με περίπου 60% κατά μήκος και 40% πλευρική επικάλυψη, μετρήθηκαν φωτοσταθερά, εφαρμόστηκε αεροτριγωνισμός και έγινε η παραγωγή της ορθοεικόνας (ορθοφωτογραφία) της λεκάνης απορροής και του ΨΜΕ. Μιας και οι αεροφωτογραφίες αυτές κάλυπταν το μεγαλύτερο μέρος των δύο λεκανών (ορεινό και πεδινό τμήμα), μόνο 9 επιπλέον έγχρωμες αεροφωτογραφίες μεγαλύτερης κλίμακας, 1:10000, χρειάστηκαν για να καλύψουν το μικρό κομμάτι της περιοχής μελέτης, που παρέμενε χωρίς πληροφορία γήινου αναγλύφου.

Για το ανάντη τμήμα των λεκανών απορροής, επιλέχθηκε να γίνει συμπλήρωση της υψομετρικής πληροφορίας από 7 Τοπογραφικά Διαγράμματα κλ.1:5000, όπως αναφέρθηκε. Έτσι, μέσω ψηφιοποίησης αντλείται από τα διαγράμματα πληροφορία σχετική με υψομετρικά και τριγωνομετρικά σημεία, ισοϋψείς καμπύλες, με ισοδιάσταση 4 m, την ακτογραμμή και το υδρογραφικό δίκτυο. Η ακρίβεια αυτών των δεδομένων είναι της τάξης των 1.25 m, δηλαδή, 0.25 mm × 5000 (η διακριτική ικανότητα του ματιού × τον συντελεστή της κλίμακας του χάρτη). Η κατανομή των δύο πηγών δεδομένων φαίνεται στο Σχήμα 10-4.



Σχήμα 10-4: Κατανομή των δύο πηγών της υψομετρικής πληροφορίας για τη λεκάνη του ρέματος Καλυβίων. Με κόκκινο χρώμα φαίνεται η περιοχή που καλύπτει το νέφος σημείων από τη φωτογραμμετρική ανάλυση και με γκρι χρώμα φαίνεται η περιοχή, που καλύπτουν τα Τοπογραφικά Διαγράμματα.

Από όλα τα παραπάνω δεδομένα, δημιουργείται ένα νέο κοινό ΨΜΕ το οποίο αποτελεί το ΨΜΕ αναφοράς και αποτέλεσε το εναρκτήριο στοιχείο της διαδικασίας κατά την οποία εισάγονται τα σφάλματα. Στο τμήμα που εντοπίζεται επικάλυψη μεταξύ των δύο πηγών αρχικών δεδομένων έγινε διόρθωση υψομέτρων και έλεγχος της συνέχειας του υδρογραφικού δικτύου, ώστε να μην εμφανίζονται προβλήματα.

Με βάση τη μεθοδολογία του εδαφίου 5.8.4, επιλέχθηκαν οι ακόλουθες τιμές για την τυπική απόκλιση των σφαλμάτων στο χρησιμοποιούμενο ΨΜΕ (η μελέτη έγινε στο κατάντη τμήμα της λεκάνης):

- Ως ΨΜΕ αναφοράς λαμβάνεται το ΨΜΕ που προέκυψε φωτογραμμετρικά όπως περιγράφηκε πιο πάνω και το οποίο έχει τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων 0.75 m.
- Εξετάζονται 500 ΨΜΕ χαμηλού τυπικού σφάλματος, τα οποία στη συνέχεια θα αναφέρονται ως εσφαλμένα ΨΜΕ θεωρώντας ότι αυτά συμμορφώνονται με τις παραδοχές της Κτηματολόγιο ΑΕ (Greek Land Register SA., 2005) και έχουν τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων 0.98 m, ή, αλλιώς, τυπική απόκλιση πρόσθετων σφαλμάτων 0.63 m.
- Επίσης, εξετάζονται 500 ΨΜΕ υψηλού τυπικού σφάλματος που θεωρείται ότι προκύπτουν από χάρτες 1:5000 της ΓΥΣ με τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων 2.0 m, ή, αλλιώς, τυπική απόκλιση πρόσθετων σφαλμάτων 1.85 m.

Σύμφωνα με τις παραπάνω δύο ομάδες εσφαλμένων ΨΜΕ, θεωρείται ότι το εσφαλμένο ΨΜΕ που μελετάται στην πρώτη περίπτωση, προέρχεται από τον εθνικό φορέα ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ ΑΕ και ακολουθεί τις προδιαγραφές του ΨΜΕ που παρέχει ο φορέας, ΨΜΕ το οποίο έχει παραχθεί από μέσης κλίμακας αεροφωτογραφίες που καλύπτουν την εθνική επικράτεια. Στην δεύτερη περίπτωση θεωρείται ότι το εσφαλμένο ΨΜΕ έχει παραχθεί από δεδομένα που προέρχονται από χάρτες κλίμακας 1:5000 της ΓΥΣ που συνήθως χρησιμοποιούνται σε παρόμοιες περιπτώσεις και είναι διαθέσιμοι στους μελετητές.

Για την παραγωγή του ΨΜΕ αναφοράς χρησιμοποιήθηκε πληροφορία από τα θεματικά επίπεδα των εξής γεωγραφικών δεδομένων: των υψομετρικών και τριγωνομετρικών σημείων, των ισούψων καμπύλων, της ακτογραμμής και των ρεμάτων από τους χάρτες της ΓΥΣ και, τέλος, των σημείων του νέφους από την φωτογραμμετρική διαδικασία. Στο στάδιο αυτό χρησιμοποιούνται κατάλληλες τεχνικές αξιοποίησης των παραπάνω γεωγραφικών δεδομένων, ώστε να προκύψει προϊόν με συνεχή κατανομή χωρικής πληροφορίας. Τα διανυσματικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισαγωγής για τη δημιουργία του ΨΜΕ. Εφαρμόζεται η μέθοδος κανάβου, που χρησιμοποιεί ένα κανονικοποιημένο μοντέλο δεδομένων, και επομένως το σύνολο των σημείων που προκύπτουν από τη μέθοδο αυτή έχουν περίπου το ήμισυ της απόστασης μεταξύ των πλησιέστερων σημείων του δείγματος των αρχικών δεδομένων. Αυτό δικαιολογεί την επιλογή φατνίου μεγέθους 10 m, καθώς η πλειονότητα των αρχικών δεδομένων έχουν πυκνότητα 25 m (φωτογραμμετρικό νέφος). Κάθε φατνίο του ΨΜΕ έχει σταθερή τιμή για την περιγραφική ιδιότητα σε όλη την επιφάνειά του. Η τιμή αυτή προσδιορίζεται με παρεμβολή στις τιμές των αρχικών δεδομένων. Με την εν λόγω μέθοδο δημιουργείται υδρολογικά ορθό ΨΜΕ, καθώς αυτή βασίζεται στη χρήση ισούψων καμπύλων. Η μέθοδος εμπεριέχει επίσης δύο αλγορίθμους. Ο πρώτος από αυτούς ενισχύει το υδρογραφικό δίκτυο απαλείφοντας βυθίσματα, ενώ ο δεύτερος υπολογίζει αυτόματα τις γραμμές ασυνέχειας (breaklines) της επιφάνειας του αναγλύφου όπως οι κορυφογραμμές και οι μισγάγγειες. Η εκτίμηση της ποιότητας του ορθού ΨΜΕ αναφοράς ελέγχεται για τον εντοπισμό χονδροειδών σφαλμάτων στο ανάγλυφο.

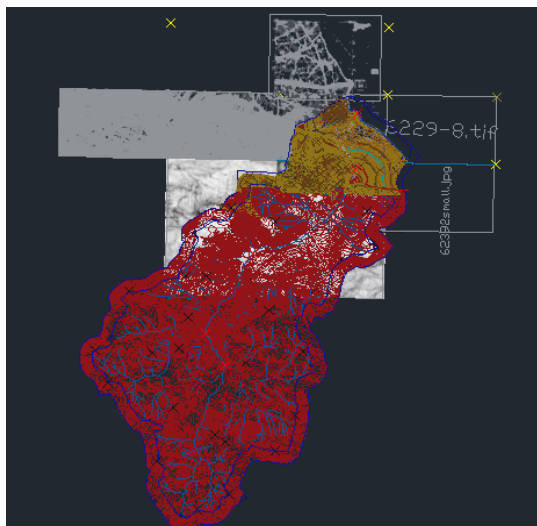
10.5.2 Λεκάνη απορροής ποταμού Κερυνίτη

Στη λεκάνη του ποταμού Κερυνίτη δεν υπήρχε διαθέσιμη φωτογραμμετρική ή τοπογραφική πληροφορία υψηλής ακρίβειας για το ανάγλυφο. Επομένως, επιλέχθηκε το ΨΜΕ για το ορεινό τμήμα της λεκάνης να προκύψει από δεδομένα τα οποία προέρχονται από ψηφιοποίηση των Φ.Χ. κλίμακας 1:50000 της ΓΥΣ, ενώ για το πεδινό (κατάντη) τμήμα, από ψηφιοποιημένη πληροφορία από τα αντίστοιχα Τοπογραφικά Διαγράμματα κλίμακας 1:5000.

Για την ψηφιοποίηση της απαραίτητης πληροφορίας, χρησιμοποιήθηκαν χάρτες της ΓΥΣ, και συλλέχθηκε πληροφορία σχετική με τις ισούψεις καμπύλες, τα υψομετρικά σημεία και τα ρέματα. Η πληροφορία για το ορεινό τμήμα ήταν αραιότερη στο χώρο σε σχέση με το κατάντη πεδινό τμήμα της λεκάνης. Η διάσταση φατνίου του παραχθέντος ΨΜΕ είναι 25 m.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η εξαγωγή του ορθού υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης του Κερυνίτη μέσω διαδικασίας που εφαρμόζεται σε περιβάλλον GIS, χρησιμοποιώντας τα χαρτογραφικά δεδομένα από χάρτες της ΓΥΣ κλίμακας 1:5000 και 1:50000. Η χωρική κατανομή των χαρτογραφικών δεδομένων παρουσιάζεται στο Σχήμα 10-5.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή του ορθού υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης των Καλυβίων, ακολουθήθηκε και για την εξαγωγή του ορθού υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης του Κερυνίτη. Σε αυτήν τη διαδικασία, πρώτο βήμα αποτελεί η δημιουργία βάσης χαρτογραφικών δεδομένων η οποία περιέχει τα δεδομένα για τη λεκάνη, όπως αυτά φαίνονται και στο Σχήμα 10-5.



Σχήμα 10-5: Τα χαρτογραφικά δεδομένα για τη λεκάνη του ποταμού Κερυνίτη, με κίτρινο και κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα δεδομένα από χάρτες κλίμακας 1:5000 και 1:50000, αντίστοιχα.

Για τους σαρωμένους χάρτες κλίμακας 1:5000 οι οποίοι καλύπτουν την κατάντη περιοχή της λεκάνης (γκρι πλαίσιο), η ακρίβεια των δεδομένων είναι της τάξης των 1.25 m.

Η κόκκινη περιοχή περιέχει δεδομένα που προέκυψαν από ψηφιοποίηση χαρτών κλίμακας 1:50000 και χρησιμοποιήθηκαν για την συμπλήρωση της υψομετρικής πληροφορίας σε όλη την έκταση της λεκάνης. Κατά κύριο λόγο, τα δεδομένα αυτά αποτελούνται από ισοϋψείς καμπύλες και το υδρογραφικό δίκτυο.

Στο περιβάλλον του προγράμματος ArcMap, έγινε η παραγωγή του ΨΜΕ με μέγεθος φατνίου ίσο με 5 m. Τα αρχικά δεδομένα επέτρεπαν μέγεθος φατνίου έως και 1.25 m, από άποψη ακρίβειας. Στο ΨΜΕ παρατηρείται ότι το εύρος τιμών των υψομέτρων της περιοχής είναι από -0.32 m έως 1002 m περίπου, που είναι και η μέγιστη τιμή σε αυτήν την περιοχή. Οι αρνητικές τιμές οφείλονται στο γεγονός ότι η τιμή αυτή αντιστοιχεί στο κέντρο του φατνίου, και επομένως, είναι εύλογη η διόρθωση του υψομέτρου με νέα τιμή 0, λόγω του ότι η έξοδος της λεκάνης είναι στη θάλασσα. Τέλος, από το ΨΜΕ αυτό εξάγεται το υδρογραφικό δίκτυο σε διανυσματική μορφή.

Με βάση τα βιβλιογραφικά δεδομένα που εκτέθηκαν στο εδάφιο 5.8.4, επιλέχτηκε η τυπική απόκλιση των σφαλμάτων στο χρησιμοποιούμενο ΨΜΕ:

- Ως ΨΜΕ αναφοράς λαμβάνεται το ΨΜΕ που προέκυψε από τους χάρτες 1:5000 και το οποίο έχει τυπικό σφάλμα, κατά παραδοχή, 1.5 m.
- Επίσης, εξετάζονται 500 εσφαλμένα ΨΜΕ υψηλού τυπικού σφάλματος τα οποία θεωρούνται ότι έχουν ληφθεί πάλι από χάρτες 1:5000 αλλά με τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων 2.0 m, ή, αλλιώς, τυπική απόκλιση πρόσθετων σφαλμάτων 1.32 m.

10.6 Αποτελέσματα

10.6.1 Γενικά

Σε συνέχεια της έρευνας (Nalbantis et al., 2017), η λεκάνη του π. Κερυνίτη αντιμετωπίστηκε ριζικά και εξαρχής, με διαφορετική πλέον προσέγγιση, και, γι' αυτό, όλα τα αποτελέσματα άλλαξαν. Τώρα ο άξονας παραμένει πολύ κοντά σε εκείνον του σωστού ΨΜΕ και τα μέγιστα υψόμετρα είναι πάντα συμβατά με τα υψόμετρα του σωστού ΨΜΕ και, επομένως, αυτά

μπορούν να σχεδιαστούν. Τα τελικά αποτελέσματα περιλαμβάνουν πλάτη ελεύθερης επιφάνειας νερού (topwidths) και όχι μέγιστα υψόμετρα, όπως σε παλαιότερες προσεγγίσεις. Αυτά προέρχονται από διάφορα ΨΜΕ, αλλά, για λόγους σύγκρισης, τοποθετούνται πάνω σε κοινό ΨΜΕ που είναι το σωστό ΨΜΕ. Προφανώς, δεν έχει νόημα τα πλάτη ελεύθερης επιφάνειας να αναχθούν σε μέγιστα υψόμετρα, γιατί, τα πρώτα περιλαμβάνουν τα πλήρη αποτελέσματα όλων των διατομών του μοντέλου, συμπεριλαμβανομένων των παρέμβλητων διατομών. Η προσέγγιση αυτή διευκολύνει αρκετά τη χάραξη των κατακλυζόμενων ζωνών, καθόσον οι διατομές στο σύνολό τους είναι σε μικρές αποστάσεις.

Ως προς τη χάραξη να αναφερθεί ότι το κάθε πλάτος ελεύθερης επιφάνειας εντοπίζεται πάνω στην αντίστοιχη διατομή (τις αρχικές και τις παρέμβλητες) και από την πλευρά με τα μεγαλύτερα υψόμετρα, προφανώς, αυτό θα συναντήσει το έδαφος, ενώ από την άλλη πλευρά του άξονα της διατομής, αν υπερβαίνει τον ψηλότερο αυχένα εκείνης της πλευράς και εκτείνεται σε σημαντική κοιλότητα με χαμηλότερα υψόμετρα, το όριο του πλημμυρικού πεδίου ορίζεται πάνω ακριβώς στον αυχένα, εξαιρώντας, επομένως, ένα μέρος του πλάτους της διατομής.

10.6.2 Αποτελέσματα για τη λεκάνη του Νοτιοδυτικού ρέματος Καλυβίων

Στο παρόν εδάφιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τη λεκάνη Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 10-1, για το DSM αναφοράς, το A_{90} αυξάνεται από 58 ha για $T = 1$ έως 109 ha για $T = 10\ 000$, δηλαδή κατά περίπου 100%. Το ίδιο ποσοστό αύξησης του A_{90} εντοπίζεται για τα εσφαλμένα DSM και με $\sigma = 0,63$ m και με $\sigma = 1.85$ m. Για σταθερή περίοδο επαναφοράς, T , το A_{90} αυξάνεται κατά τη μετάβαση από το DSM αναφοράς στα εσφαλμένα DSM με $\sigma = 0.63$ m, η αύξηση αυτή εξαρτάται από το T : και είναι περίπου 10 ha για $T = 10$ και σταδιακά αυξάνεται σε περίπου 20 ha για $T = 10\ 000$.

Πίνακας 10-1: Το ποσοστιαίο εύρος 90% του εμβαδού του ορίου της κατακλυζόμενης ζώνης (ha) στη λεκάνη Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων για διάφορες τιμές T .

Περίπτωση	90% του εμβαδού της κατακλυζόμενης ζώνης (ha) για διάφορες τιμές T			
	10	100	1000	10000
DSM αναφοράς	57.6	79	94.7	109.3
DSM, $\sigma = 0.63$ m	67.7	93.2	111.5	129.7
DSM, $\sigma = 1.85$ m	53.9	77.8	98.1	114.1
SRTM-based data	53.9	79.7	95.9	109.3
Βροχόπτωση	65.6	87.3	101.9	112.1

Για τα εσφαλμένα DSM με μεγάλο $\sigma = 1.85$ m, η τάση είναι αντίστροφη και το A_{90} χονδροειδώς επιστρέφει (για κάθε T) στην τιμή που παρατηρείται στον DSM αναφοράς. Τα αποτελέσματα από δεδομένα που βασίζονται στο SRTM DEM είναι πολύ κοντά στα αποτελέσματα που παρατηρούνται σε εσφαλμένα DSM με μεγάλο σ . Η διακύμανση του W_{90med} και για τις δύο περιόδους επαναφοράς και το μέγεθος του σφάλματος στο DSM συμφωνεί με την διακύμανση του A_{90} (Πίνακας 10-2). Μια εξαίρεση εντοπίζεται που αφορά τα εσφαλμένα DSM με $\sigma = 1.85$ m: όπως και στην περίπτωση του A_{90} , η τάση είναι αντίστροφη, αλλά τα πλάτη ελεύθερης επιφάνειας νερού εξακολουθούν να παραμένουν πάνω από αυτά της περίπτωσης με το DSM αναφοράς. Το ανάποδο από στις τιμές που λαμβάνονται με το DSM αναφοράς παρατηρείται με τις τιμές που προκύπτουν από τα δεδομένα SRTM.

Πίνακας 10-2: Χωρική διάμεση τιμή (m) του 90% των πλατών ελεύθερης επιφάνειας νερού της κατακλυζόμενης ζώνης στη λεκάνης Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων για διάφορες τιμές T .

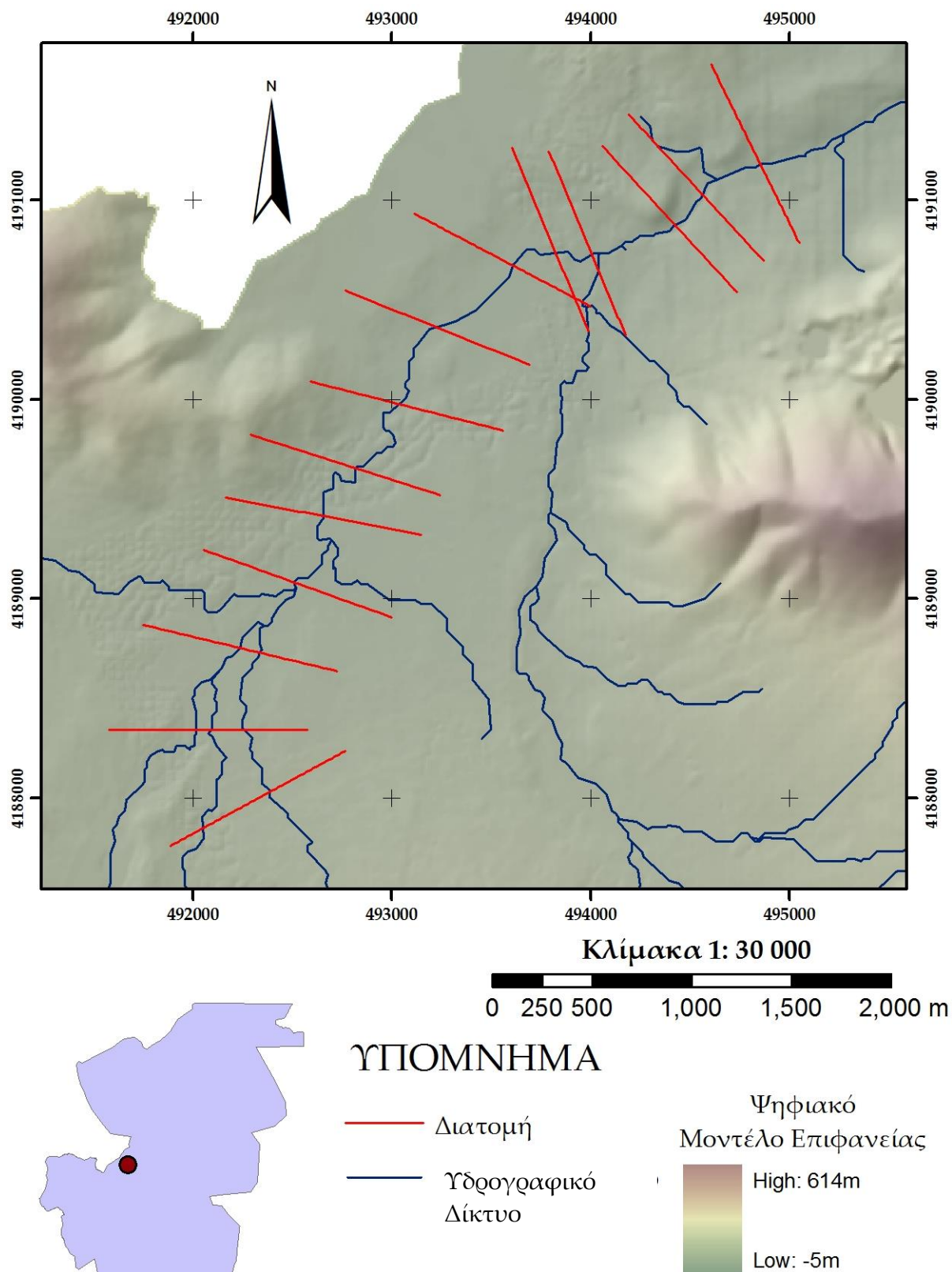
Περίπτωση	Median 90% quantile of topwidths (m) for $T =$			
	10	100	1000	10000
DSM αναφοράς	78.2	105.8	126.8	154.5
DSM, $\sigma = 0.63$ m	104.2	141.8	158.5	191.0
DSM, $\sigma = 1.85$ m	92.4	127.6	159.6	183.1
SRTM-based data	66.3	98.1	137.6	166.6
Βροχόπτωση	88.1	116.8	137.8	154.4

Για σταθερό μέγεθος σφάλματος στο DSM, η διακύμανση του $W_{90\max}$ με την περίοδο επαναφοράς είναι ποιοτικά παρόμοια με αυτή των $W_{90\text{med}}$ και A_{90} (Πίνακας 10-3). Ωστόσο, η επίδραση του μεγέθους του σφάλματος στο DSM είναι διαφορετική: δεν εντοπίζονται σημαντικές αλλαγές όταν χρησιμοποιούνται DSM με $\sigma = 0,63$ m αντί του DSM αναφοράς. Το ίδιο ισχύει και για δεδομένα που βασίζονται σε SRTM. Για DSMs με $\sigma = 1.85$ m, εντοπίζονται μειωμένες τιμές του $W_{90\max}$ για όλα τα T . Το ποσοστό μείωσης τείνει να γίνεται χαμηλότερο καθώς το T αυξάνεται: είναι 35% για $T = 10$ και 15% για $T = 10000$.

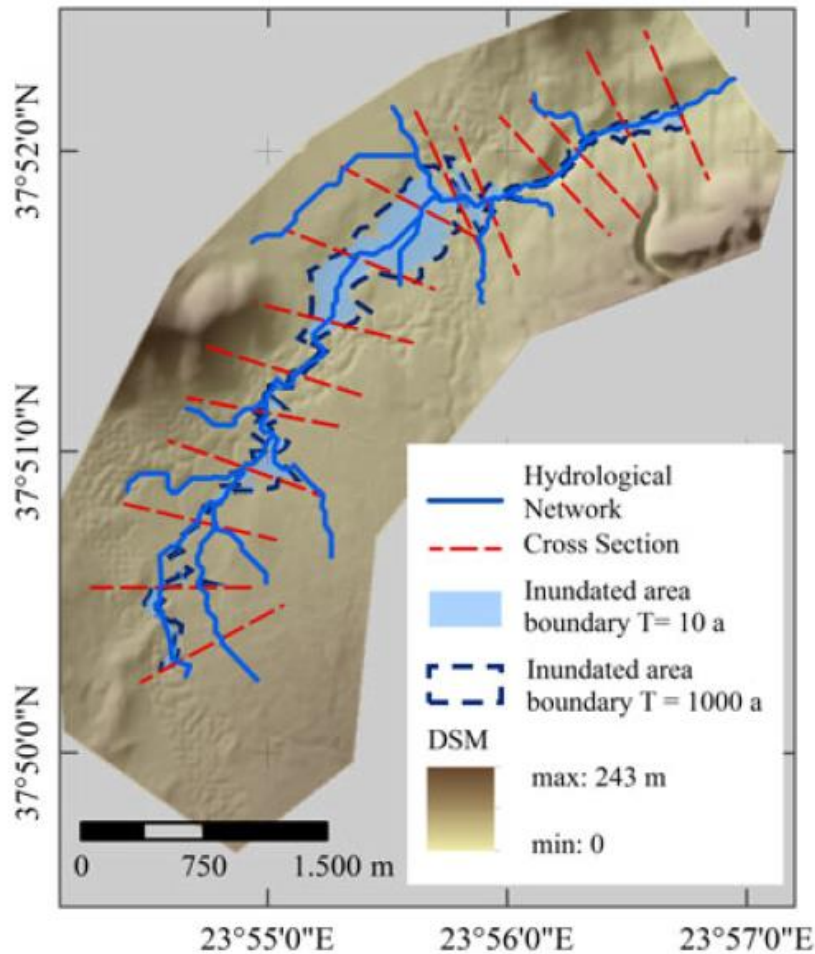
Πίνακας 10-3: Χωρική μέγιστη τιμή (m) του 90% του πλάτους ελεύθερης επιφάνειας νερού της κατακλυζόμενης ζώνης στη λεκάνης Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων για διάφορες τιμές T .

Περίπτωση	Maximum 90% quantile of topwidths (m) for $T =$			
	10	100	1000	10000
DSM αναφοράς	205.3	281.0	340.4	360.3
DSM, $\sigma = 0.63$ m	204.9	285.3	348.2	414.5
DSM, $\sigma = 1.85$ m	129.8	197.2	263.1	304.6
SRTM-based data	218.2	299.4	360.3	433.1
Βροχόπτωση	232.4	310.7	367.5	416.1

Η διακύμανση του ποσοστιαίου σημείου 90% για τα πλάτη ελεύθερης επιφάνειας νερού κατά μήκος του άξονα ροής απεικονίζεται στο Σχήμα 10-8 για όλες τις περιόδους επαναφοράς και τα μεγέθη σφάλματος του DSM. Για τα δεδομένα από SRTM, τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά του DSM αναφοράς σε ξεχωριστό γράφημα (Σχήμα 10-9). Τα γραφήματα των σχημάτων επιβεβαιώνουν τα προαναφερθέντα αποτελέσματα στα $W_{90\text{med}}$ και $W_{90\max}$. Οι χάρτες των σχημάτων 10-6 και 10-7 επιτρέπουν την ανάγνωση της πλημμυρισμένης περιοχής για δύο περιόδους επαναφοράς και δύο περιπτώσεις DSM: το DSM αναφοράς και το εσφαλμένο DSM με $\sigma = 0.63$ m.



Σχήμα 10-6: Κατάντη τμήμα της λεκάνης Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων και διατομές.



Σχήμα 10-7: Το όριο της κατακλυζόμενης ζώνης της λεκάνης Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων για την περίπτωση του εσφαλμένου DSM (DSM: $\sigma = 0.63$ m) και για περίοδο επαναφοράς $T = 10$ και $T = 1000$.

Το ποσοστιαίο σημείο 90% του βάθους νερού και της ταχύτητας κατά μήκος του άξονα ροής παρουσιάζονται στα σχήματα 10-10 και 10-11, αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 10-4, η συσχέτιση μεταξύ A_{90} και $\log_{10}(T)$ είναι σχεδόν γραμμική σε όλες τις περιπτώσεις που δοκιμάστηκαν, όπως υποδεικνύεται από τις υψηλές τιμές του συντελεστή R^2 και τις χαμηλές τιμές p -value για την κλίση c_1 . Η αύξηση του A_{90} κατά 10 φορές στο T , δηλαδή το c_1 , είναι περίπου 17 ha για το DSM αναφοράς και για τα δεδομένα από SRTM, ενώ αυξάνεται σε περίπου 20 ha για εσφαλμένα DSM και όλες οι τιμές του μεγέθους του σφάλματος στο DSM. Για τα δεδομένα από SRTM, η προσαρμογή της γραμμικής σχέσης είναι κάπως χειρότερη.

Πίνακας 10-4: Αποτελέσματα από τη γραμμική συσχέτιση του δεκαδικού λογαρίθμου της περιόδου επαναφοράς του ποσοστιαίου εύρους 90% του εμβαδού του ορίου της κατακλυζόμενης ζώνης για τη λεκάνη Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων

Περίπτωση	c_1 (m)	c_2 (m)	R^2	p -value
DSM αναφοράς	17.1	42.4	0.991	0.004
DSM, $\sigma = 0.63$ m	20.4	49.4	0.992	0.004
DSM, $\sigma = 1.85$ m	20.1	35.7	0.992	0.004
SRTM-based data	18.2	39.1	0.976	0.012
Βροχόπτωση	15.4	53.2	0.972	0.014

c_1 = κλίση, c_2 = σταθερός όρος, R^2 = συντελεστής προσδιορισμού, p -value = η ευρέως γνωστή p -value

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 10-5, το c_1 για το $W_{90\text{med}}$ δείχνει μια προοδευτική αύξηση σε σχέση με το μέγεθος του σφάλματος στο DSM. Ξεκινώντας από τα 27 m για το DSM αναφοράς, το c_1 φτάνει στα 34 m για το DSM που βασίζεται σε δεδομένα SRTM. Για το $W_{90\text{max}}$ η διακύμανση είναι διαφορετική (

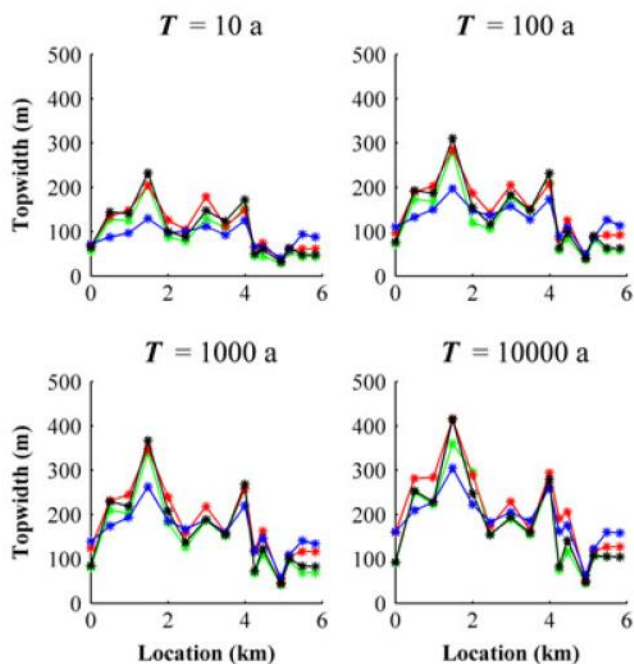
Πίνακας 10-6). Η παράμετρος c_1 αυξάνεται κατά περίπου 20 m από το DSM αναφοράς στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται εσφαλμένα DSM με $\sigma = 0.63$ m, ή DSM από δεδομένα SRTM, ενώ για τα DSM με $\sigma = 1.85$ m, αυξάνεται μόνο κατά 10 m περίπου.

Πίνακας 10-5: Αποτελέσματα από τη γραμμική συσχέτιση του δεκαδικού λογαρίθμου της περιόδου επαναφοράς της χωρικής διάμεσης τιμής του ποσοστιαίου σημείου 90% των πλατών ελεύθερης επιφάνειας νερού για τη λεκάνη Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων

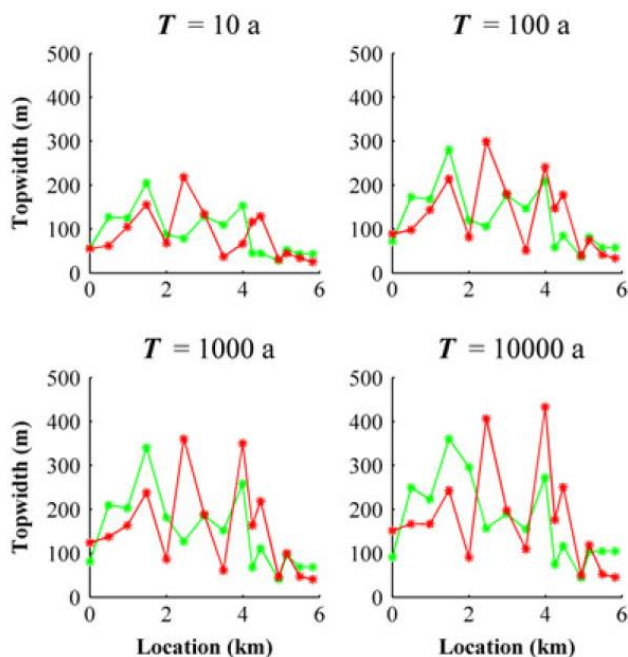
Περίπτωση	c_1 (m)	c_2 (m)	R^2	p -value
DSM αναφοράς	25.0	53.9	0.997	0.001
DSM, $\sigma = 0.63$ m	27.7	79.6	0.981	0.009
DSM, $\sigma = 1.85$ m	30.4	64.6	0.992	0.004
SRTM-based data	34.0	32.1	0.997	0.002
Βροχόπτωση	22.0	69.3	0.985	0.008

Πίνακας 10-6: Αποτελέσματα από τη γραμμική συσχέτιση του δεκαδικού λογαρίθμου της περιόδου επαναφοράς του χωρικού μεγίστου του ποσοστιαίου εύρους 90% των πλατών ελεύθερης επιφάνειας νερού για τη λεκάνη Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων

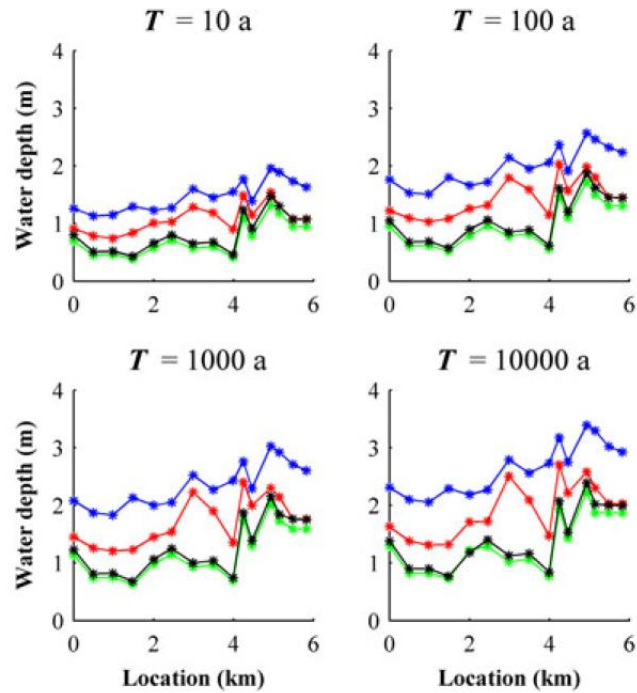
Περίπτωση	c_1 (m)	c_2 (m)	R^2	p -value
DSM αναφοράς	52.4	165.7	0.945	0.028
DSM, $\sigma = 0.63$ m	69.2	140.3	0.997	0.002
DSM, $\sigma = 1.85$ m	59.0	76.1	0.989	0.006
SRTM-based data	70.6	151.4	0.997	0.001
Βροχόπτωση	60.8	179.7	0.988	0.006



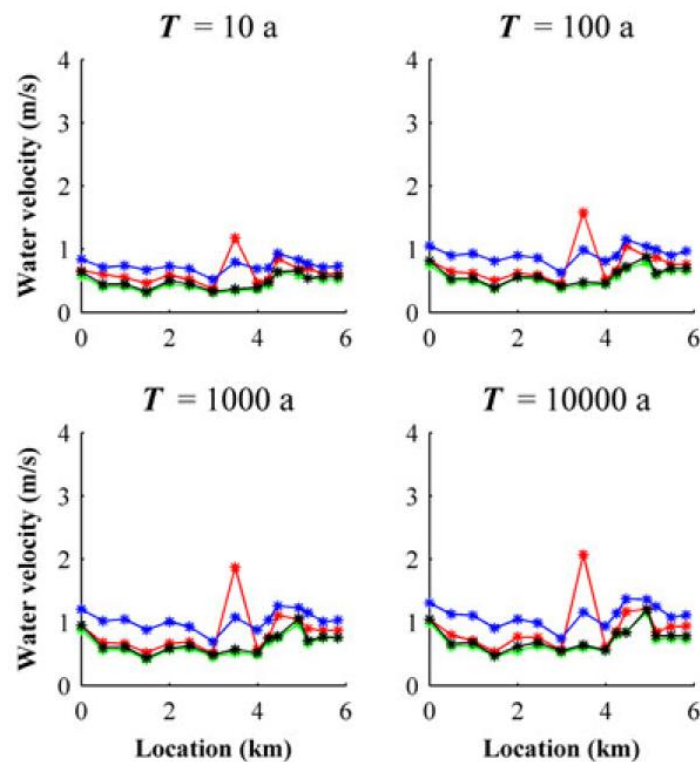
Σχήμα 10-8: Χωρική διακύμανση του ποσοστιαίου σημείου 90% των πλατών ελεύθερης επιφάνειας νερού της κατακλυζόμενης ζώνης για τη λεκάνη Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων, για περιόδους επαναφοράς $T = 10, 100, 1000, 10000$ και για το DSM αναφοράς (πράσινο), εσφαλμένο DSM με $\sigma = 0.63$ m (κόκκινο), εσφαλμένο DSM με $\sigma = 1.85$ m (μπλε), και τη βροχόπτωση (μαύρο).



Σχήμα 10-9: Χωρική διακύμανση των πλατών ελεύθερης επιφάνειας νερού στις διατομές για τη λεκάνη Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων, για περιόδους επαναφοράς $T = 10, 100, 1000, 10000$ και για το DSM αναφοράς (πράσινο), DSM από δεδομένα SRTM (κόκκινο).



Σχήμα 10-10: Χωρική διακύμανση του ποσοστιαίου σημείου 90% του βάθους νερού στις διατομές για τη λεκάνη Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων, για περιόδους επαναφοράς $T = 10, 100, 1000, 10000$ και για το DSM αναφοράς (πράσινο), εσφαλμένο DSM με $\sigma = 0.63$ m (κόκκινο), εσφαλμένο DSM με $\sigma = 1.85$ m (μπλε), και τη βροχόπτωση (μαύρο).



Σχήμα 10-11: Χωρική διακύμανση του ποσοστιαίου εύρους 90% της ταχύτητας νερού στις διατομές για τη λεκάνη Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων, για περιόδους επαναφοράς $T = 10, 100, 1000, 10000$ και για το DSM αναφοράς (πράσινο), εσφαλμένο DSM με $\sigma = 0.63$ m (κόκκινο), εσφαλμένο DSM με $\sigma = 1.85$ m (μπλε), και τη βροχόπτωση (μαύρο).

Από την εξέταση των πινάκων και των σχημάτων του παρόντος εδαφίου προκύπτει ότι η αβεβαιότητα της θέσης του ορίου της κατακλυζόμενης περιοχής αυξάνει με την περίοδο επαναφοράς λόγω της αλλαγής της μέσης θέσης του ορίου και όχι λόγω της αύξησης της τυπικής απόκλισης του μέγιστου υψομέτρου νερού. Η αύξηση της αβεβαιότητας στο χρησιμοποιούμενο ΨΜΕ δημιουργεί μικρή μεν αλλά υπαρκτή αύξηση της αβεβαιότητας της θέσης του ορίου. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και με την εξέταση του εμβαδού της κατακλυζόμενης ζώνης. Η σχετική αύξηση του εμβαδού της κατακλυζόμενης περιοχής από τη μέση θέση στο άνω όριο 95% του υψομέτρου νερού δείχνει σαφή μείωση με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς.

Λόγω του ημιορεινού χαρακτήρα της εξετασθείσας λεκάνης σε συνδυασμό με το μικρό μέγεθός της, γεγονός που οδηγεί σε σχετικά χαμηλές παροχές αιχμής, οι αποκλίσεις που σχολιάστηκαν πιο πάνω είναι γενικά μικρές (της τάξης των λίγων μέτρων). Ποιοτικά, πάντως, μπορούν να γενικευθούν και σε μεγαλύτερες λεκάνες.

10.6.3 Αποτελέσματα για τη λεκάνη του π. Κερυνιτή

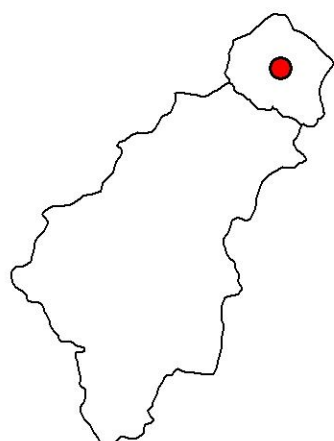
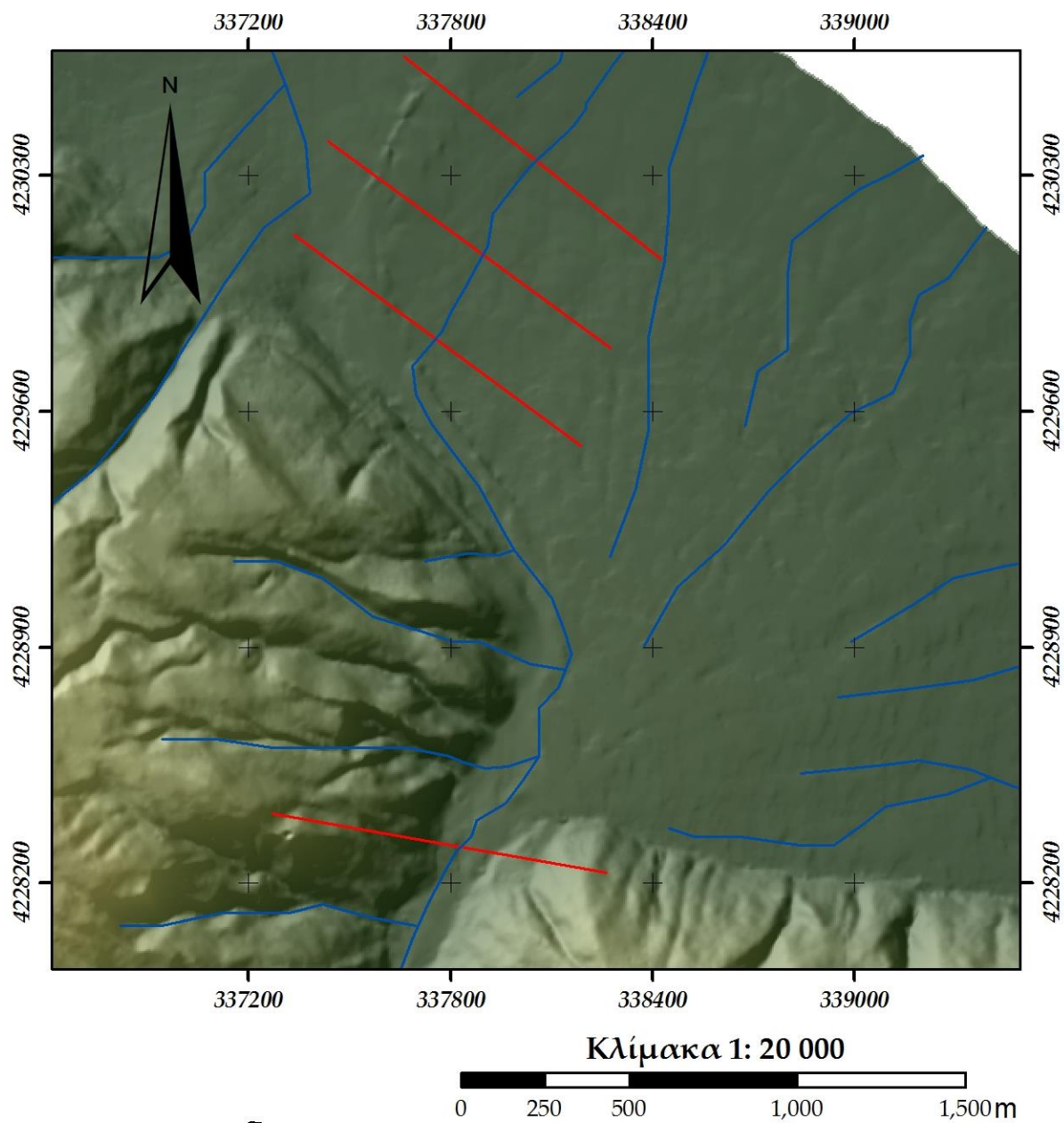
Στο εδάφιο αυτό εξετάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της επίδρασης της αβεβαιότητας στο ΨΜΕ, για τη λεκάνη του π. Κερυνιτή (Σχήμα 10-12).

Για το DSM αναφοράς, το A_{90} αυξάνεται κατά περίπου 200% σε σχέση με την αρχική του τιμή όταν το T μεταβάλλεται από 10 σε 10000 a (Πίνακας 10-7) τόσο για το DSM αναφοράς όσο και για το εσφαλμένο DSM. Όταν, ωστόσο, χρησιμοποιούνται DSM από δεδομένα SRTM, τα αποτελέσματα είναι μη ρεαλιστικά χαμηλά και για $T = 1000$ a και 10000 a, αυτά έχουν

παραλειφθεί από τον Πίνακα 10-7. Το ίδιο ισχύει, επίσης, για τα W_{90med} και W_{90max} (πίνακες 10-8 και 10-9). Για μια σταθερή περίοδο επαναφοράς, το A_{90} αυξάνεται όταν μεταφέρεται η εκτίμηση από το DSM αναφοράς στο εσφαλμένο DSM, αυτή η αύξηση εξαρτάται από το T : είναι περίπου 5 ha για $T = 10$ και σταδιακά αυξάνει μέχρι περίπου 90 ha για $T = 10000$.

Πίνακας 10-7: Το ποσοστιαίο σημείο 90% του ορίου της κατακλυζόμενης ζώνης (ha) για τη λεκάνη του π. Κερυνίτη και διάφορες περιόδους επαναφοράς.

Περίπτωση	90% ποσοστιαίο σημείο του ορίου της κατακλυζόμενης ζώνης (ha) for $T =$			
	10	100	1000	10000
DSM αναφοράς	46.1	61.9	75.4	171
DSM, $\sigma = 0.66$ m	50.6	70.4	107.1	257.5
SRTM-based data	26.5	32.8		-
Βροχόπτωση	48.8	63.5	75.4	143.9



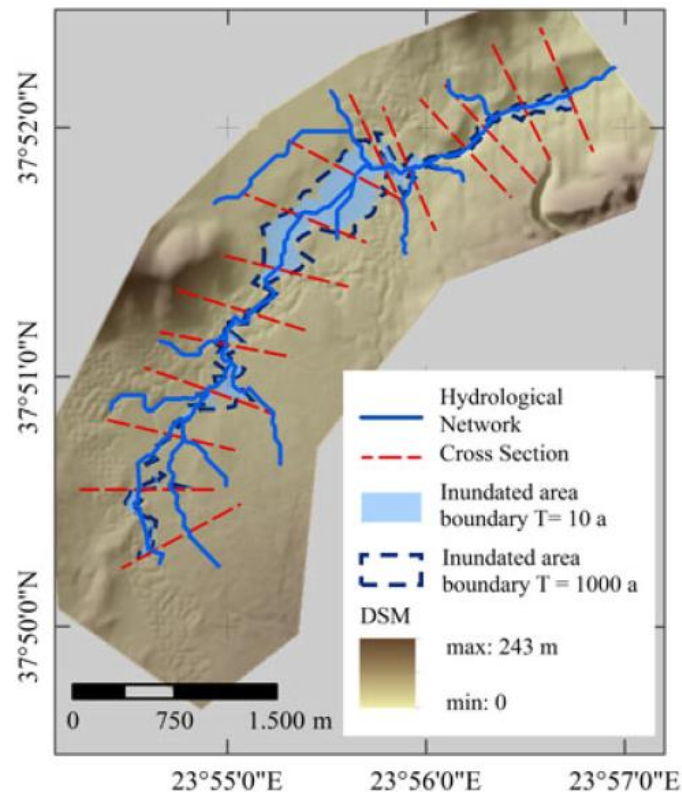
ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- Διατομή
- Υδρογραφικό Δίκτυο

Ψηφιακό
Μοντέλο Επιφανείας

High: 1001m
Low: -1.42m

Σχήμα 10-12: Κατάντη τμήμα της λεκάνης του ποταμού Κερυνίτη και διατομές. Χρησιμοποιήθηκαν οκτώ συνολικά διατομές για υδραυλική προσομοίωση, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 10-.



Σχήμα 10-13: Το όριο της κατακλυζόμενης ζώνης της λεκάνης του π. Κερυνίτη για την περίπτωση του σωστού DSM και για περίοδο επαναφοράς $T = 10$ και $T = 1000$.

Το W_{90med} ποικίλλει σε σχέση τόσο με την περίοδο επαναφοράς όσο και με το μέγεθος του σφάλμα στο DSM, με πολύ παρόμοιο τρόπο με το A_{90} (Πίνακας 10-8). Η χρήση του DSM από δεδομένα SRTM οδηγεί και πάλι σε μη ρεαλιστικά χαμηλές τιμές.

Πίνακας 10-8: Η χωρική διάμεση τιμή του ποσοστιαίου σημείου 90% των πλατών ελεύθερης επιφάνειας νερού (m) για τη λεκάνη του π. Κερυνίτη και διάφορες περιόδους επαναφοράς.

Περίπτωση	Διάμεση του ποσοστιαίου σημείου 90% των πλατών ελεύθερης επιφάνειας νερού (m) for $T =$			
	10	100	1000	10000
DSM αναφοράς	110.1	148.9	246.4	306.1
DSM, $\sigma = 0.66$ m	126.2	195.2	267.4	320.4
SRTM-based data	102.9	126.4	-	-
Βροχόπτωση	112.4	160.4	246.0	304.2

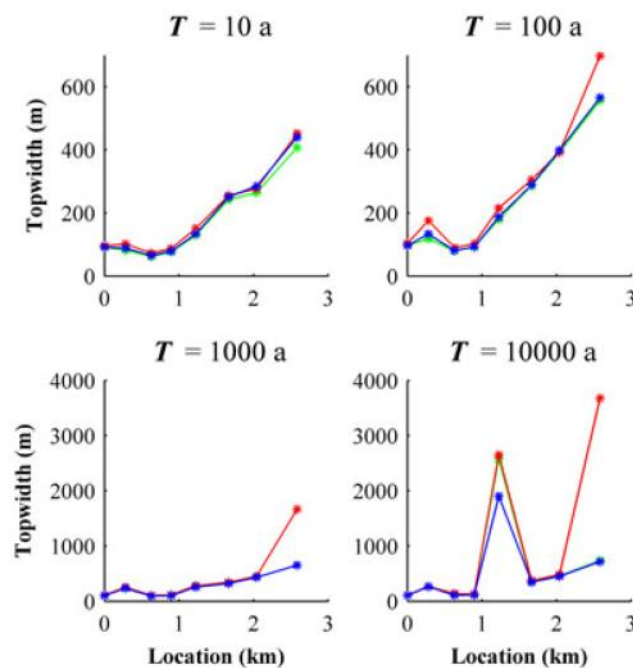
Το W_{90max} ξεκινά από περίπου 400 m για $T = 10$ και φτάνει τα 2500 m για $T = 10000$ στην περίπτωση κατά την οποία χρησιμοποιείται το DSM αναφοράς, ενώ ποικίλλει από περίπου 450 έως 3500 m για το εσφαλμένο DSM (Πίνακας 10-9). Χρησιμοποιώντας, DSM από δεδομένα SRTM, προκύπτουν και πάλι μη ρεαλιστικά χαμηλές τιμές.

Πίνακας 10-9: Το χωρικά μέγιστο του ποσοστιαίου σημείου 90% των πλατών ελεύθερης επιφάνειας νερού (m) για τη λεκάνη του π. Κερυνίτη και διάφορες περιόδους επαναφοράς.

Περίπτωση	Μέγιστο του ποσοστιαίου σημείου 90% των πλατών ελεύθερης επιφάνειας νερού (m) for $T =$			
	10	100	1000	10000
DSM αναφοράς	407.4	556.6	653.2	2576.5
DSM, $\sigma = 0.66$ m	451.6	697.4	1665.3	3677.0
SRTM-based data	162.4	183.3	-	-
Βροχόπτωση	439.3	565.8	653.2	1901.3

Η διακύμανση του ποσοστιαίου σημείου 90% των πλατών ελεύθερης επιφάνειας νερού κατά μήκος του άξονα ροής απεικονίζεται στο Σχήμα 10- για όλες τις περιόδους επαναφοράς και για τις περιπτώσεις των DSM που δοκιμάστηκαν.

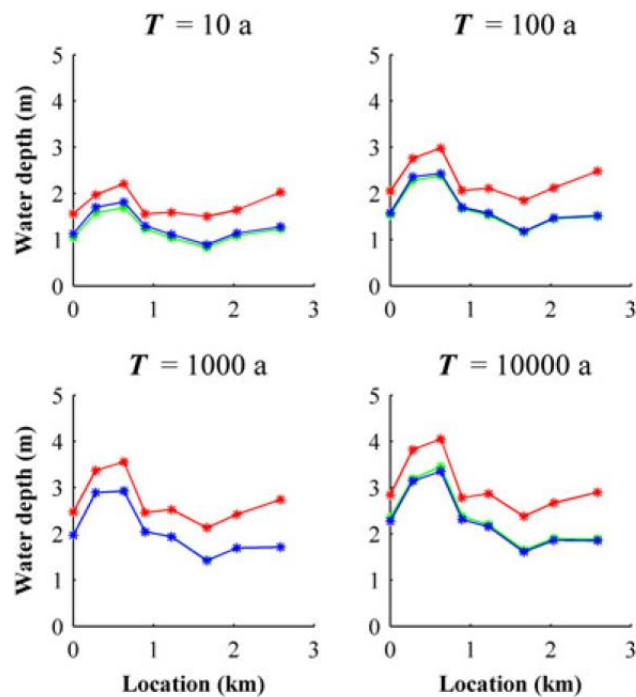
Στο Σχήμα 10-, το όριο της κατακλυζόμενης ζώνης απεικονίζεται για δύο περιόδους επαναφοράς και για το DSM αναφοράς. Όπως και στην περίπτωση της πρώτης λεκάνης, στα σχήματα 10-15 και 10-16 απεικονίζουμε αντίστοιχα τη χωρική διακύμανση του ποσοστιαίου σημείου 90% του βάρους και ταχύτητας νερού.



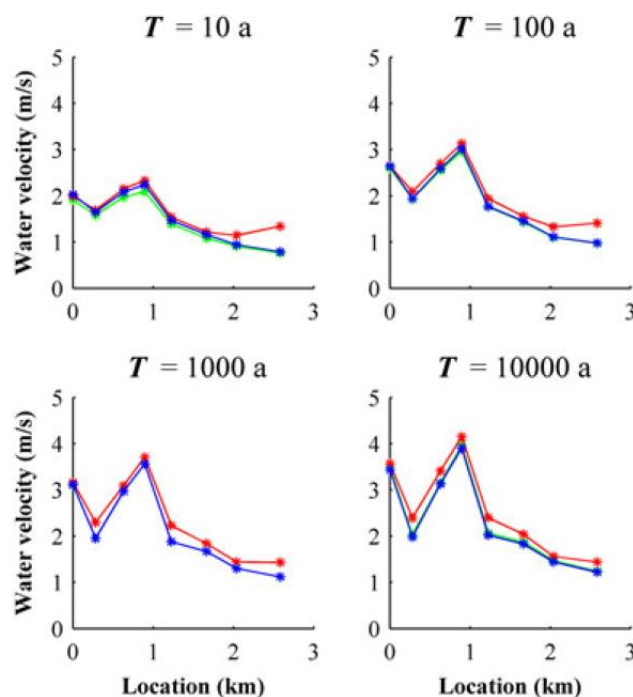
Σχήμα 10-14: Χωρική διακύμανση του ποσοστιαίου εύρους 90% των πλατών ελεύθερης επιφάνειας νερού της κατακλυζόμενης ζώνης (m) για τη λεκάνη του π. Κερυνίτη και για περιόδους επαναφοράς $T = 10, 100, 1000, 10000$, για το DSM αναφοράς (πράσινο), εσφαλμένο DSM με $\sigma = 0.66$ m (κόκκινο), και τη βροχόπτωση (μπλε).

Όπως και στην περίπτωση του Νοτιοδυτικού ρέματος Καλυβίων, η σχέση του A_{90} και $\log_{10}(T)$ είναι σχεδόν γραμμική σε όλες τις περιπτώσεις που δοκιμάστηκαν (Πίνακας 10-10). Η παράμετρος c_1 είναι περίπου 40 ha για το DSM αναφοράς και αυξάνεται στα 65 ha για το εσφαλμένο DSM. Για το DSM από δεδομένα SRTM, δεν πραγματοποιήθηκε προσαρμογή λόγω των μη ρεαλιστικών τιμών. Για το W_{90med} , το c_1 δεν επηρεάζεται από τα σφάλματα στο DSM (

Πίνακας 10-11) ενώ, για το $W_{90\max}$, το c_1 αυξάνεται από περίπου 650 m για το DSM αναφοράς έως περίπου 1.000 m για το εσφαλμένο DSM με $\sigma = 0.66$ m (Πίνακας 10-12). Από τις δύο τελευταίες περιπτώσεις, μόνο στην πρώτη περίπτωση, το c_1 είναι στατιστικά μη σημαντικό.



Σχήμα 10-15: Χωρική διακύμανση του ποσοστιαίου σημείου 90% του βάθους νερού στη διατομή για τη λεκάνη του π. Κερυνίτη για περιόδους επαναφοράς $T = 10, 100, 1000$ και 10000 , και για το DSM αναφοράς (πράσινο), εσφαλμένο DSM με $\sigma = 0.66$ m (κόκκινο), και τη βροχόπτωση (μπλε).



Σχήμα 10-16: Χωρική διακύμανση του ποσοστιαίου σημείου 90% της ταχύτητας νερού για περιόδους επαναφοράς $T = 10, 100, 1000, 10000$ και για το DSM αναφοράς (πράσινο), εσφαλμένο DSM με $\sigma = 0.66$ m (κόκκινο), και τη βροχόπτωση (μπλε).

Πίνακας 10-10: Αποτελέσματα από τη γραμμική συσχέτιση του δεκαδικού λογαρίθμου της περιόδου επαναφοράς του ποσοστιαίου σημείου 90% του ορίου της κατακλυζόμενης ζώνης για τη λεκάνη π. Κερυνίτη

Περίπτωση	c_1 (m)	c_2 (m)	R^2	p -value
DSM αναφοράς	38.8	-8.4	0.795	0.109
DSM, $\sigma = 0.66$ m	65.7	-43.0	0.820	0.094
Βροχόπτωση	29.7	8.6	0.831	0.089

c_1 = κλίση, c_2 = σταθερός όρος, R^2 = συντελεστής προσδιορισμού, p -value = η ευρέως γνωστή p -value

Πίνακας 10-11: Αποτελέσματα από τη γραμμική συσχέτιση του δεκαδικού λογαρίθμου της περιόδου επαναφοράς της χωρικής διάμεσης τιμής του ποσοστιαίου σημείου 90% των πλατών ελεύθερης επιφάνειας νερού της κατακλυζόμενης ζώνης για τη λεκάνη π. Κερυνίτη

Περίπτωση	c_1 (m)	c_2 (m)	R^2	p -value
DSM αναφοράς	68.6	31.4	0.976	0.012
DSM, $\sigma = 0.66$ m	65.5	63.6	0.996	0.002
Βροχόπτωση	66.1	40.5	0.989	0.005

Πίνακας 10-12: Αποτελέσματα από τη γραμμική συσχέτιση του δεκαδικού λογαρίθμου της περιόδου επαναφοράς του χωρικού μεγίστου του ποσοστιαίου σημείου 90% του ορίου της κατακλυζόμενης ζώνης για τη λεκάνη π. Κερυνίτη

Περίπτωση	c_1 (m)	c_2 (m)	R^2	p -value
DSM αναφοράς	660.4	-602.6	0.694	0.167
DSM, $\sigma = 0.66$ m	1064.4	-1038.2	0.878	0.063
Βροχόπτωση	447.3	-228.5	0.721	0.151

Από την εξέταση των πινάκων του παρόντος εδαφίου προκύπτει ότι η αβεβαιότητα του ορίου της κατακλυζόμενης περιοχής μεταβάλλεται κατά τρόπο ανάλογο εκείνου που διαπιστώθηκε στην λεκάνη του Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο. Λόγω του πεδινού χαρακτήρα της εξετασθείσας κατάντη λεκάνης σε συνδυασμό με τις υψηλές παροχές αιχμής του ορεινού τμήματος που έχει έντονες κλίσεις εδάφους και έκταση πολλαπλάσια εκείνης του Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων, οι αποκλίσεις στα μεγέθη που σχετίζονται με την κατακλυζόμενη περιοχή είναι γενικά μεγαλύτερες εκείνων της λεκάνης του Νοτιοδυτικού Ρέματος Καλυβίων. Ποιοτικά, πάντως, συμφωνούν με τα μεγέθη που λήφθηκαν σε εκείνη τη λεκάνη.

10.7 Σύνοψη

Ο προσδιορισμός των ορίων της κατακλυζόμενης ζώνης λόγω εμφάνισης πλημμυρικών φαινομένων αποτελεί μείζον ζήτημα σε ό,τι αφορά στην εφαρμογή της κοινοτικής οδηγίας για τις πλημμύρες (Οδηγία Ε.Ε. 2007/60, European Council 2007, Tsakiris et al., 2009). Στο Κεφάλαιο 10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την διερεύνηση της επίδρασης της αβεβαιότητας στην διατιθέμενη σχετικά με την γήινη επιφάνεια πληροφορία επί της εκτάσεως των περιοχών που κατακλύζονται. Για την αναπαράσταση της γήινης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν Ψηφιακά Μοντέλα Επιφάνειας υψηλής ακρίβειας ως προς την υψομετρική κυρίως πληροφορία.

Συνοπτικά, για λόγους πληρότητας αναφέρεται όλη η διαδικασία για την προσομοίωση του φαινομένου της πλημμύρας, κατά την οποία έγινε χρήση τυπικών υδρολογικών και υδραυλικών μεθόδων. Στο μεν ανάντη τμήμα της θεωρούμενης λεκάνης απορροής εκτιμήθηκε το πλημμυρικό υδρογράφημα για ποικιλία τιμών της περιόδου επαναφοράς και, στη συνέχεια, πραγματοποιείται διόδευση στο κατάντη πεδινό τμήμα της θεωρούμενης λεκάνης, όπου και έγινε η χάραξη του πλημμυρικού πεδίου. Η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας στο ΨΜΕ πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο Monte Carlo. Στο πλαίσιο της διατριβής μελετήθηκε μόνον η αβεβαιότητα του ΨΜΕ, ενώ στο σύνολο του ερευνητικού έργου «Επίδραση της αβεβαιότητας των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους στην αβεβαιότητα των κατακλυζόμενων εκτάσεων λόγω πλημμύρας», μελετήθηκε επιπλέον ο παράγοντας της βροχόπτωσης. Από τα αποτελέσματα που λήφθηκαν με βάση τα δεδομένα από δύο πραγματικές λεκάνες του ελληνικού χώρου και από την μελέτη της επίδρασης της αβεβαιότητας του DSM στο όριο της κατακλυζόμενης ζώνης λόγω πλημμυρών, τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται ως εξής:

- Προκειμένου να οροθετηθεί η κατακλυζόμενη περιοχή για πλημμυρικά φαινόμενα υψηλής, μέσης και χαμηλής πιθανότητας, η χωρική πληροφορία με τη μορφή ΨΜΕ αποτελεί πολύτιμη πληροφορία που είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί από σύγχρονα υδρολογικά και υδραυτικά μοντέλα. Η παραπάνω διαπίστωση επιτρέπει την ανάδειξη των ΨΜΕ σε σημαντικά εργαλεία για την εφαρμογή της Οδηγίας για τις πλημμύρες.
- Η αβεβαιότητα στην οριοθέτηση των κατακλυζόμενων περιοχών αυξάνεται με την αύξηση της αβεβαιότητας στο χρησιμοποιούμενο ΨΜΕ. Η αύξηση αυτή είναι μικρή, της τάξης ολίγων μέτρων, σε λεκάνες ορεινές και ημιορεινές. Αντίθετα, σε λεκάνες με ήπιο ανάγλυφο η αύξηση είναι, όπως ήταν αναμενόμενο, μεγαλύτερη.
- Από την διερεύνηση προέκυψε ότι η κλασική διαδικασία χαρτογράφησης των κατακλυζόμενων περιοχών δεν επαρκεί απόλυτα για την επιτυχή εφαρμογή της Οδηγίας για τις πλημμύρες και απαιτείται και η εξέταση, κατά περίπτωση, της αβεβαιότητας στην κατακλυζόμενη περιοχή σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε.
- Όπως ήταν αναμενόμενο, βρέθηκε το ποσοστιαίο σημείο 90% του ορίου της κατακλυζόμενης ζώνης από πλημμύρα βρέθηκε να αυξάνει γραμμικά με τον λογάριθμο της περιόδου επαναφοράς. Το ίδιο παρατηρήθηκε στη συμπεριφορά της διάμεσης τιμής και του μεγίστου ποσοστιαίου σημείου 90% των πλατών ελεύθερης επιφάνειας νερού. Τα αποτελέσματα αναφέρονται σε σημειακές εκτιμήσεις αυτών των τριών κριτήριων πλημμύρας.
- Ο ρυθμός αύξησης στις προαναφερθείσες γραμμικές σχέσεις είναι προσδιορισμένος σε επίπεδο λεκάνης απορροής: κυμαίνεται από 30 έως 70 m και από 70 έως περισσότερα από 500 m για τη διάμεση τιμή και το μέγιστο ποσοστιαίου σημείου των πλατών ελεύθερης επιφάνειας νερού, αντίστοιχα.
- Ο προαναφερόμενος ρυθμός αύξησης βρέθηκε να αυξάνεται ανάλογα με το μέγεθος της αβεβαιότητας στο DSM.
- Και στις δύο λεκάνες απορροής που εξετάστηκαν, παρατηρήθηκε ότι η χαμηλή αβεβαιότητα στο DSM τείνει να διευρύνει το όριο της κατακλυζόμενης ζώνης, ενώ για υψηλή αβεβαιότητα στο DSM, εμφανίζεται το αντίθετο αποτέλεσμα. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιώντας ένα πολύ αβέβαιο DSM για τη χαρτογράφηση των ορίων της κατακλυζόμενης ζώνης είναι πολύ πιθανό αυτό να οδηγήσει σε μη ασφαλή συμπεράσματα.

- Εκτός από την εφαρμογή σημειακών εκτιμήσεων των κριτηρίων εντοπισμού της κατακλυζόμενης ζώνης, διερευνήθηκαν επίσης εκτιμήσεις διαστήματος (interval estimates) εστιάζοντας κυρίως στο ποσοστιαίο σημείο 90% των πλατών ελεύθερης επιφάνειας νερού. Για αυτό, ένα νέο κριτήριο που εκφράζει τη σχετική αβεβαιότητα της σημειακής εκτίμησης. Για περιπτώσεις με χαμηλή αβεβαιότητα στο DSM, τιμές του κριτηρίου αυτού κάτω του 0.10 έχουν επιτευχθεί κατά τη διάρκεια της μελέτης με εξαίρεση πολύ λίγες διατομές, στις οποίες εμφανίζεται πλευρική ροή. Αυτό δείχνει μια αρκετά ακριβή εκτίμηση. Αυτός ο στόχος κάτω του 0.10 ήταν, ωστόσο, ανέφικτος σε περιπτώσεις υψηλής αβεβαιότητας στο DSM.
- Ως προς το DSM από δεδομένα SRTM αποδείχθηκε ακατάλληλο για τη μονοδιάστατη, υδραυλική μοντελοποίηση του πλημμυρικού πεδίου σε κοιλάδες ποταμών με μικρές μέσες εγκάρσιες κλίσεις εδάφους, δηλαδή, από 1,6% έως 3,9%. Αυτό, οφείλεται στην υψηλή αβεβαιότητα στις τιμές του υψομέτρου και στη χαμηλή χωρική ανάλυση του DSM. Πιο συγκεκριμένα, στις δοκιμές, η τυπική απόκλιση πρόσθετων σφαλμάτων του υψομέτρου (σε σχέση με το DSM αναφοράς) ήταν 3 έως 20 φορές μεγαλύτερη από αυτή στο DSM από άλλες πηγές, όπως από συμβατικούς τοπογραφικούς χάρτες και αεροφωτογραφίες. Η χωρική ανάλυση αυτού (περίπου 30 m) ήταν σαφώς πιο αδρομερής από αυτήν των DSM από άλλες πηγές (5 έως 10 m) και σαφώς χαμηλότερη από το χωρικό βήμα που χρησιμοποιείται στις διατομές (εδώ επιλέχθηκαν τα 20 m).
- Όσον αφορά το μεθοδολογικό πλαίσιο για τη χαρτογράφηση και τον εντοπισμό των πλημμυρικών κινδύνων, έχει αποδειχθεί ότι για μια εξαιρετικά ακριβή εκτίμηση του ορίου της κατακλυζόμενης ζώνης βάσει ΨΜΕ απαιτείται ψηφιακή πληροφορία υψηλής ποιότητας ως προς την τοπογραφία του εδάφους, έχοντας τυπική απόκλιση σφαλμάτων, περίπου κάτω από 0.50 m. Αυτό φυσικά οδηγεί στην επιλογή προϊόντων από νεότερες τεχνολογίες όπως το LiDAR ή σε υψηλής ανάλυσης αεροφωτογραφίες ή δορυφορικές εικόνες.

11 Συμπεράσματα

11.1 Σύνοψη – Συμπεράσματα

Στόχος της διατριβής είναι η αξιοποίηση της πληροφορίας σχετικά με την γήινη επιφάνεια στην ανάδειξη προτεινόμενων μεθοδολογιών για την εκτίμηση ή τον προσδιορισμό παραγόντων σχετικών με την παραγόμενη απορροή των λεκανών απορροής. Η αξιοποίηση των ποσοτήτων του επιφανειακού νερού από τον άνθρωπο, αλλά και η κατασκευή έργων για την προστασία από πλημμύρες, προϋποθέτουν την αξιοποίηση μετρήσεων της απορροής. Όπως αναφέρθηκε στο εισαγωγικό Κεφάλαιο 1, η πλειονότητα των λεκανών απορροής παγκοσμίως είναι μη μετρούμενες ως προς το μέγεθος της απορροής, γεγονός το οποίο οδηγεί σε αβέβαιες υδρολογικές και υδραυλικές προσομοιώσεις. Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την γένεση της απορροής μιας λεκάνης είναι ποικίλοι, με αποτέλεσμα τη μεγάλη χρονική και χωρική αβεβαιότητα των σχετικών εκτιμήσεων. Η πολυπλοκότητα της σχέσης μεταξύ της απορροής και των παραπάνω παραγόντων (τοπογραφία, κλίμα και μετεωρολογία καθώς και το έδαφος και η βλάστηση) είναι επίσης γνωστή, όπως και οι διεργασίες οι οποίες σχετίζονται με την απορροή στην επιφάνεια του εδάφους.

Σκοπός της διατριβής είναι η αναζήτηση μεγεθών τα οποία μπορούν να επιτρέψουν την εκτίμηση της απορροής μιας μη μετρούμενης λεκάνης απορροής μέσω της χρήσης άλλων μεγεθών υδρολογικού ενδιαφέροντος, ή μέσω της εφαρμογής μεθοδολογιών οι οποίες επιτρέπουν τη μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας στο χώρο.

Θεμελιώδης ιδέα της διατριβής είναι να εντοπιστεί ένα σύστημα κατάταξης λεκανών απορροής, το οποίο θα εξασφαλίζει την ομοιότητα, ως προς την υδρολογική συμπεριφορά, των λεκανών που ανήκουν στην ίδια κλάση. Μέχρι σήμερα, δεν υπάρχει κοινά αποδεκτό σύστημα ταξινόμησης των λεκανών απορροής, διαπίστωση η οποία σχετίζεται με την αβεβαιότητα πρόβλεψης της υδρολογικής συμπεριφοράς μιας λεκάνης. Στην προσπάθεια μείωσης αυτής της αβεβαιότητας, το υδρολογικό ενδιαφέρον στράφηκε τα τελευταία χρόνια στην κατανόηση των διεργασιών μιας λεκάνης και στη μελέτη της επίδρασης των διαφόρων παραγόντων στη γένεση της απορροής.

Μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση στο θέμα αποτελεί η αποκλειστική χρήση τοπικής πληροφορίας σχετικής με το γήινο ανάγλυφο (π.χ., μορφομετρικών χαρακτηριστικών) των λεκανών απορροής. Αυτή η προσέγγιση εντάσσεται στο πλαίσιο της σύγχρονης τάσης για αποδέσμευση από συστηματικές μετρήσεις υδρολογικών μεγεθών. Επίσης, αυτή η τάση θέτει στο επίκεντρο του ερευνητικού ενδιαφέροντος τις γνώσεις για τις φυσικές υδρολογικές διεργασίες και την κατανόηση αυτών σε ένα εύρος χωροχρονικών κλιμάκων.

Αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων αποκλειστικής χρήσης μορφομετρικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής για την κατάταξή τους σε κατηγορίες υδρολογικά όμοιων λεκανών. Η δομή της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου αυτής εξετάζονται μέσω της χρήσης πληροφορίας σχετικής με το γήινο ανάγλυφο, η οποία αντλείται από Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ), ενώ κλιματικές παράμετροι όπως η βροχόπτωση, συμβάλλουν επίσης στον αρχικά ορισμένο στόχο. Στόχος, επομένως, της διατριβής είναι η διαμόρφωση ενός πρωτότυπου μεθοδολογικού πλαισίου αντιμετώπισης της έλλειψης μετρήσεων απορροής, μέσω του οποίου να μελετώνται κατάλληλα μορφομετρικά χαρακτηριστικά, τα οποία να υπολογίζονται εύκολα από το ΨΜΕ της εξεταζόμενης λεκάνης

απορροής και να επιτρέπουν την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης απορροής. Σύμφωνα με αυτήν τη λογική είναι το προτεινόμενο σύστημα κατάταξης των μη μετρούμενων λεκανών απορροής (σε κλάσεις όμοιας υδρολογικής συμπεριφοράς) το οποίο κυρίως χρησιμοποιεί μορφομετρικά χαρακτηριστικά ως κριτήρια κατάταξης. Με γνώμονα την υδρολογική ομοιότητα ελέγχεται, μέσω ενός κατάλληλου μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής, η δυνατότητα μεταφοράς της υδρολογικής πληροφορίας μεταξύ των λεκανών απορροής της ίδιας κλάσης. Για την επίτευξη του παραπάνω κύριου στόχου της διατριβής τίθενται τα παρακάτω ερευνητικά ερωτήματα.

Ερώτημα 1: Πως είναι δυνατό να μεταφερθεί υδρολογική πληροφορία από μια μετρούμενη λεκάνη απορροής σε μια μη μετρούμενη, όταν η προσέγγιση είναι αδιαμέριστη (lumped) στο χώρο και η χρονική κλίμακα αδρή (π.χ. ημερήσια, μηνιαία);

Ερώτημα 2: Πως είναι δυνατό να εξαχθεί το υδρογραφικό δίκτυο μιας λεκάνης απορροής με βάση αντικειμενική πληροφορία από ΨΜΕ, μιας και αυτό αποτελεί στοιχείο βαρύνουσας σημασίας για τη μελέτη της υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης απορροής και, επί πλέον, ποια είναι η χωροχρονική διακύμανση αυτού;

Ερώτημα 3: Πως είναι δυνατό να μεταφερθεί υδρολογική πληροφορία από μια μετρούμενη λεκάνη σε μια μη μετρούμενη, όταν η προσέγγιση είναι αδιαμέριστη στο χώρο, και η χρονική κλίμακα είναι λεπτή (π.χ. 1 h), κατάλληλη, επομένως, για την πρόβλεψη πλημμυρικών μεγεθών;

Ερώτημα 4: Πως είναι δυνατό να μεταφερθεί υδρολογική πληροφορία από μια μετρούμενη σε μια μη μετρούμενη λεκάνη απορροής, όταν η προσέγγιση είναι ημικατανεμημένη (semi-distributed) στο χώρο, και η χρονική κλίμακα είναι αδρή;

Στο πρώτο ερευνητικό ερώτημα, εξετάστηκε η δυνατότητα ταξινόμησης λεκανών απορροής σε κλάσεις με παρόμοια απόκριση στις μετεωρολογικές διεγέρσεις. Η βασική ιδέα πίσω από την αδιαμέριστη ταξινόμηση των λεκανών απορροής είναι η δυνατότητα ταξινόμησης με χρήση κλιματικών μεταβλητών και πληροφορίας από το γήινο ανάγλυφο, όπως τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Σύμφωνα με την προτεινόμενη διαδικασία γίνεται προσπάθεια υποκατάστασης των μετρήσεων απορροής μέσω των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης, ενώ επιλέγεται και η βροχόπτωση καθώς αυτή η μετεωρολογική μεταβλητή μετριέται στην πλειονότητα των λεκανών απορροής.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία ταξινόμησης περιλαμβάνει δύο βήματα. Στόχος αυτής είναι να ταξινομηθεί μια λεκάνη, η οποία θεωρείται μη μετρούμενη με γνωστά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, υπολογισμένα από το ΨΜΕ αυτής, και γνωστή βροχόπτωση από μετρήσεις, σε μια κλάση με όμοιες με αυτήν λεκάνες απορροής. Στο πρώτο βήμα, εκτελείται μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Fuzzy c-means για να προσδιοριστεί ο αριθμός των κλάσεων των λεκανών, καθώς και οι ίδιες οι κλάσεις με βάση υδρολογική πληροφορία. Στο δεύτερο βήμα, εκτελείται επιβλεπόμενη ταξινόμηση μέσω της μεθόδου k-Nearest Neighbour και με γνωστά τα παρακάτω στοιχεία από το προηγούμενο βήμα, δηλαδή, τις ίδιες τις κλάσεις και τον αριθμό τους, αναζητείται η σχέση μεταξύ των μορφομετρικών χαρακτηριστικών των λεκανών, δηλαδή των παραγόντων πρόβλεψης, και των κλάσεων οι οποίες έχουν δημιουργηθεί στο πρώτο βήμα. Βάσει της σχέσης αυτής, στη συνέχεια, η μη μετρούμενη λεκάνη απορροής ταξινομείται στη κατάλληλη κλάση, σύμφωνα με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της.

Στη συνέχεια γίνεται επέκταση του μεθοδολογικού πλαισίου της υδρολογικής ταξινόμησης ώστε να ελεγχθεί αν είναι δυνατή η μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας μεταξύ όμοιων

υδρολογικά λεκανών απορροής. Για τη μεταφορά της υδρολογικής πληροφορίας χρησιμοποιείται μια τροποποιημένη εκδοχή του μοντέλου FLEX-Toro (Savenije, 2010) και ο έλεγχος γίνεται σε δύο λεκάνες απορροής οι οποίες ανήκουν στην ίδια κλάση και συγκεκριμένα, στην Κλάση 3.

Βάσει των αποτελεσμάτων, τα οποία παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6, αποδεικνύεται ότι είναι δυνατή η ταξινόμηση των μη μετρούμενων λεκανών σε κλάσεις μέσω της χρήσης των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών τους και ότι είναι δυνατή η μεταφορά και χρήση των παραμέτρων του μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής από την δότρια λεκάνη (μετρούμενη λεκάνη απορροής) στη μη μετρούμενη λεκάνη απορροής, η οποία όμως έχει ταξινομηθεί και ανήκει στην ίδια κλάση με τη δότρια. Ως μέτρο επίδοσης του μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης NSE.

Από τη διερεύνηση της διαδικασίας ταξινόμησης σε 24 λεκάνες απορροής του ελληνικού χώρου, ως προς την ταξινόμηση των λεκανών απορροής με βάση τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, όπως αυτά υπολογίζονται από το ΨΜΕ, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Οι υδρολογικές υπογραφές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στο πρώτο βήμα της μεθοδολογίας παρέχουν ξεκάθαρη πληροφορία για τη διάκριση του μηχανισμού γένεσης της απορροής.
- Η χρήση της βροχόπτωσης σε συνδυασμό με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά εξασφαλίζει επιτυχή αναγνώριση της κλάσης στην οποία ανήκει η κάθε ταξινομούμενη λεκάνη απορροής.
- Από τη διαδικασία ταξινόμησης, προέκυψαν τέσσερις κλάσεις που έχουν νόημα από υδρολογική άποψη και επιτρέπουν τον ορισμό της δομής ενός υδρολογικού συστήματος ταξινόμησης λεκανών απορροής.
- Το ποσοστό επιτυχίας της διαδικασίας είναι εύκολο να ελεγχθεί μιας και για όλες τις λεκάνες απορροής υπάρχουν υδρολογικά δεδομένα ώστε με βάση το πρώτο βήμα ταξινόμησης να είναι γνωστή η κλάση της κάθε λεκάνης. Το ποσοστό επιτυχίας ήταν μεγαλύτερο από 95%, ως προς τον εντοπισμό της ορθής κλάσης της υπό ταξινόμηση λεκάνης, ενώ, οι λεκάνες ταξινομούνται σε 4 κλάσεις, τα γενικά ποιοτικά χαρακτηριστικά των οποίων περιγράφονται με υδρολογικούς όρους (Κεφ. 6).
- Για την μελέτη του συγκεκριμένου θέματος, δηλαδή, της ταξινόμησης των μη μετρούμενων λεκανών απορροής, καταρτίστηκε και ελέγχθηκε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο, το οποίο χρησιμοποιεί γνωστές και ευρέως δοκιμασμένες επιμέρους μεθόδους. Το μεθοδολογικό αυτό πλαίσιο είναι πρωτότυπο και αποδείχθηκε αποδοτικό και αποτελεσματικό.
- Έχει αναπτυχθεί ένα πρωτότυπο σύστημα ταξινόμησης μη μετρούμενων λεκανών απορροής, σύμφωνα με το οποίο, τα βασικά κριτήρια κατάταξης είναι γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής, που μπορούν να εξαχθούν άμεσα και εύκολα από το ΨΜΕ. Οι υδρολογικές όμοιες κλάσεις αλλά και το μεθοδολογικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε επιτρέπουν την κατάταξη μη μετρούμενων λεκανών σε μια κλάση, με χρήση γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών και, στη συνέχεια, τη μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας (π.χ., των παραμέτρων ενός μοντέλου βροχόπτωσης απορροής) ή την υιοθέτηση απευθείας της απορροής των λεκανών απορροής που ανήκουν στην ίδια κλάση, με την μη μετρούμενη λεκάνη απορροής.

Επίσης, από τη διερεύνηση για τη μεταφορά της υδρολογικής πληροφορίας μεταξύ των λεκανών απορροής που ανήκουν στην ίδια κλάση, μέσω της υδρολογικής προσομοίωσης και τη χρήση μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας στο χώρο στο πλαίσιο της υδρολογικής ομοιότητας, όπως αυτή εξετάστηκε στην παρούσα διατριβή, οδηγεί σε απώλεια πληροφορίας η οποία χαρακτηρίζεται πολύ μικρή και δεν αλλοιώνει ουσιαστικά την ποιότητα προσομοίωσης της υδρολογικής συμπεριφοράς της εξεταζόμενης λεκάνης απορροής η οποία δέχεται την πληροφορία.
- Οι διαφορές των τιμών του δείκτη NSE στην περίπτωση κατά την οποία η λεκάνη απορροής βαθμονομείται με βάση τις πραγματικές παρατηρημένες παροχές στην έξοδό της, σε σύγκριση με την περίπτωση κατά την οποία μεταφέρονται και χρησιμοποιούνται οι παράμετροι του μοντέλου βροχόπτωσης απορροής από άλλη λεκάνη απορροής (δότερια) προέκυψαν μικρές.
- Οι τιμές του δείκτη NSE που υπολογίστηκαν είναι γενικά χαμηλές αλλά αντίστοιχης τάξης μεγέθους και στις δύο περιπτώσεις (από βαθμονόμηση στην ίδια τη λεκάνη και από μεταφορά πληροφορίας από άλλη, όμοια λεκάνη), πιθανότατα λόγω της χαμηλής ποιότητας και ακρίβειας των δεδομένων βροχόπτωσης και απορροής.
- Η μικρή διαθεσιμότητα και η χαμηλή ποιότητα των υδρολογικών δεδομένων, η αραιή χωρική και χρονική ανάλυση των χρονοσειρών των δεδομένων, καθώς η ύπαρξη ορισμένων κενών στις χρονοσειρές είναι μερικοί από τους πιο σοβαρούς περιορισμούς που πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν κυρίως τα υδρολογικά δεδομένα, ενώ, σε μικρότερο βαθμό, απασχολούν περιορισμοί ως προς τα γεωχωρικά δεδομένα.

Στο δεύτερο ερευνητικό ερώτημα, αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα του αντικειμενικού προσδιορισμού του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής, το οποίο αποτελεί κρίσιμο στοιχείο στην εκτίμηση χρήσιμων γεωμορφολογικών μεγεθών.

Ερευνήθηκε τόσο η χωρική όσο και η χρονική διακύμανση του κατωφλίου της ανάντη έκτασης για τον προσδιορισμό του υδρογραφικού δικτύου, που εδώ σημειώνεται ως Ανάντη Συμβάλλουσα Έκταση (ΑΣΕ). Επειδή ένα υδρογραφικό δίκτυο αποτελείται από εφήμερα ρέματα τα οποία συρρικνώνονται εποχιακά καθώς και από κλάδους συνεχούς ροής οι οποίοι δεν μεταβάλλονται, για τον προσδιορισμό του υδρογραφικού δικτύου πρέπει να εκτιμηθεί η κατάλληλη ΑΣΕ. Προφανώς, η ΑΣΕ μεταβάλλεται χρονικά και η διακύμανση αυτή είναι κρίσιμο στοιχείο για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου.

Η χωροχρονική μεταβολή της ΑΣΕ μελετήθηκε σε τρεις λεκάνες απορροής και έγινε προσπάθεια συσχέτισης της τιμής της ΑΣΕ με γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της ανάντη έκτασης της κάθε κεφαλής ρέματος. Για τον σκοπό αυτό, εξετάστηκε ένας σημαντικός αριθμός μοντέλων παλινδρόμησης. Τα συμπεράσματα από τη μελέτη αυτή συνοψίζονται στα εξής:

- Δεν εντοπίστηκε στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ της ΑΣΕ και των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της έκτασης ανάντη της κάθε κεφαλής ρέματος.
- Κατόπιν της απουσίας στατιστικά σημαντικής συσχέτισης της ΑΣΕ και των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της έκτασης ανάντη της κάθε κεφαλής ρέματος, προτάθηκε η χρήση της διάμεσης τιμής των τιμών ΑΣΕ που αντιστοιχούν στις κεφαλές ρέματος.

- Οι συμβατικοί τοπογραφικοί χάρτες βασικής χωρικής κλίμακας, π.χ. 1:50000, είναι κατάλληλοι και χρήσιμοι για εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τις κεφαλές των υδατορευμάτων πρώτης τάξης και, κατά συνέπεια, και για την εκτίμηση της ΑΣΕ. Μόνη προϋπόθεση είναι οι χάρτες να περιέχουν πληροφορίες τόσο για τα εφήμερα ρεύματα όσο και για τα ρέματα μόνιμης ροής μιας λεκάνης απορροής.
- Αναζητήθηκαν σχέσεις μεταξύ της ΑΣΕ, η οποία εκτιμάται από τοπογραφικό χάρτη, και ορισμένων τυπικών μορφομετρικών χαρακτηριστικών, όπως τα στατιστικά μεγέθη της κλίσης του εδάφους, της τετραγωνικής ρίζας της κλίσης αυτής, και του δείκτη HAND, χρησιμοποιώντας μοντέλα παλινδρόμησης. Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο των μοντέλων παλινδρόμησης έδειξαν ότι όλες οι σχέσεις βρέθηκαν να είναι χαμηλής ακρίβειας. Ωστόσο, παρά τη χαμηλή επίδοση όλων των μοντέλων πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, η βηματική παλινδρόμηση αποδείχθηκε ότι αποδίδει καλύτερα από την κλασική πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση.
- Η προτεινόμενη διάμεση τιμή της ΑΣΕ του προηγούμενου σημείου είναι προφανώς διαφορετική για την υγρή και την ξηρή περίοδο του έτους. Για την ενδιάμεση εποχή (φθινόπωρο και άνοιξη) προτάθηκε ως λύση η χρήση της μέσης τιμής των ΑΣΕ της υγρής και την ξηρής περιόδου.
- Στην περίπτωση αναζήτησης τιμής της ΑΣΕ για μια μη μετρούμενη λεκάνη απορροής, προτείνεται η υιοθέτηση της διάμεσης τιμής ΑΣΕ των λεκανών απορροής της ίδια κλάσης. Προφανώς, σε αυτήν την περίπτωση, είναι αναγκαία προϋπόθεση η εφαρμογή αδιαμέριστης ταξινόμησης.
- Όσον αφορά τη χρονική διακύμανση της ΑΣΕ, αποδεικνύεται ότι είναι σημαντικό να γίνεται διάκριση μεταξύ της υγρής και της ξηρής περιόδου του υδρολογικού έτους. Στο πλαίσιο της εφαρμογής, η μελέτη των κεφαλών των εφήμερων και των μόνιμων κλάδων του υδρογραφικού δικτύου επέτρεψε μια έστω χονδρική διάκριση μεταξύ των τιμών της ΑΣΕ για την υγρή και την ξηρή περίοδο.

Σε ό,τι αφορά στο τρίτο ερευνητικό ερώτημα, διατυπώθηκαν συμπεράσματα ως προς το πρόβλημα της κατάρτισης Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος (ΣΜΥ) μιας λεκάνης απορροής. Διερευνήθηκε η δυνατότητα αξιοποίησης, στην εκτίμηση της παροχής σχεδιασμού υδραυλικών έργων, της μεθόδου εκτίμησης του Στιγμαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος υπό τη μορφή της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους (Rescaled Width Function, ή RWF).

Η μέθοδος RWF λαμβάνει υπόψη την ετερογένεια τόσο του γήινου αναγλύφου, όσο και της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου και, στο πλαίσιο της διατριβής, τροποποιήθηκε με αξιοποίηση των ερευνητικών αποτελεσμάτων σχετικών με την ΑΣΕ. Εξετάζονται και συγκρίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα δύο μεθοδολογιών οι οποίες αφορούν την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου: της προτεινόμενης ΑΣΕ και της μεθόδου κατά Tucker et al. (2001).

Η εφαρμογή του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου γίνεται σε έξι λεκάνες απορροής του ελλαδικού χώρου, ενώ για μία λεκάνη απορροής, τη λεκάνη του π. Ευήνου, είναι διαθέσιμο το Μοναδιαίο Υδρογράφημα 1 h με βάση μετρήσεις βροχόπτωσης και απορροής. Από την εφαρμογή, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η μέθοδος της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους (RWF) είναι μια πρόσφορη μέθοδος για την κατάρτιση συνθετικών Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων, καθόσον αυτή απαιτεί, από την άποψη των δεδομένων, μόνον τη διαθεσιμότητα ενός ΨΜΕ της εξεταζόμενης λεκάνης. Η μέθοδος αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη για την κατάρτιση Συνθετικών Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων.

- Η μέθοδος RWF εξετάστηκε υπό τη μορφή δύο εκδοχών αυτής, την κλασική εκδοχή (cRWF) και την σταθμισμένη, μέσω της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου (ddRWF). Η κλασική εκδοχή της μεθόδου (cRWF) υποεκτιμά την παροχή αιχμής και υπερεκτιμά τον χρόνο ανόδου του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος σε σχέση με τη νέα, την τροποποιημένη εκδοχή της μεθόδου (μέθοδος ddRWF).
- Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από τη συνέχεια της διερεύνησης κατά το 2022, οι τυπικές τιμές της ταχύτητας ροής σε υδατόρευμα που πρότειναν οι Di Lazzaro et al. (2015) είναι υπερβολικά μικρές όπως αποδείχθηκε από το Μοναδιαίο Υδρογράφημα με βάση τις μετρήσεις βροχόπτωσης και απορροής στη λεκάνη απορροής του Ευήνου. Η προσαρμογή της ταχύτητας ροής σε υδατόρευμα στην εν λόγω λεκάνη επέτρεψε μια πολύ καλή εκτίμηση του χρόνου ανόδου (με υστέρηση μόνον 1 h) και της παροχής αιχμής (με υπερεκτίμηση 12%) του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος 1 h.
- Με χρήση τυπικών τιμών των κινηματικών παραμέτρων της μεθόδου (ταχύτητες ροής σε πλαγιά και υδατόρευμα), και οι δύο εκδοχές της μεθόδου RWF υποεκτιμούν την παροχή αιχμής και υπερεκτιμούν τον χρόνο ανόδου του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος, σε σχέση με την ευρέως γνωστή μέθοδο του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας. Οι διαφορές είναι αρκετά μικρότερες στην περίπτωση της εκδοχής ddRWF, γεγονός που συνηγορεί υπέρ της τελευταίας.
- Η αναγωγή της ταχύτητας ροής σε υδατόρευμα από τη λεκάνη απορροής του Ευήνου σε άλλες πέντε λεκάνες απορροής του ελληνικού χώρου με βάση την μέση κλίση των ρεμάτων, έδωσε χρόνο ανόδου του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος 1 h με υστέρηση 1 h έως 4 h και αποκλίσεις στην παροχή αιχμής από +11 % έως -45 % σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας.
- Για τον σχεδιασμό υδραυλικών έργων απαιτείται περαιτέρω έρευνα στις λεκάνες απορροής στις οποίες δεν υπάρχουν μετρήσεις απορροής.

Ως προς τη διερεύνηση της επίδρασης της αβεβαιότητας στην διατιθέμενη σχετικά με την γήινη επιφάνεια πληροφορία επί της εκτάσεως των περιοχών που κατακλύζονται λόγω πλημμύρας, αξιοποιήθηκαν διαθέσιμα αποτελέσματα από έρευνα η οποία έχει γίνει στο παρελθόν, ως προς την προσομοίωση του πλημμυρικού φαινομένου και την εκτίμηση του πλημμυρικού υδρογραφήματος σχεδιασμού για διάφορες τιμές της περιόδου επαναφοράς.

Για την αναπαράσταση της γήινης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν ΨΜΕ και τοπογραφική πληροφορία από φωτογραμμετρικά δεδομένα και τοπογραφικά διαγράμματα. Στο πλαίσιο της διατριβής, έγινε ο προσδιορισμός των ορίων της κατακλυζόμενης ζώνης λόγω εμφάνισης πλημμυρικών φαινομένων διαφορετικών περιόδων επαναφοράς σχεδιασμού. Έγινε, επίσης, ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας στο ΨΜΕ, μέσω της μεθόδου Monte Carlo. Η χάραξη των ορίων έγινε στο κατάντη τμήμα δύο λεκανών απορροής της ελληνικής επικράτειας και εξήχθησαν νέοι, πρωτότυποι δείκτες, οι οποίοι οδηγούν σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της αβεβαιότητας στο ΨΜΕ. Από τα αποτελέσματα που λήφθηκαν με βάση τα δεδομένα από τις δύο λεκάνες εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Προκειμένου να οριοθετηθεί η κατακλυζόμενη περιοχή από πλημμυρικά φαινόμενα υψηλής, μέσης και χαμηλής πιθανότητας, η χωρική πληροφορία με τη μορφή ΨΜΕ είναι πολύτιμη, και είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί από σύγχρονα υδρολογικά και υδραυλικά μοντέλα. Η παραπάνω διαπίστωση επιτρέπει την ανάδειξη των ΨΜΕ σε σημαντικά εργαλεία για τη μελέτη των πλημμυρών.

- Η αβεβαιότητα στην οριοθέτηση των κατακλυζόμενων περιοχών αυξάνεται με την αύξηση της αβεβαιότητας στο χρησιμοποιούμενο ΨΜΕ. Η αύξηση αυτή είναι μικρή, της τάξης ολίγων μέτρων, σε λεκάνες ορεινές και ημιορεινές. Αντίθετα, σε λεκάνες με ήπιο ανάγλυφο η αύξηση είναι, όπως ήταν αναμενόμενο, μεγαλύτερη.
- Όπως ήταν αναμενόμενο, το ποσοστιαίο σημείο 90% του εμβαδού της κατακλυζόμενης ζώνης από πλημμύρα βρέθηκε να αυξάνει γραμμικά με τον λογάριθμο της περιόδου επαναφοράς. Το ίδιο παρατηρήθηκε και στη συμπεριφορά της διάμεσης τιμής και του μεγίστου ποσοστιαίου σημείου 90% των πλατών ελεύθερης επιφάνειας νερού. Τα αποτελέσματα αναφέρονται σε σημειακές εκτιμήσεις αυτών των τριών κριτήριων πλημμύρας.
- Ως προς το DSM από δεδομένα SRTM, αυτό αποδείχθηκε ακατάλληλο για τη μονοδιάστατη υδραυλική μοντελοποίηση του πλημμυρικού πεδίου σε κοιλάδες ποταμών με μικρές μέσες εγκάρσιες κλίσεις εδάφους, δηλαδή, από 1,6% έως 3,9%. Αυτό, οφείλεται στην υψηλή αβεβαιότητα στις τιμές του υψομέτρου και στη χαμηλή χωρική ανάλυση του DSM. Πιο συγκεκριμένα, στις δοκιμές, η τυπική απόκλιση των πρόσθετων σφαλμάτων του υψομέτρου (σε σχέση με το DSM αναφοράς) ήταν 3 έως 20 φορές μεγαλύτερη από αυτή στο DSM από άλλες πηγές, όπως από συμβατικούς τοπογραφικούς χάρτες και αεροφωτογραφίες. Η χωρική ανάλυση αυτού (περίπου 30 m) ήταν σαφώς πιο αδρομερής από αυτήν των DSM από άλλες πηγές (5 έως 10 m) και σαφώς χαμηλότερη από εκείνη που χρησιμοποιείται στις διατομές (επιλέχθηκαν τα 20 m).
- Όσον αφορά το μεθοδολογικό πλαίσιο για τη χαρτογράφηση και τον εντοπισμό των πλημμυρικών κινδύνων, έχει αποδειχθεί ότι για την εκτίμηση μιας εξαιρετικά ακριβούς εκτίμησης του ορίου της κατακλυζόμενης ζώνης βάσει ψηφιακού μοντέλου εδάφους απαιτείται ψηφιακή πληροφορία υψηλής ποιότητας ως προς την τοπογραφία του εδάφους, έχοντας τυπική απόκλιση σφαλμάτων, περίπου κάτω από 0.50 m. Αυτό φυσικά οδηγεί στην επιλογή προϊόντων από νεότερες τεχνολογίες όπως το LiDAR ή σε υψηλής ανάλυσης αεροφωτογραφίες ή δορυφορικές εικόνες.

Σε ό,τι αφορά στο τέταρτο ερευνητικό ερώτημα, εξετάστηκε η ημικαταναεμημένη προσέγγιση μοντελοποίησης της σχέσης βροχόπτωσης απορροής μιας λεκάνης απορροής, μέσω της ταξινόμησης τοπίου (landscape classification). Η ταξινόμηση τοπίου σε υδρολογικές κλάσεις τοπίου θεωρήθηκε ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο για την ημικαταναεμημένη υδρολογική προσομοίωση μέσω μοντέλων βροχόπτωσης – απορροής. Η προσομοίωση μέσω της ταξινόμησης τοπίου επιτρέπει την πρόβλεψη της απορροής σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής.

Μέσω της ταξινόμησης τοπίου και της εφαρμογής του μεθοδολογικού πλαισίου το οποίο προτάθηκε, εντοπίζονται υδρολογικά ομογενείς χωρικές ενότητες εντός μιας λεκάνης απορροής οι οποίες, στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται εντός του επιλεγόμενου κάθε φορά μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής. Υιοθετήθηκε μια τροποποιημένη εκδοχή του υδρολογικού μοντέλου FLEX-Topo του Savenije (2010) για την πρόβλεψη της απορροής μη μετρούμενης λεκάνης, ενώ προηγήθηκε βαθμονόμηση του μοντέλου σε μετρούμενη λεκάνη. Η αξιοποίηση της ταξινόμησης τοπίου έγινε με μεταφορά των παραμέτρων του μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής στην μη μετρούμενη λεκάνη, που εξετάζεται κάθε φορά.

Στόχος της προσέγγισης της μοντελοποίησης της συμπεριφοράς των κατηγοριών τοπίου είναι η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας για πρόβλεψη της υδρολογικής συμπεριφοράς των λεκανών απορροής υπό συγκεκριμένες συνθήκες, δηλαδή, είτε πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας λεκάνης απορροής στην οποία υπάρχουν μετρήσεις, αλλά εξετάζεται η

περίπτωση αβέβαιων μελλοντικών συνθηκών, είτε πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας μη μετρούμενης λεκάνης απορροής με ένα μη βαθμονομημένο μοντέλο, μέσω απλής μεταφοράς παραμέτρων από όμοιες κατηγορίες τοπίου. Η χρήση ενός ευέλικτου μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής σε υδρολογικές εφαρμογές είναι μεγάλης σημασίας, μιας και η ετερογένεια που καλείται να αντιμετωπίσει ένα μοντέλο είναι μεγάλη και σε διαφορετικά πεδία, όπως, για παράδειγμα, στην τοπογραφία και την επιφάνεια του εδάφους, το τοπίο, τη γεωλογία και τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.

Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο εφαρμόστηκε σε τρεις λεκάνες απορροής του ελληνικού χώρου, με ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Ο έλεγχος τριών και τεσσάρων κατηγοριών τοπίου, σε συνδυασμό με διάφορα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, ανέδειξε ότι είναι απαραίτητη η πληροφορία για τις χρήσεις γης και, συγκεκριμένα, τη βλάστηση, ώστε να γίνει επιτυχής ταξινόμηση περιοχών εσωτερικά της λεκάνης απορροής.

Η ταξινόμηση τοπίου πραγματοποιήθηκε με χρήση ορθοεικόνων και ενός Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου στο οποίο εισάγονται οι τιμές τεσσάρων κριτηρίων, εν προκειμένω, γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών (ο δείκτης HAND, η κλίση του εδάφους, ο προσανατολισμός, η απόσταση κάθε κελιού της λεκάνης από τον πλησιέστερο κλάδο του υδρογραφικού δικτύου) καθώς και πληροφορία για τη φυτοκάλυψη (βλάστηση).

Ως προς τη συγκεκριμένη εφαρμογή, η ταξινόμηση, με χρήση μορφομετρικών χαρακτηριστικών, σε κατηγορίες τοπίου του γήινου αναγλύφου τριών λεκανών απορροής, (του π. Ευήνου, του π. Αγραφιώτη και του π. Κρικελιώτη), επιτρέπει την κατάρτιση μοντέλου βροχόπτωσης απορροής στις εν λόγω λεκάνες απορροής. Επίσης, το ΤΝΔ μελετήθηκε και εφαρμόστηκε στις συγκεκριμένες λεκάνες μέσω της χρήσης τοπικής πληροφορίας σχετικής με το γήινο ανάγλυφο της κάθε λεκάνης απορροής, ελέγχθηκε δειγματοληπτικά και επιβεβαιώθηκε η επιτυχημένη ταξινόμηση των περιοχών της κάθε λεκάνης απορροής στην κατάλληλη κατηγορία τοπίου. Από την εφαρμογή του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου για την ταξινόμηση τοπίου εντός των λεκανών απορροής και την ημικατανεμημένη προσομοίωση των κατηγοριών τοπίου μέσω μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Ως προς την επιλογή του μοντέλου βροχόπτωσης – απορροής για τις ανάγκες της εφαρμογής, επιδίωξη ήταν να χρησιμοποιηθεί ένα απλό, ευέλικτο μοντέλο. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε το μοντέλο βροχόπτωσης – απορροής FLEX-Toro λόγω της σχετικά απλής δομής του. Η χρήση εντός του μοντέλου, μόνον 21 παραμέτρων, επιτρέπει τη μοντελοποίηση των διεργασιών στο περιβάλλον του MatLab.
- Η ακρίβεια πρόβλεψης της απορροής με χρήση του υδρολογικού ημικατανεμημένου μοντέλου FLEX-Toro, αν και χαρακτηρίζεται ως μετρίως καλή, χρειάζεται περαιτέρω βελτίωση, π.χ. μέσω της καλύτερης εξέτασης της χωρικής διακύμανσης των δεδομένων εισόδου. Η δομή του μοντέλου είναι τέτοια ώστε να προσαρμόζεται μεταξύ διαφορετικών κλιμάκων, συνθηκών και περιοχών μελέτης. Να σημειωθεί ότι η τελική μορφή του υδρολογικού μοντέλου, μετά την προσαρμογή του στις συνθήκες της λεκάνης απορροής του π. Ευήνου, αποτελεί μια ελαφρά διαφοροποιημένη προσέγγιση από αυτή του του αρχικού μοντέλου (Savenije, 2010).
- Ως προς τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται ως κριτήρια στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση τοπίου, η κλίση του εδάφους και ο δείκτης HAND θεωρούνται βασικά κριτήρια, ενώ, στη συνέχεια, προστίθενται κριτήρια ώστε να συμβάλουν στη διάκριση μεταξύ των κατηγοριών τοπίου.

- Προτείνεται η εφαρμογή επιβλεπόμενης ταξινόμησης μέσω της χρήσης TND. Ο έλεγχος του TND έγινε με χρήση περίπου 1000 σημείων από κάθε λεκάνη και τα ποσοστά επιτυχούς ταξινόμησης ήταν μεγαλύτερα από 80%.
- Οι διαφορές των τιμών του δείκτη NSE στην περίπτωση κατά την οποία η λεκάνη απορροής βαθμονομείται με βάση τις πραγματικές μετρημένες παροχές στην έξοδό της, σε σύγκριση με την περίπτωση κατά την οποία μεταφέρονται και χρησιμοποιούνται οι παράμετροι του μοντέλου βροχόπτωσης απορροής από άλλη (δότερια) λεκάνη απορροής προέκυψαν μικρές. Να σημειωθεί ότι λόγω της ποιότητας και της ακρίβειας των δεδομένων βροχόπτωσης και απορροής, οι τιμές του δείκτη NSE είναι στην πλειονότητα των περιπτώσεων χαμηλές αλλά αντίστοιχης τάξης μεγέθους και στις δύο περιπτώσεις.
- Σύμφωνα με το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο της υδρολογικής ταξινόμησης, είναι δυνατή η μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας μεταξύ όμοιων υδρολογικά κατηγοριών τοπίου σε άλλες λεκάνες απορροής, καθώς οι τιμές του δείκτη NSE έχουν μικρές αριθμητικές διαφορές στην περίπτωση κατά την οποία μεταφέρονται οι παράμετροι από άλλη λεκάνη, σε σχέση με τη χρήση των παραμέτρων της βαθμονόμησης στην ίδια τη λεκάνη.
- Συμπεραίνεται, επομένως, ότι η μεταφορά υδρολογικής πληροφορίας στο πλαίσιο της ταξινόμησης των λεκανών απορροής σε κατηγορίες τοπίου, χρησιμοποιώντας τοπογραφική πληροφορία του γήινου αναγλύφου και ακολουθώντας όρους υδρολογικής ομοιότητας, οδηγεί σε μικρή απώλεια υδρολογικής πληροφορίας και ασφαλή συμπεράσματα ως προς την υδρολογική συμπεριφορά της εξεταζόμενης, μη μετρούμενης λεκάνης απορροής.

11.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα διατριβή ασχολήθηκε με τη μελέτη και ανάλυση υδρολογικών θεμάτων, τα οποία αξίζει να μελετηθούν περαιτέρω. Τα ερευνητικά ερωτήματα τα οποία τέθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής συνδέονται με κρίσιμα προβλήματα της Τεχνικής Υδρολογίας και της Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, καθόσον αφορούν τις περίπλοκες φυσικές διεργασίες σε λεκάνες απορροής, διεργασίες με μεγάλη χωρική και χρονική διακύμανση. Επιπλέον, τα ερευνητικά αυτά ερωτήματα που τέθηκαν σχετίζονται άμεσα με το ευρύτερο πρόβλημα της έλλειψης μετρήσεων απορροής παγκοσμίως, το οποίο παραμένει, παρά την ανάπτυξη και εφαρμογή νέων τεχνολογιών.

Οι περιορισμοί εμφανίζονται κατά τη μελέτη των λεκανών απορροής και, κυρίως, σχετίζονται με τη μικρή διαθεσιμότητα δεδομένων, αλλά και με τη χαμηλή ακρίβεια αυτών. Το γεγονός αυτό απασχόλησε στη διατριβή, καθόσον απαίτησε επιπλέον προσπάθεια, είτε ως προς τη συμπλήρωση των κενών τα οποία εμφανίζονται, είτε ως προς την υποκατάσταση των απαραίτητων κάθε φορά μεγεθών.

Η μεθοδολογία, η οποία προτείνεται για την εφαρμογή αδιαμέριστης ταξινόμησης προσπαθεί να καλύψει το κενό των μετρημένων υδρολογικών μεταβλητών, υποκαθιστώντας αυτές με διαθέσιμες τοπογραφικές μεταβλητές. Να σημειωθεί ότι στο πλαίσιο της διατριβής, έχουν εντοπιστεί ελλείψεις σε ορισμένα χωρικά τοπογραφικά δεδομένα.

Προτείνεται έρευνα της ομοιότητας ενός μεγάλου πλήθους λεκανών απορροής, ώστε να καταρτιστεί ένα κοινά αποδεκτό σύστημα ταξινόμησης ώστε, στη συνέχεια, οι όμοιες λεκάνες

να δοκιμαστούν σε συνθήκες προσομοίωσης μέσω υδρολογικών μοντέλων. Ο καθορισμός ενός συστήματος ομοιότητας των λεκανών απορροής του ελληνικού χώρου θα αποτελούσε ένα ιδιαίτερης χρησιμότητας εργαλείο, καθόσον θα παρείχε μια εκ των προτέρων εκτίμηση της υδρολογικής συμπεριφοράς κάθε λεκάνης, στοιχείο που θα ήταν σημαντικότερο κατά τον σχεδιασμό έργων διαχείρισης υδατικών πόρων.

Στο πλαίσιο της μεθοδολογίας εκτίμησης της ΑΣΕ, αποδείχθηκε ότι η συνδυασμένη χρήση, για υδρολογικούς υπολογισμούς, πληροφορίας η οποία προέρχεται από ΨΜΕ και από τοπογραφικούς χάρτες απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση σε πολλές λεκάνες απορροής και πολλές χωρικές κλίμακες. Σφάλματα στη γεωαναφορά, στους αλγορίθμους υπολογισμού της ανάντη έκτασης και της κλίσης του εδάφους αλλά και στα υψόμετρα, όπως αυτά αποδίδονται μέσω των ΨΜΕ, απαιτούν περαιτέρω έρευνα.

Ως προς την εφαρμογή της Ανηγμένης Συνάρτησης Πλάτους, υπάρχει ανάγκη περαιτέρω έρευνας επί της μεθόδου ddRWF, προτού αυτή προταθεί για ασφαλή κατάρτιση πλημμυρογραφημάτων σχεδιασμού υδραυλικών έργων σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής. Είναι απαραίτητη η σύγκριση των αποτελεσμάτων εφαρμογής της μεθόδου ddRWF, με μοναδιαία υδρογραφήματα από ιστορικά δεδομένα βροχόπτωσης – απορροής από πολλές λεκάνες απορροής παγκοσμίως.

Το θέμα της εκτίμησης των κινηματικών παραμέτρων της μεθόδου ddRWF για την κατάρτιση Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος σε λεκάνες απορροής σε ποικιλία κλιματικών συνθηκών παραμένει γενικά ανοικτό και ιδιαίτερα κρίσιμο για τον σχεδιασμό έργων σε μη μετρούμενες λεκάνες απορροής.

Επίσης, προκειμένου να οροθετηθεί η κατακλυζόμενη περιοχή για πλημμυρικά φαινόμενα υψηλής, μέσης και χαμηλής πιθανότητας, η χωρική πληροφορία με τη μορφή ΨΜΕ αποτελεί πολύτιμη πληροφορία που είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί από σύγχρονα υδρολογικά και υδραυλικά μοντέλα. Η παραπάνω διαπίστωση επιτρέπει την ανάδειξη των ΨΜΕ σε σημαντικά εργαλεία για την εφαρμογή της Οδηγίας για τις πλημμύρες και επομένως υ πρέπει να ελεγχθεί ψηλότερης ανάλυσης τοπογραφική πληροφορία.

Όσον αφορά το μεθοδολογικό πλαίσιο για τη χαρτογράφηση και τον εντοπισμό των πλημμυρικών κινδύνων, έχει αποδειχθεί ότι για την ακριβή εκτίμηση, βάσει ΨΜΕ, του ορίου της κατακλυζόμενης ζώνης απαιτείται ψηφιακή πληροφορία υψηλής ποιότητας ως προς την τοπογραφία του εδάφους, έχοντας τυπική απόκλιση σφαλμάτων, περίπου κάτω από 0.50 m. Επομένως, κάτι τέτοιο, οδηγεί σε περαιτέρω έλεγχο προϊόντων από νεότερες τεχνολογίες όπως το LiDAR ή υψηλής ανάλυσης αεροφωτογραφίες ή δορυφορικές εικόνες.

Απαιτείται έρευνα και ως προς την ημικαταμεμημένη ταξινόμηση τοπίου και την υιοθέτηση διαφόρων κατηγοριών τοπίου εντός των μοντέλων βροχόπτωσης απορροής με εφαρμογή σε πολλές λεκάνες απορροής με σημαντικές διαφορές στο ανάγλυφο αυτών, τη βλάστηση, και τις κατηγορίες εδάφους και γεωλογικού υποβάθρου. Υπάρχει το ζήτημα της αμφίδρομης μεταφοράς παραμέτρων μεταξύ όμοιων κατηγοριών τοπίου των εξεταζόμενων λεκανών απορροής ή, ακόμη, και την συμπλήρωση συνόλου παραμέτρων από περισσότερες από μια λεκάνες απορροής.

Η ταξινόμηση λεκανών απορροής σε κατηγορίες τοπίου θεωρείται ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο, το οποίο θα συμβάλει στην αποτελεσματικότερη βαθμονόμηση των μοντέλων βροχόπτωσης απορροής για την εκτίμηση και πρόβλεψη της υδρολογικής συμπεριφοράς των μη μετρούμενων λεκανών. Αυτό αποδείχθηκε ότι συμβαίνει με τις δοκιμαστικές λεκάνες απορροής που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την διατριβή, αλλά κρίνεται απαραίτητο να

πραγματοποιηθεί περαιτέρω έρευνα σε λεκάνες απορροής με καταγεγραμμένες μετρήσεις βροχόπτωσης και απορροής υψηλής ποιότητας.

Αναφορές

Ελληνικές

- Κουτσογιάννης, Δ. και Ξανθόπουλος, Θ., 1999. Τεχνική Υδρολογία. Έκδοση 3, 418 pages, doi:10.13140/RG.2.1.4856.0888, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κουτσογιάννης, Δ., 2004. Το πρόβλημα της βαθμονόμησης υδρολογικών μοντέλων. Τεχνική Έκθεση του έργου «Εκσυγχρονισμός της Εποπτείας και Διαχείρισης του συστήματος των Υδατικών Πόρων Ύδρευσης της Αθήνας» Τεύχος 21: Μοντέλο προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού – Υλίκης.
- Μαμάσης, Ν., 2012. Σημειώσεις Τεχνικής Υδρολογίας. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μιμίκου, Μ., Μπαλτάς, Ε., 2018. Τεχνική Υδρολογία. ISBN 9789604911257, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- Ναλμπάντης, Ι., 2007. Προστασία και Διαχείριση Υδατικών Πόρων. Εκπαιδευτικές σημειώσεις, Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Ναλμπάντης, Ι. και Παπαγεωργάκη, Ι., 2015. Υδρολογική προσομοίωση με θεώρηση της ετερογένειας της πυκνότητας του υδρογραφικού δικτύου: Επιπτώσεις στο σχεδιασμό υδραυλικών έργων. Πρακτικά, 3ο Κοινό Συνέδριο ΕΥΕ – ΕΕΔΥΠ – ΕΥΣ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 10-12 Δεκεμβρίου 2015, 49-56.
- Ναλμπάντης, Ι. και Παπαγεωργάκη, Ι., 2022. Το Γεωμορφολογικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα στον σχεδιασμό υδραυλικών έργων: Εφαρμογή σε λεκάνες απορροής στην Ελλάδα. Στο: Δ. Καρπούζος, Κ. Κατσαφαράκης και Π. Γεωργίου, επιμ. Πρακτικά 15ου Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (Ε.Υ.Ε.), Θεσσαλονίκη 2-3/6/2022, 101-107.
- Παπαγεωργάκη, Ι., 2012. Ταξινόμηση Αναγλύφου με Υδρολογικά Κριτήρια: Εφαρμογή σε Λεκάνες Απορροής της Αττικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Τσακίρης, Γ., 1995. Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- Τσούλος, Λ., Σκοπελίτη, Α., και Στάμου, Λ., 2016α. Χαρτογραφική σύνθεση και απόδοση σε ψηφιακό περιβάλλον. Σημειώσεις, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Τσούλος, Λ., Σκοπελίτη, Α., και Στάμου, Λ., 2016β. Υδρολογική ανάλυση με βάση το ΨΜΕ. Σημειώσεις, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Τσούλος, Λ., 2004. Ψηφιακή Χαρτογραφία. Έκδοση 2η, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Ξενόγλωσσες

- Abida, H., Ellouze, M., 2006. Hydrological delineation of homogeneous regions in Tunisia. Water Resour Manage 20(6): 961-977.

- Abimbola, O. P., Wenninger, J., Venneker, R., and Mittelstet, A. R., 2017. The assessment of water resources in ungauged catchments in Rwanda. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13, 274–289, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.09.001>.
- Adamowski, J., 2008a. Development of a short-term river flood forecasting method for snowmelt driven floods based on wavelet and cross-wavelet analysis. *Journal of Hydrology* 353, 247–266.
- Adamowski, J., 2008b. River flow forecasting using wavelet and cross-wavelet transform models. *Journal of Hydrological Processes* 22, 4877–4891.
- Adamowski, J., Chan, H. F., Prasher, S. O., and Sharda, V. N., 2012. Comparison of multivariate adaptive regression splines with coupled wavelet transform artificial neural networks for runoff forecasting in Himalayan micro-watersheds with limited data. *Journal of Hydroinformatics*, 14(3), 731-744.
- Ågren, A., Buffam, I., Jansson, M., and Laudon, H., 2007. Importance of seasonality and small streams for the landscape regulation of dissolved organic carbon export. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112(G3).
- Ali, G., Oswald, C. J., Spence, C., Cammeraat, E. L., McGuire, K. J., Meixner, T., and Reaney, S. M., 2013. Towards a unified threshold-based hydrological theory: Necessary components and recurring challenges. *Hydrological Processes*, 27(2), 313-318.
- Altman, N. S., 1992. An introduction to kernel and nearest-neighbour nonparametric regression. *The American Statistician*, 46(3), 175-185.
- Ambrose, B., Beven, K., and Freer, J., 1996. Toward a generalization of the TOPMODEL concepts: Topographic indices of hydrological similarity. *Water Resources Research*, 32(7), 2135-2145.
- Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., Usart-Sanchez, I., and Lavabre, J., 2001. Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. *Journal of hydrology*, 250(1-4), 206-223.
- Anderson, A. E., Weiler, M., Alila, Y., and Hudson, R. O., 2009. Subsurface flow velocities in a hillslope with lateral preferential flow. *Water Resources Research*, 45(11).
- Andreadis, K. M., Schumann, G. J. P., and Pavelsky, T., 2013. A simple global river bankfull width and depth database. *Water Resources Research*, 49, 7164–7168. doi:10.1002/wrcr.20440.
- Archfield, S. A., M. Clark, B. Arheimer, L.E. Hay, W.H. Farmer, H. McMillan, J. Seibert, J.E. Kiang, T. Wagener, A. Bock, K. Hakala, V. Andréassian, S. Attinger, A. Viglione, R.R. Knight and T.M. Over., 2015. Accelerating advances in continental domain hydrologic modeling. *Water Resources Research*, 51(12), 10078-10091.
- Arheimer, B., Andersson, L., and Lepistö, A., 1996. Variation of nitrogen concentration in forest streams—influences of flow, seasonality and catchment characteristics. *Journal of Hydrology*, 179(1-4), 281-304.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., Muttiah R, and Bernhardt, G., 1995. Automated base flow separation and recession analysis techniques. *Ground Water* 33:1010–1018.
- ASTER GDEM Validation Team, 2009. ASTER Global DEM.
- Atkinson, P., Jiskoot, H., Massari, R., and Murray, T., 1998. Generalized linear modelling in geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group* 23(13):1185-1195.

- Baço, F., Lobo, V., Painho, M., 2005. Self-organizing maps as substitutes for k-means clustering. In *Computational Science–ICCS 2005: 5th International Conference, Atlanta, GA, USA, May 22–25, 2005, Proceedings, Part III 5* (pp. 476–483). Springer Berlin Heidelberg.
- Bai, R., Li, T., Huang, Y., Li, J., and Wang, G., 2015. An efficient and comprehensive method for drainage network extraction from DEM with billions of pixels using a size-balanced binary search tree. *Geomorphology* 238, 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.028>.
- Bai, Y., Wagener, T., Reed, P., 2009. A top-down framework for watershed model evaluation and selection under uncertainty. *Environmental Modelling and Software* 24: 901–916.
- Bailey, R.G., 2004. Identifying ecoregion boundaries. *Environmental Management*, 34 (Suppl 1): S14–S26.
- Bales, J. D., Wagner, C. R., 2009. Sources of uncertainty in flood inundation maps. *Journal of Flood Risk Management*, 2(2), 139–147.
- Band, L.E., 1986. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. *Water Resources Research* 22(1):15–24.
- Band, L. E., Moore, I. D., 1995. Scale: landscape attributes and geographical information systems. *Hydrological processes*, 9(3-4), 401–422.
- Bandalos, D.L., Boehm-Kaufman, M.R., 2009. Four Common Misconceptions in Exploratory Factor Analysis In: Lance CE Vandenberg RJ (eds) *Statistical and Methodological Myths and Urban Legends*. Routledge, New York pp61–87.
- Bangash, R. F., Passuello, A., Hammond, M., and Schuhmacher, M., 2012. Water allocation assessment in low flow river under data scarce conditions: A study of hydrological simulation in Mediterranean basin. *Science of the Total Environment*, 440, 60–71.
- Bates, P. D., Marks, K. J., and Horritt, M. S., 2003. Optimal use of high-resolution topographic data in flood inundation models. *Hydrological Processes*, 17(3), 537–557.
- Berry, P. A. M., Garlick, J. D., and Smith, R. G., 2007. Near-global validation of the SRTM DEM using satellite radar altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 106(1), 17–27.
- Betson, R. P., 1964. What is watershed runoff ?. *Journal of Geophysical research*, 69(8), 1541–1552.
- Beven, K.J., Kirkby, M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrologic Science Bulletin* 24:43–69.
- Beven, K., 1989. Changing ideas in hydrology—the case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105, 157–172.
- Beven, K. J., 1997. *Distributed Modelling in Hydrology: Applications of TOPMODEL*, Wiley, Chichester.
- Beven, K. J., 2000. Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling. *Hydrology and earth system sciences*, 4(2), 203–213.
- Beven, K., 2001a. How far can we go in distributed hydrological modelling? *Hydrology and Earth System Sciences*, 5 (1), 1–12.
- Beven, K.J., 2001b. Calibration, validation and equifinality in hydrological modelling. In Anderson, M.G. & Bates, P.D. (eds), *Model Validation: Perspectives in Hydrological Science*. John Wiley & Sons, Chichester: 43–55.

- Beven, K.J., 2006. Searching for the Holy Grail of scientific hydrology: $Q_t = (S, R, \Delta t)A$ as closure. *Hydrology and Earth System Sciences* 10, pp. 609–618.
- Beven, K.J., Cloke, H.L., 2012. Comment on “Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth’s terrestrial water” by Eric F. Wood et al. *Water Resour. Res.* 48 (1).
- Beven, J. K., 2012. *Rainfall–Runoff Modelling*, Wiley - Blackwell. doi: 10.1002/ldr.630.
- Beven, K. J., Binley, A. M., 1992. The future of distributed models: Model calibration and predictive uncertainty, *Hydrol. Process.*, 6, 279– 298, 1992.
- Beven, K., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R., and Freer, J., 1995. Topmodel. *Computer models of watershed hydrology.*, 627-668.
- Beven, K. J., Germann, P., 2013. Macropores and water flow in soils revisited. *Water Resour. Res.*, 49, 3071–3092, doi:10.1002/wrcr.20156.
- Beven, K. J., Kirkby, M. J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological sciences journal*, 24(1), 43-69.
- Bezdek, J.C., Ehrlich, R., Full, W., 1984. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm. *Computers and Geosciences* 10(2-3): 191-203.
- Bezdek, J.C., 1998. Pattern analysis. In: Ruspini EH, Bonissone PP, Pedrycz W (eds) *Handbook of Fuzzy Computation*, Institute of Physics Pub. 6.
- Bhaskar, N. R., Parida, B. P., Nayak, A. K., 1997. Flood estimation for ungauged catchments using the GIUH. *Journal of water resources planning and management*, 123(4), 228-238.
- Bierkens, M.F., Bell, V.A., Burek, P., Chaney, N., Condon, L.E., David, C.H., de Roo, A., Döll, P., Drost, N., Famiglietti, J.S., and Flörke, M., 2015. Hyper-resolution global hydrological modelling: what is next? “Everywhere and locally relevant”. *Hydrol. Process.* 29 (2), 310–320.
- Björkvald, L., Buffam, I., Laudon, H., and Mörth, C.M., 2008. Hydrogeochemistry of Fe and Mn in small boreal streams: The role of seasonality, landscape type and scale. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(12), 2789-2804.
- Blöschl, G., and Sivapalan, M., 1995. Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrological processes*, 9(3-4), 251-290.
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., and Savenije, H., and Viglione, A., 2013. *Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales*. Cambridge University Press.
- Blyth, K., Rodda, J.C., 1973. A stream length study. *Water Resources Research* 9:1454–1461.
- Bolliger, J., 2005. Simulating complex landscapes with a generic model: Sensitivity to qualitative and quantitative classifications. *Ecological Complexity*, 2(2), 131-149.
- Bolliger, J., Mladenoff, D. J., 2005. Quantifying spatial classification uncertainties of the historical Wisconsin landscape (USA). *Ecography*, 28(2), 141-156.
- Booker, D. J., Woods, R. A., 2014. Comparing and combining physically-based and empirically-based approaches for estimating the hydrology of ungauged catchments. *Journal of Hydrology*, 508, 227-239.

- Boyle, D. P., Gupta, H. V., and Sorooshian, S., 2000. Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, 36(12), 3663-3674.
- Brasington, J., Richards, K., 1998. Interactions between model predictions, parameters and DTM scales for top model. *Computers and Geosciences*, 24(4), 299–314.
- Brody, S. D., Zahran, S., Maghelal, P., Grover, H., and Highfield, W. E., 2007. The rising costs of floods: Examining the impact of planning and development decisions on property damage in Florida. *Journal of the American Planning Association*, 73(3), 330-345.
- Burn, D. H., Boorman, D. B., 1993. Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments. *Journal of Hydrology*, 143(3-4), 429-454.
- Burnash R.J.C., 1995. The NWS river forecast system: catchment modelling. In: Singh VP (ed) *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources, Littleton, CO, pp 311–366
- Burrough, P.A., McDonell, R.A., 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, New York, pp. 190.
- Candela, A., Aronica, G., and Santoro, M., 2005. Effects of forest fires on flood frequency curves in a Mediterranean catchment. *Hydrological Sciences Journal*, 50(2), 193–206.
- Carabajal, C.C., Harding, D.J., 2006. SRTM C-Band and ICESat laser altimetry elevation comparisons as a function of tree cover and relief. *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, 72: 287–298.
- Carlston, C.W., 1963. *Drainage Density and Stream Flow*: U.S.G.S. Professional Paper No. 422-C, pp. 1–8.
- Carpenter, T. M., Georgakakos, K. P., 2004. Impacts of parametric and radar rainfall uncertainty on the ensemble streamflow simulations of a distributed hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 298(1–4), 202–221.
- Casagli, N., Catani, F., 1998. Fractal dimension and mechanical properties of melanges in the Northern Apennine. In: De Frede(Ed.), *Proc. 4th Cong. of the Int. Assoc. Math. Geol. Naples*, vol. 2, pp. 561–571.
- Castiglioni, S., Castellarin, A., and Montanari, A., 2009. Prediction of low-flow indices in ungauged basins through physiographical space-based interpolation. *J Hydrol* 378:272-280.
- Chatterjee, S., and Hadi, A.S., 1986. Influential observations, high leverage points, and outliers in linear regression. *Statistical Science* 379-393.
- Chaubey, I., Cotter, A. S., Costello, T. A., and Soerens, T. S., 2005. Effect of DEM data resolution on SWAT output uncertainty. *Hydrological Processes*, 19(3), 621–628.
- Chorley, R.J., 1957. Climate and morphometry. *J. Geol.* 65, 628–638.
- Chorley, R.J., Morgan, M.A., 1962. Comparison of morphometric features, Unaka Mountains, Tennessee and North Carolina, Dartmoor, England. *Geol. Soc. Am. Bull.* 73, 17–34.
- Chorowicz, J., Ichoku, C., Riazanoff, S., Kim, Y. J., and Cervelle, B., 1992. A combined algorithm for automated drainage network extraction. *Water Resources Research*, 28(5), 1293-1302.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- Cohon, J. L., 1978. *Multiobjective Programming and Planning*, Academic, New York.

- Colby, J. D., Mulcahy, K. A., Wang, Y., 2000. Modeling flooding extent from hurricane Floyd in the coastal plains of North Carolina. *Environmental Hazards*, 2(4), 157–168.
- Colombo, R., Vogt, J. V., Soille, P., Paracchini, M. L., and de Jager, A. L., 2003. On the derivation of pan-European river networks and catchment boundaries from a 250m DEM. In EGS-AGU-EUG Joint Assembly (p. 6474).
- Costa, M.H. and Foley, J.A., 1999. Trends in the hydrologic cycle of the Amazon basin. *Journal of Geophysical Research*, 104, D12, 14189–14198.
- Cotton, C.A., 1964. The control of drainage density. *N. Z. J. Geol. Geophys.* 7, 348–352.
- Cox, E. P., 1927. A method of assigning numerical and percentage values to the degree of roundness of sand grains. *Journal of Paleontology*, 1(3), 179-183.
- Coxon, G., Freer, J., Wagener, T., Odoni, N. A., and Clark, M., 2014. Diagnostic evaluation of multiple hypotheses of hydrological behaviour in a limits-of-acceptability framework for 24 UK catchments. *Hydrological Processes*, 28(25), 6135-6150.
- Groisman, P. Y., Knight, R. W., Karl, T. R., Easterling, D. R., Sun, B., and Lawrimore, J. H., 2004. Contemporary changes of the hydrological cycle over the contiguous United States: Trends derived from in situ observations. *Journal of hydrometeorology*, 5(1), 64-85.
- Crosetto, M., Tarantola, S., and Saltelli, A., 2000. Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modelling based on GIS. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 81(1), 71–79.
- Crossman, N. D., Bryan, B. A., 2006. Systematic landscape restoration using integer programming. *Biological Conservation*, 128(3), 369-383.
- Dabney, S.M., Yoder, D.C., Vieira, DAN, Bingner, R.L., 2011. Enhancing RUSLE to include runoff-driven phenomena. *Hydrological Processes*25(9): 1373–1390. <https://doi.org/10.1002/hyp.7897>.
- Datry, T., Larned, S.T., Tockner, K., 2014. Intermittent rivers: a challenge for freshwater ecology. *Bioscience* 64:229–235.
- Davies, L., Gather, U., 1993. The identification of multiple outliers. *Journal of the American Statistical Association* 88.423: 782-792.
- Daya Sagar, B.S., Venu, M., Srinivas, D., 2000. Morphological operators to extract channel networks from digital elevation models. *International Journal of Remote Sensing*, 21:1, 21-29, DOI: 10.1080/014311600210966.
- De Groen, M. M., Savenije, H. H., 2006. A monthly interception equation based on the statistical characteristics of daily rainfall. *Water Resources Research*, 42(12).
- De Roo, APJ., 1998. Modelling runoff and sediment transport in catchments using GIS. *Hydrological processes*, 12(6), 905-922.
- De Vos, N. J., van der Veer, P., Rientjes, T. H. M., and Cser, J., 2003. Rainfall-runoff modelling using artificial neural networks (Doctoral dissertation, Master's thesis, Delft University of Technology).
- Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M., and Stahl, D., 2010. *Cluster Analysis*. 5th Edn New Jersey.
- Dietrich, W. D., Ginsberg, M. D., Busto, R., Watson, B. D., 1986. Photochemically induced cortical infarction in the rat. 2. Acute and subacute alterations in local glucose utilization. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 6(2), 195-202.
- Dietrich, W.E., Wilson, C.J., Montgomery, D.R., McKean, J., Bauer, R., 1992. Erosion thresholds and land surface morphology. *Geology* 20, 675–679.

- Dietrich, W.E., Dunne, T., 1993. The channel head. In: Beven, K., Kirkby, M.J. (Eds.), *Channel Network Hydrology*. Wiley, New York, pp. 175–219.
- Dietrich, W. E., Wilson, C. J., Montgomery, D. R., and McKean, J., 1993. Analysis of erosion thresholds, channel networks, and landscape morphology using a digital terrain model. *The Journal of Geology*, 101(2), 259-278.
- Di Lazzaro, M., Zarlenga, A., and Volpi, E., 2015. Hydrological effects of within-catchment heterogeneity of drainage density. *Advances in Water Resources*, 76, 157-167.
- Dingman, S. L., 1994. *Physical hydrology* prentice hall. Inc., New Jersey, 7458.
- Dooge, J. C., 1986. Looking for hydrologic laws. *Water Resources Research*, 22(9S), 46S-58S.
- Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, V., 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water resources research*, 28(4), 1015-1031.
- Dunn, J.C., 1974. Well-separated clusters and optimal fuzzy partitions. *Journal of Cybernetics* 4(1), 95-104.
- Dunne, T., 1980. Formation and controls of channel networks. *Progress Phys. Geogr.* 4, 211–239.
- Dunne, T., Leopold, L. B., 1978. *Water in environmental planning*. Macmillan.
- Eagleson, P. S., Meade, R., March, F., 1966. Computation of optimum realizable unit hydrographs. *Water Resources Research*, 2(4), 755-764.
- Ehsani, A.H., 2007. *Artificial Neural Networks: Application in morphometric and landscape features analysis*, KTH, Royal Institute of Technology, Stockholm, pp. 53.
- Efron, B., 1982. *The jackknife, the bootstrap and other resampling plans*. Philadelphia Pennsylvania: Society for industrial and applied mathematics, Vol 38.
- Efstratiadis, A., Koutsoyiannis, D., Mamassis, N., Dimitriadis, P. and Maheras, A., 2012. Literature review of flood hydrology and related tools, DEUCALION – Assessment of flood flows in Greece under conditions of hydroclimatic variability: Development of physically-established conceptual-probabilistic framework and computational tools. Contractors: ETME: Peppas & Collaborators, Grafeio Mahera, Department of Water Resources and Environmental Engineering, National Technical University of Athens, National Observatory of Athens, 115 pages.
- Efstratiadis, A., Koussis, A. D., Koutsoyiannis, D., and Mamassis, N., 2014. Flood design recipes vs. reality: can predictions for ungauged basins be trusted?. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(6), 1417-1428.
- Ehsani, A.H., 2007. *Artificial Neural Networks: Application in morphometric and landscape features analysis*. KTH, Royal Institute of Technology, Stockholm, pp. 53.
- European Union, Copernicus Land Monitoring Service, 2018. European Environment Agency (EEA).
- Evans, I.S., 1972. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: Chorley, R.J. (Ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology*. Harper & Row, pp. 17– 90.
- Everitt, J. H., Yang, C., Judd, F. W., and Summy, K. R., 2010. Use of archive aerial photography for monitoring black mangrove populations. *Journal of Coastal Research*, 26(4), 649-653.
- Fahrland, E., 2020. Copernicus Digital Elevation Model, Product Handbook. Airbus Defence and Space GmbH, Potsdam, Deutschland, pp. 779.

- Fairfield, J., and Leymarie, P., 1991. Drainage networks from grid digital elevation models, *Water Resour. Res.*, 27(5), 709-717.
- Falah, F., Ghorbani Nejad, S., Rahmati, O., Daneshfar, M., Zeinivand, H., 2017. Applicability of generalized additive model in groundwater potential modelling and comparison its performance by bivariate statistical methods. *Geocarto international*, 32(10), 1069-1089.
- Farebrother, R. W., 2022. Notes on the prehistory of principal components analysis. *Journal of Multivariate Analysis*, 188, 104814.
- Farmer, D., Sivapalan, M., and Jothityangkoon, C., 2003. Climate, soil, and vegetation controls upon the variability of water balance in temperate and semiarid landscapes: downward approach to water balance analysis. *Water Resources Research* 39: 1035. DOI:10.1029/2001WR000328.
- Fekete, B.M., Vorosmarty, C.J., and Grabs, W., 2002. High-resolution fields of global runoff combining observed river discharge and simulated water balances *Global Biogeochem. Cycles* 16 (3).
- Fenicia, F., Savenije, H. H. G., Matgen, P., and Pfister, L., 2008. Understanding catchment behaviour through stepwise model concept improvement, *Water Resour. Res.*, 44, W01402, doi:10.1029/2006wr005563.
- Fenicia, F., Kavetski, D., and Savenije, H. H. G., 2011. Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development, *Water Resour. Res.*, 47, W11510, doi:10.1029/2010wr010174.
- Fernandez, W., Vogel, R. M., Sankarasubramanian, A., 2000. Regional calibration of a watershed model. *Hydrological sciences journal*, 45(5), 689-707.
- Flint, J. J., 1974. Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge. *Water Resources Research*, 10(5), 969-973.
- Fread, D.L., 1977. The Development and Testing of a Dam-Break Flood Forecasting Model. *Proceedings, Dam-Break Flood Modelling Workshop*, U.S. Water Resources Council, Washington D.C., p. 164-197.
- Fread, D.L., 1988. The NWS DAMBRK Model: Theoretical Background/User Documentation. HRL-256, Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, Silver Spring, Maryland, 325 pp.
- Freer, J., McDonnell, J., Beven, K., Burns, D., Hooper, R., Aulenbach, B., Kendall, C., and Peters, N., 2002. Understanding the spatial and temporal dynamic contributions of subsurface storm runoff at the hillslope scale. *Water Resources Research*, 38(12), 5-1-5-16.
- Freeze, R. A., 1974. Streamflow generation. *Reviews of Geophysics*, 12(4), 627-647.
- Freidman, J.H., Bentley, J.L., and Finkel, R.A., 1977. An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time. *ACM Trans Math Softw* 3:209-226.
- Gallant, J. C., Dowling, T. I., 2003. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water resources research*, 39(12).
- Gan, T. Y., Biftu, G. F., 1996. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: Optimization algorithms, catchment conditions, and model structure. *Water resources research*, 32(12), 3513-3524.
- Garbrecht, J., Martz, L. W., 1997. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. *Journal of hydrology*, 193(1-4), 204-213.

- Garbrecht, J., Martz, L.W., 2000. Digital elevation model issues in water resources modeling. *Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems*, pp. 1–28.
- Gharari, S., Hrachowitz, M., Fenicia, F., and Savenije, HHG., 2011. Hydrological landscape classification: investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(11), 3275–3291.
- Giannoni, F., Roth, G., and Rudari, R., 2005. A procedure for drainage network identification from geomorphology and its application to the prediction of the hydrologic response. *Adv. Water Resour.*, 28(6), 567–581.
- Gleick, P. H., 1993. *Water in crisis*. New York: Oxford University Press, vol. 100.
- Godsey, S.E., Kirchner, J.W., 2014. Dynamic, discontinuous stream networks: hydrologically driven variations in active drainage density, flowing channels and stream order. *Hydrological Processes*, 28(23), 5791–5803.
- Gourgoulios, V., Nalbantis, I., 2017. Ungauged drainage basins: Investigation on the basin of Peneios River, Thessaly, Greece. *Eur. Water*, 57, 163–169.
- Grayson, R.B., Moore, I.D., and McMahon, T.A., 1992. Physically based hydrologic modelling: 2. Is the concept realistic? *Water Resources Research*, 28, 2659–2666.
- Greek Land Register SA., 2005. Technical specifications for production of orthophotos of large scale (LSO). Athens (in Greek).
- Gregory, K.J., Gardiner, V., 1975. Drainage density and climate. *Z. Geomorphol. N.F.* 19, 287–298.
- Gregory, K.J., Walling, D.E., 1968. The variation of drainage density within a catchment. *Hydrological Sciences Journal* 13.2: 61–68.
- Godsey, S. E., Kirchner, J. W., 2014. Dynamic, discontinuous stream networks: hydrologically driven variations in active drainage density, flowing channels and stream order. *Hydrological Processes*, 28(23), 5791–5803.
- Guo, Y., Zhang, Y., Zhang, L., and Wang, Z., 2021. Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: A comprehensive review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(1), e1487.
- Güler, C., & Thyne, G. D., 2004. Delineation of hydrochemical facies distribution in a regional groundwater system by means of fuzzy c-means clustering. *Water Resources Research*, 40(12).
- Güler, C., Kurt, M. A., Alpaslan, M., Akbulut, C., 2012. Assessment of the impact of anthropogenic activities on the groundwater hydrology and chemistry in Tarsus coastal plain (Mersin, SE Turkey) using fuzzy clustering, multivariate statistics and GIS techniques. *Journal of Hydrology*, 414, 435–451.
- Guillot, P., and Duband, D., 1980. Une méthode de transfert pluie-débit par régression multiple. *Hydrological Forecasting*, 177–186.
- Gupta, V.K., Waymire, E., and Wang, C.T., 1980. A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water resources research*, 16(5), 855–862.
- Gupta, V. K., Waymire, E. D., and Rodríguez-Iturbe, I., 1986. On scales, gravity and network structure in basin runoff. In *Scale problems in hydrology* (pp. 159–184). Springer, Dordrecht.

- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O., 1998. Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resources Research*, 34(4), 751-763.
- Gupta, H.V., Wagener, T. and Liu, Y., 2008. Reconciling theory with observations: elements of a diagnostic approach to model evaluation. *Hydrological Processes*, 22(18), pp.3802-3813.
- Gupta, V. K., Rodríguez-Iturbe, I., Wood, E. F. (Eds.), 2012. Scale problems in hydrology: runoff generation and basin response (Vol. 6). Springer Science & Business Media.
- Gupta, H.V., Perrin, C., Blöschl, G., Montanari, A., Kumar, R., Clark, M., and Andréassian, V., 2014. Large-sample hydrology: a need to balance depth with breadth. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 463–477.
- Haan, C. T., Barfield, B. J., and Hayes, J. C., 1994. Design hydrology and sedimentology for small catchments. Elsevier.
- Hadley, R.F., Schumm, S.A., 1961. Sediment Sources and Drainage Basin Characteristics in Upper Cheyenne River Basin United States, Geological Survey, Water-Supply Paper 1531-B.
- Hald, A., 1998. A History of Mathematical Statistics from 1750 to 1930 (Vol. 314). Wiley-Interscience.
- Hancock, G. R., 2005. The use of digital elevation models in the identification and characterization of catchments over different grid scales. *Hydrological Processes*, 19(9), 1727–1749.
- Hancock, G. R., Evans, K. G., 2006. Channel head location and characteristics using digital elevation models. *Earth Surf. Processes Landforms*, 31(7), 809–824.
- Haralick, R. M., 1983. Ridges and valleys on digital images. *Computer vision, graphics, and image processing*, 22(1), 28-38.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. H., and Friedman, J. H., 2009. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction (Vol. 2, pp. 1-758). New York: Springer.
- Heine, R. A., C. L. Lant, and Sengupta., R. R., 2004. Development and comparison of approaches for automated mapping of stream channel networks. *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, 94(3), 477–490.
- Hewlett, J. D., 1961. Watershed management, some ideas about storm runoff and baseflow. USDA Forest Service, Asheville, Carolina.
- Hewlett, J. D., and Hibbert, A. R., 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. *Forest hydrology*, 1, 275-290.
- Hilbert, D. W., Ostendorf, B., Hopkins, M. S., 2001. Sensitivity of tropical forests to climate change in the humid tropics of north Queensland. *Austral Ecology*, 26(6), 590-603.
- Hippert, H. S., Pedreira, C. E., and Souza, R. C., 2001. Neural networks for short-term load forecasting: A review and evaluation. *IEEE Transactions on power systems*, 16(1), 44-55.
- Hirsch, R. M. and Costa, J. E., 2004. U.S. stream flow measurement and data dissemination improve. *Eos Trans. AGU*, 85, <https://doi.org/10.1029/2004eo200002>.
- Hopp, L., McDonnell, J. J., 2009. Connectivity at the hillslope scale: Identifying interactions between storm size, bedrock permeability, slope angle and soil depth. *Journal of hydrology*, 376(3-4), 378-391.
- Höppner, F., 2002. Speeding up fuzzy c-means: Using a hierarchical data organisation to control the precision of membership calculation. *Fuzzy Sets and Systems*, 128(3), 365-376.

- Horton, R. E., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 14(1), 446-460.
- Horton R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 56, 275–370.
- Hosseinzadeh, S.R., 2011. Drainage network analysis, comparison of digital elevation model (DEM) from ASTER with high resolution satellite image and aerial photographs. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2.
- Hotelling, H., 1933. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of educational psychology*, 24(6), 417.
- Howard, A.D., 1994. A detachment-limited model of drainage basin evolution. *Water Resour. Res.* 30, 2261–2285.
- Hrachowitz, M., Savenije, H.H.G., Blöschl, G., McDonnell, J.J., Sivapalan, M., Pomeroy, J.W., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M.P., Ehret, U., Fenicia, F., J.E. Freer, A. Gelfan, H.V. Gupta, D.A. Hughes, R.W. Hut, A. Montanari, S. Pande, D. Tetzlaff, P.A. Troch, S. Uhlenbrook, T. Wagener, H.C. Winsemius, R.A. Woods, E. Zehe and C. Cudennec, 2013. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) - a review. *Hydrological sciences journal*, 58(6), pp.1198-1255.
- Hsieh, B. B., Jourdan, M. R., 2006. Watershed Similarity Analysis for Military Applications Using Supervised-Unsupervised Artificial Neural Networks. ENGINEER RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER VICKSBURG MS.
- Huang, M., Liang, X., 2005. On the assessment of the impact of reducing parameters and identification of parameter uncertainties for a hydrologic model with applications to ungauged basins. *Journal of Hydrology*, 320(1–2), 37–61.
- Ijjász-Vásquez, E. J., Bras, R. L., and Moglen, G. E., 1992. Sensitivity of a basin evolution model to the nature of runoff production and to initial conditions. *Water Resources Research*, 28(10), 2733-2741.
- Ioannidis, C., Xinogalas, E., and Soile, S., 2014. Assessment of the global digital elevation models ASTER and SRTM in Greece. *Survey Review*, 46(338), 342-354.
- Isikdogan, F., Bovik, A.C., Passalacqua, P., 2015. Automatic Channel Network Extraction From Remotely Sensed Images by Singularity Analysis. *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.*, 12(11), 2218-2221.
- Jain, A. K., Mao, J., and Mohiuddin, K. M., 1996. Artificial neural networks: A tutorial. *Computer*. 29(3), 31-44.
- Jakeman, A. J., Hornberger, G. M., 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model ?. *Water Resour. Res.*, 29(8), 2637- 2649.
- Jencso, K. G., McGlynn, B. L., Gooseff, M. N., Wondzell, S. M., Bencala, K. E., and Marshall, L. A., 2009. Hydrologic connectivity between landscapes and streams: Transferring reach-and plot-scale understanding to the catchment scale. *Water Resources Research*, 45(4).
- Jencso, K. G., McGlynn, B. L., 2011. Hierarchical controls on runoff generation: Topographically driven hydrologic connectivity, geology, and vegetation. *Water Resources Research*, 47(11).
- Jensen, C.K., McGuire, K.J., and Prince, P.S., 2017. Headwater stream length dynamics across four physiographic provinces of the Appalachian Highlands. *Hydrological Processes* 31:3350–3363.

- Jenson, S.K., Domingue, J.O., 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54(11):1593-1600.
- Johnson, R. A., and Wichern, D. W., 1992. *Applied multivariate statistical analysis*. New Jersey, 405.
- Johnston, P. R., and Pilgrim, D. H., 1976. Parameter optimization for watershed models. *Water Resources Research*, 12(3), 477-486.
- Johnston, E. G., Rosenfeld, A., 1975. Digital detection of pits, peaks, ridges, and ravines. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, (4), 472-480.
- Julien, P. Y., Saghaian, B., and Ogden, F. L., 1995. Raster-based hydrologic modeling of spatially-varied surface runoff 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 31(3), 523-536.
- Kelson, K.I., and Wells, S.G., 1989. Geologic influences on fluvial hydrology and bedload transport in small mountainous watersheds, northern New Mexico, USA. *Earth Surf. Processes Landforms* 14, 671-690.
- Kirkby, M. J., Chorley, R. J., 1967. Throughflow, overland flow and erosion. *Hydrological Sciences Journal*, 12(3), 5-21.
- Kirkby, M. J., 1971. Hillslope process-response models based on the continuity equation. *Inst. Br. Geogr. Spec. Publ*, 3(1), 5-30.
- Kirkby, M. J. (2020). *The stream head as a significant geomorphic threshold* (pp. 53-73). Routledge.
- Koutsoyiannis, D., 2021. The perpetual change in climate and the technology-augmented human ability of adaptation (Invited), *Water 3rd Webinar | Climate Change and Water Resources: Evidence, Impacts, Adaptation*, doi:10.13140/RG.2.2.22354.27849.
- Kraus, K., 2003. *Photogrammetry, remote sensing and spatial information science for heritage documentation*. na.
- Kraus, K., 2007. *Photogrammetry: geometry from images and laser scans* (Vol. 1). Walter de Gruyter.
- Kuczera, G., Mroczkowski, M., 1998. Assessment of hydrologic parameter uncertainty and the worth of multiresponse data. *Water Resources Research*, 34(6), 1481-1489.
- Kundzewicz, Z.W., L.J. Mata, N.W. Arnell, P. Döll, P. Kabat, B. Jiménez, K.A. Miller, T. Oki, Z. Sen and I.A. Shiklomanov, 2007. Freshwater resources and their management. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 173-210.
- Lashermes, B., Foufoula-Georgiou, E., Dietrich, W.E., 2007. Channel network extraction from high resolution topography using wavelets. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L23S04, doi:10.1029/2007GL031140.
- Latt, Z.Z., Wittenberg, H., and Urban, B., 2015. Clustering Hydrological Homogeneous Regions and Neural Network Based Index Flood Estimation for Ungauged Catchments: an Example of the Chindwin River in Myanmar. *Water Resour Manage* 29(3): 913-928.
- Laurie, D., Gather, U., 1993. The Identification of Multiple Outliers. *Journal of the American Statistical Association* 88 423:782-792.

- Lee, H., McIntyre, N., Wheater, H., and Young, A., 2005. Selection of conceptual models for regionalisation of the rainfall-runoff relationship. *Journal of Hydrology*, 312(1-4), 125-147.
- LeFavour, G., Alsdorf, D., 2005. Water slope and discharge in the Amazon River estimated using the shuttle radar topography mission digital elevation model. *Geophysical Research Letters*, 32(17).
- Leibowitz, S. G., Comeleo, R. L., Wigington Jr., P. J., Weber, M. H., Sproles, E. A., and Sawicz, K. A., 2016. Hydrologic landscape characterization for the Pacific Northwest, USA. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 52, 473–493, <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12402>.
- Leopold, L. B., and Maddock, T. (1953). *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications* (Vol. 252). US Government Printing Office.
- Leopold, L.B. and Miller, J.P., 1956. Ephemeral streams - Hydraulic factors and their relation to the drainage net. *U.S. Geol. Surv., Prof. Pap.* 282-A.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G. and Miller, J.P., 1964. *Fluvial Process in Geomorphology*. Freeman, San Francisco, Calif.
- Li, J., and Wong, D.W., 2010. Effects of DEM sources on hydrologic applications. *Computers, Environment and urban systems*, 34(3), 251-261.
- Liang, W.L., and Chan, M.C., 2017. Spatial and temporal variations in the effects of soil depth and topographic wetness index of bedrock topography on subsurface saturation generation in a steep natural forested headwater catchment. *Journal of Hydrology*, 546, 405-418.
- Luce, C. H., and Holden, Z. A., 2009. Declining annual streamflow distributions in the Pacific Northwest United States, 1948–2006. *Geophysical Research Letters*, 36(16).
- Madduma Bandara, C.M., 1974. Drainage density and effective precipitation. *J. Hydrol.* 21, 187–190.
- Madsen, H., 2000. Automatic calibration of a conceptual rainfall–runoff model using multiple objectives. *Journal of hydrology*, 235(3-4), 276-288.
- Madsen, H., Wilson, G., and Ammentorp, H. C., 2002. Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models. *Journal of hydrology*, 261(1-4), 48-59.
- Mamassis, N., Nalbantis, I., 1995. Study of hydrological balances, Evaluation and management of water resources of Sterea Hellas, project report 20, National Technical University of Athens, pp. 118.
- Mark, D. M., 1988. Network models in geomorphology. *Modelling Geomorphological Systems*. John Wiley and Sons New York. 1988. p 73-97, 11 fig, 3 tab, 60 ref. NSF Grant SES-8420789.
- Marks, K., and Bates, P., 2000. Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models. *Hydrological Processes*, 14(11–12), 2109–2122.
- Martz, L. W., Garbrecht, J., 1999. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM. *Computers & Geosciences*, 25(7), 835-844.
- Matsuura, T., Aniya, M., 2012. Automated segmentation of hillslope profiles across ridges and valleys using a digital elevation model. *Geomorphology*, 177, 167-177.
- Maurer, D. K., Lopes, T. J., Medina, R. L., and Smith, J. L., 2004. Hydrogeology and hydrologic landscape regions of Nevada. *USGS Scientific Investigations Report*, 5131.
- McDonnell, J. J., Woods, R., 2004. On the need for catchment classification. *Journal of Hydrology*, 299(1-2), 2-3.

- McMahon, T., Laaha, G., Parajka, J., Peel, M., Savenije, H.H.G., Sivapalan, M., Szolgay, J., Thompson, S.E., Viglione, A., Woods, R. and Yang, D., 2013. Prediction of annual runoff in ungauged basins. In *Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis Across Processes, Places and Scales* (pp. 70-101). Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139235761.008.
- McMillan, H. K., 2012. Effect of spatial variability and seasonality in soil moisture on drainage thresholds and fluxes in a conceptual hydrological model. *Hydrological Processes*, 26(18), 2838-2844.
- McMillan, H. K., Booker, D. J., and Cattoën, C., 2016. Validation of a national hydrological model. *Journal of Hydrology*, 541, 800-815.
- McNamara, I., Baez-Villanueva, O. M., Zomorodian, A., Ayyad, S., Zambrano-Bigiarini, M., Zaroug, M., Mersha, A., Nauditt, A., Mbuliro, M., Wamala, S., and Ribbe, L., 2021. How well do gridded precipitation and actual evapotranspiration products represent the key water balance components in the Nile Basin?. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100884.
- McNamara, J. P., Tetzlaff, D., Bishop, K., Soulsby, C., Seyfried, M., Peters, N. E., Aulenbach, B.T., Hooper, R., 2011. Storage as a metric of catchment comparison. *Hydrological Processes*, 25(21), 3364-3371.
- Melton, M. A., 1957. *An analysis of the relations among elements of climate, surface properties, and geomorphology* (Vol. 11). New York: Department of Geology, Columbia University.
- Melton, M.A., 1958. Correlation structure of morphometric properties of drainage systems and their controlling agents. *J. Geol.* 66, 442–460.
- Merheb, M., Moussa, R., Abdallah, C., Colin, F., Perrin, C., and Baghdadi, N., 2016. Hydrological response characteristics of Mediterranean catchments at different time scales: a meta-analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 61(14), 2520-2539.
- Merwade, V., Olivera, F., Arabi, M., and Edleman, S., 2008. Uncertainty in Flood Inundation Mapping: Current Issues and Future Directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, pp. 608–620, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:7\(608\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:7(608)).
- Metz, M., Mitasova, H., and Harmon, R. S. 2011. Efficient extraction of drainage networks from massive, radar-based elevation models with least cost path search. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 667-678.
- Michaelides, K., Chappell, A., 2009. Connectivity as a concept for characterising hydrological behaviour. *Hydrological Processes*, 23(3), 517-522.
- Miller, C., and Laflamme, R. 1958. The digital terrain model — theory and applications. *Photogrammetric Engineering*, 24:433–442.
- Moglen, G.E., Eltahir, E.A., and Bras, R.L., 1998. On the sensitivity of drainage density to climate change. *Water Resour. Res.* 34, 855–862.
- Montgomery, D.R., Dietrich, W.E., 1988. Where do channels begin? *Nature* 336, 232–234.
- Montgomery, D.R., Dietrich, W.E., 1989. Source areas, drainage density, and channel initiation. *Water Resources Research* 25(8):1907–1918.
- Montgomery, D.R., Dietrich, W.E., 1992. Channel initiation and the problem of landscape scale. *Science* Feb. 1992;255:826–30. <http://dx.doi.org/10.1126/science.255.5046.826>.

- Montgomery, D.R., Fournoula-Georgiou, E., 1993. Channel network source representation using digital elevation models. *Water Resour. Res.* 29, 3925–3934.
- Montgomery, D.R., Dietrich, W.E., 2002. Runoff generation in a steep, soil-mantled landscape. *Water Resources Research* 38(9): 71–78, <https://doi.org/10.1029/2001WR000822>.
- Moore, I.D., Burch, G.J., MacKenzie, D.H., 1988a. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *Am. Soc. Agric. Eng. Trans.* 31, 1098–1107.
- Moore, I. D., O'Loughlin, E. M., and Burch, G. J., 1988b. A contour-based topographic model for hydrological and ecological applications. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13(4), 305-320.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., and Ladson, A.R., 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrol. Process.* 5 (1), 3–30.
- Moore, I.D., Gessler, P.E., Nielsen, G.A., and Peterson, G.A., 1992. Terrain analysis for soil-specific crop management, in soil-specific crop management: a workshop on research and development issues. Minnesota Extension Services, University of Minnesota (Agriculture), Minneapolis, 23 pp.
- Morris, D.G., Heerdegen, R.G., 1988. Automatically derived catchment boundaries and channel networks and their hydrological applications. *Geomorphology* 1(2):131–141.
- Mosley, M. P., McKerchar, A. I., 1993. Streamflow, in: *Handbook of Hydrology*, edited by: Maidment, D. R., McGraw-Hill, New York, pp. 8.1–8.39.
- Nalbantis, I., 1995. Use of multiple-time-step information in rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 165(1-4): 135-159.
- Nalbantis, I., Efstratiadis, A., Rozos, E., Kopsiafti, M. and Koutsoyiannis, D., 2011. Holistic versus monomeric strategies for hydrological modelling of human-modified hydrosystems, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15(3), 743–758, doi:10.5194/hess-15-743-2011.
- Nalbantis, I., Rozos, E., Tentes, G. M. T., Efstratiadis, A., and Koutsoyiannis, D., 2002. 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.
- Nalbantis, I., A. Efstratiadis, E. Rozos, M. Kopsiafti, and Koutsoyiannis, D., 2011. Holistic versus monomeric strategies for hydrological modelling of human-modified hydrosystems. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 743–758.
- Nalbantis, I., and Lympelopoulou, S., 2012. Assessment of flood frequency after forest fires in small ungauged basins based on uncertain measurements. *Hydrological Sciences Journal*, 57(1), 52–72.
- Nalbantis, I., Papageorgaki, I., Sioras, P. and Ioannidis, Ch., 2012. Effect of uncertainty in Digital Surface Models on the boundary of inundated areas, *European Geosciences Union, Session NH1.6/HS4.7: Flood risk and uncertainty*, 22-29 April 2012, Vienna, Austria.
- Nalbantis, I., Papageorgaki, I., Sioras, P., and Ioannidis, C., 2017. Effect of uncertainty in Digital Surface Models on the extent of inundated areas. *Hydrological Processes* 31(9):1760–1775.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Neal, J., Schumann, G., and Bates, P., 2012. A subgrid channel model for simulating river hydraulics and floodplain inundation over large and data sparse areas. *Water Resources Research*, 48. doi:10.1029/2012WR012514.W11506

- Neter, J., Kutner, M.H., Nachtsheim, C.J., and Wasserman, W., 1996. Applied linear statistical models, Vol. 4, p. 318, Chicago:Irwin.
- Neter, J., Wasserman, W., Kutner, M.H., 1985. Applied Linear Statistical Models. 2d ed. Irwin, 1127 pp.
- Newton, D. W., Vinyard, J. W., 1967. Computer-determined unit hydrograph from floods. *Journal of the Hydraulics Division*, 93(5), 219-236.
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G., Silveira, A., and Saleska, S., 2011. Height Above the Nearest Drainage—a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404(1-2), 13-29.
- O'callaghan, J.F., Mark, D.M., 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing* 28:323–344.
- O'Connell, P.E., and Todini, E., 1996. Modelling of rainfall, flow and mass transport in hydrological systems: an overview. *Journal of Hydrology*, 175, 3–16.
- Oguchi, T., 1997. Drainage density and relative relief in humid steep mountains with frequent slope failure. *Earth Surf. Processes Landforms* 22, 107–120.
- Olden, J. D., and Poff, N. L., 2003. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications*, 19, 101–121.
- Olden, J. D., Joy, M. K., Death, R. G., 2004. An accurate comparison of methods for quantifying variable importance in artificial neural networks using simulated data. *Ecological modelling*, 178(3-4), 389-397.
- Omer, C. R., Nelson, E. J., and Zundel, A. K., 2003. Impact of varied data resolution on hydraulic modeling and flood plain delineation. *Journal of the American Water Resources Association*, 39(2), 467–475.
- Palacios-Velez, O. L., Cuevas-Renaud, B., 1986. Automated river-course, ridge and basin delineation from digital elevation data. *Journal of Hydrology*, 86(3-4), 299-314.
- Pan, L., Wu, L., 1998. A hybrid global optimization method for inverse estimation of hydraulic parameters: Annealing-simplex method. *Water Resources Research*, 34(9), 2261-2269.
- Papageorgaki, I., Nalbantis, I., 2013. Hydrological landscape classification based on digital elevation models and orthophotos. In: *EGU General Assembly Conference Abstracts* 15:9867.
- Papageorgaki, I., and I. Nalbantis, 2015. Classification of drainage basins based on readily available information, *European Water Resources Association, 9th World Congress of EWRA*, 10-13 June 2015, Istanbul, Turkey.
- Papageorgaki, I., Nalbantis, I., 2016. Classification of Drainage Basins Based on Readily Available Information. *Water Resources Management* 30:5559–5574.
- Papageorgaki, I., Nalbantis, I. 2017. Definition of critical support area revisited. *European Water*, 57: 273-278.
- Papageorgaki, I., Nalbantis, I., 2018. On Spatio-Temporal Modelling of Stream Network Initiation. *Environmental Processes*, 5(1), 239-257.
- Papageorgaki, I., Nalbantis, I. 2022. Semi-distributed rainfall-runoff modelling using landscape classification. *7th IAHR Europe Congress*, Athens, Greece, 249-250.

- Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M., and Blazkova, S. J. J. O. H., 2005. Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *Journal of hydrology*, 302(1-4), 46-69.
- Park, S. J., van de Giesen, N., 2004. Soil-landscape delineation to define spatial sampling domains for hill slope hydrology, *J. Hydrol.*, 295, 28–46.
- Passalacqua, P., Tarolli, P., and Foufoula-Georgiou, E., 2010. Testing space-scale methodologies for automatic geomorphic feature extraction from LiDAR in a complex mountainous landscape. *Water resources research*, 46(11).
- Patil, S. D., Wigington Jr, P. J., Leibowitz, S. G., Comeleo, R. L., 2014. Use of hydrologic landscape classification to diagnose streamflow predictability in Oregon. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50(3), 762-776.
- Paturel, J. E., Servat, E., and Vassiliadis, A., 1995. Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data—case of the GR2M model. *Journal of hydrology*, 168(1-4), 111-125.
- Pelletier, J. D., 2013. A robust, two-parameter method for the extraction of drainage networks from high-resolution digital elevation models (DEMs): Evaluation using synthetic and real-world DEMs. *Water Resources Research*, 49(1), 75-89.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of hydrology*, 242(3-4), 275-301.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of hydrology*, 279(1-4), 275-289.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of hydrology*, 279(1-4), 275-289.
- Peucker, T. K., and Douglas, D. H., 1975. Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. *Computer Graphics and image processing*, 4(4), 375-387.
- Phillips, R. W., Spence, C., Pomeroy, J. W., 2011. Connectivity and runoff dynamics in heterogeneous basins. *Hydrological Processes*, 25(19), 3061-3075.
- Pilgrim, D. H., Cordery, I., Baron, B. C., 1982. Effects of catchment size on runoff relationships. *Journal of Hydrology*, 58(3-4), 205-221.
- Prosser, I.P., Dietrich, W.E., 1995. Field experiments on erosion by overland and their implication for a digital terrain model of channel initiation. *Water Resour. Res.* 31, 2867–2876.
- Qamar, M.U., Ganora, D., and Claps, P., 2015. Monthly Runoff Regime Regionalization Through Dissimilarity-Based Methods. *Water Resour Manage* 29(13):4735-4751.
- Qian, J., Ehrlich, R. W., and Campbell, J. B., 1990. DNESYS-An expert system for automatic extraction of drainage networks from digital elevation data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(1), 29-45.
- Quinn, P. F. B. J., Beven, K., Chevallier, P., and Planchon, O., 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological processes*, 5(1), 59-79.

- Rahmati, O., Kornejady, A., Samadi, M., Nobre, A.D., and Melesse, A.M., 2018. Development of an automated GIS tool for reproducing the HAND terrain model. *Environmental Modelling and Software*, 102, 1-12.
- Raman, H. and Sunilkumar, N. 1995 Multivariate modelling of water resources time series using artificial neural networks. *Hydrology Science Journal* 40, 145–163.
- Refsgaard, J.C., Storm, B., and Clausen, T., 2010. Système Hydrologique Européen (SHE): review and perspectives after 30 years development in distributed physically-based hydrological modelling. *Hydrology Research*, 41 (5), 355–377.
- Refsgaard, J.C., Storm, B., 1995. In: Singh, V.P., (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Englewood, USA, pp. 809–846. Ren-Jun, Z., 1992. The Xinanjiang model applied in China. *Journal of hydrology*, 135(1-4), 371-381.
- Rennó, C., Nobre, A., Cuartas, L., Soares, J., Hodnett, M., Tomasella, J., and Waterloo, M., 2008. Hand, a new terrain descriptor using srtm-dem: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sens. Environ.*, 112, 3469–3481, doi:10.1016/j.rse.2008.03.018.
- Richards, R.P., 1990. Measures of flow variability and a new flow-based classification of Great Lakes tributaries. *Journal of Great Lakes Research* 16(1):53-70.
- Richter, B., Baumgartner, J., Wigington, R., and Braun, D., 1997. How much water does a river need? *Freshwater biology*, 37(1), 231-249.
- Rinaldo, A., Vogel, G., Rigon, R. and Rodriguez-Iturbe, I. 1995. Can one gauge the shape of a basin? *Water Resour. Res.*, 31: 1119–1127.
- Rinaldo A., Rodriguez-Iturbe I., 1996. Geomorphological theory of the hydrological response. *Hydrol. Process.*, 10 (11), 803–829.
- Risva, K., 2016. Model development for low flow estimations in river basins across the Mediterranean, Diploma thesis, 226 pages, School of Rural Engineering, National Technical University of Athens.
- Risva, K., Nikolopoulos, D., Efstratiadis, A., and Nalbantis, I., 2017. A simple model for low flow forecasting in Mediterranean streams. *European Water*, 57, 337-343.
- Robinson, J. S., Sivapalan, M., 1997. Temporal scales and hydrological regimes: implications for flood frequency scaling. *Water Resources Research* 33 (12), pp. 2981–2999.
- Robinson, M., Ward, R., 1990. *Principles of hydrology*. New York, NY, USA: McGraw-Hill.
- Rodríguez-Iturbe, I., Valdés, J. B., 1979. The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water resources research*, 15(6), 1409-1420.
- Rodríguez-Iturbe, I., Rinaldo, A., 1997. *Fractal river basins: chance and self-organization*. Cambridge University Press.
- Roering, J. J., Kirchner, J. W., and Dietrich, W. E., 1999. Evidence for nonlinear, diffusive sediment transport on hillslopes and implications for landscape morphology. *Water Resources Research*, 35(3), 853-870.
- Rogger, M., Kohl, B., Pirkl, H., Viglione, A., Komma, J., Kimbauer, R., Merz, R., and Blöschl, G., 2012a. Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation in Austria – Do they tell a consistent story? *Journal of Hydrology*, 456–457, 30–43. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.05.068.

- Rogger, M., Pirkl, H., Viglione, A., Komma, J., Kohl, B., Kirnbauer, R., Merz, R., and Blöschl, G., 2012b. Step changes in the flood frequency curve: Process controls. *Water Resources Research*, 48, W05544. DOI: 10.1029/2011WR011187.
- Rosen, P., Eineder, M., Rabus, B., Gurrola, E., Hensley, S., Knöpfle, W., Breit, H., Roth, A. and Werner, M., 2001. SRTM-Mission-cross comparison of X and C band data properties. In *IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No. 01CH37217) (Vol. 2, pp. 751-753)*, IEEE.
- Rousseeuw, P.J., Croux, C., 1993. Alternatives to the median absolute deviation. *Journal of the American Statistical Association* 88(424):1273-1283.
- Rowland, I. D., Howe, T. N., 2001. *Vitruvius: 'Ten books on architecture'*. Cambridge University Press.
- Rulli, M. C., 2010. A physically based watershed partitioning method. *Advances in water resources*, 33(10), 1206-1215.
- Safeeq, M., Mauger, G. S., Grant, G. E., Arismendi, I., Hamlet, A. F., and Lee, S. Y., 2014. Comparing large-scale hydrological model predictions with observed streamflow in the Pacific Northwest: Effects of climate and groundwater. *Journal of Hydrometeorology*, 15(6), 2501-2521.
- Saleska, S., 2011. Height Above the Nearest Drainage, a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology* doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.051.
- Sangireddy, H., Stark, C.P., Kladzyk, A., and Passalacqua, P., 2016. GeoNet: An open-source software for the automatic and objective extraction of channel heads, channel network, and channel morphology from high resolution topography data. *Environmental Modelling and Software*, 83, 58-73.
- Savenije, H.H.G., 2010. Topography driven conceptual modeling (FLEX-Topo), *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 2681–2692.
- Sawicz, K., Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P. A., and Carrillo, G., 2011. Catchment classification: empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the eastern USA. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(9), 2895-2911.
- Scheidegger, A. E., 1965. The algebra of stream-order numbers. *United States Geological Survey Professional Paper*, 525, 187-189.
- Scherrer, S., Naef, F., 2003. A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland. *Hydrological Processes*, 17, 391–401.
- Schumann, G., Di Baldassarre, G., Alsdorf, D., and Bates, P. D., 2010. Near real-time flood wave approximation on large rivers from space: Application to the river Po, Italy. *Water Resources Research*, 46, doi:10.1029/2008WR007672.W05601.
- Schumm, S.A., 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geol. Soc. Am. Bull.* 67, 597–646.
- Seber, G.A., Lee, A.J., 2012. *Linear regression analysis*. Vol. 936. Hoboken, NJ.
- Sedhuraman, M., Revathy, S.S., and Suresh Babu, S., 2014. Integration of Geology and Geomorphology for Groundwater Assessment using Remote Sensing and GIS Techniques. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 3:10203–10211.

- Sheffield, J. and Wood, E.F., 2008. Global trends and variability in soil moisture and drought characteristics, 1950–2000, from observation-driven simulations of the terrestrial hydrologic cycle. *Journal of Climate*, 21, 432–458.
- Shen, D., and Sheng, Y., 2011. Area partitioning for channel network extraction using digital elevation models and remote sensing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(2), 194–198.
- Sherman, L. K., 1949. The unit hydrograph method. *Physics of the Earth*, 514–525.
- Shreve, R. L. 1966. Statistical law of stream numbers. *The Journal of Geology*, 74(1), 17–37.
- Singh, V. P., and Frevert, D. K. (Eds.), 2002. *Mathematical models of large watershed hydrology*. Water Resources Publication.
- Singh, P.K., Mishra, S.K., and Jain, M.K., 2014. A review of the synthetic unit hydrograph: from the empirical UH to advanced geomorphological methods, *Hydrological Sciences Journal*, DOI: 10.1080/02626667.2013.870664.
- Singh, V. P., and Woolhiser, D. A., 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of hydrologic engineering*, 7(4), 270–292.
- Sivapalan, M., 2005. Pattern, processes and function: elements of a unified theory of hydrology at the catchment scale, Anderson, M. (ed.) *Encyclopedia of hydrological sciences*. London: John Wiley, pp. 193–219.
- Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S.W., Gupta, V.K., Karambiri, H., Lakshmi, V., Liang, X., McDonnell, J.J., Mendiondo, E.M., O'Connell, P.E., Oki, T., Pomeroy, J.W., Schertzer, D., Uhlenbrook, S., and Zehe, E., 2003. 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 DOI: 10.1623/hysj.48.6.857.51421.
- Sivapalan, M., 2003. Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology. *Hydrological Processes*, 17, 3163–3170.
- Sivapalan, M., 2005. Pattern, process and function: elements of a unified theory of hydrology at the catchment scale. In: M.G. Anderson, ed. *Encyclopedia of hydrological sciences*. Chichester: Wiley, 193–219.
- Sivapalan, M., 2009. The secret to 'doing better hydrological science': Change the question!, *Hydrological Processes*, 23, 1391–1396, doi:10.1002/hyp.7242.
- Skoulikidis, N.T., Sabater, S., Datry, T., Morais, M.M., Buffagni, A., Dörflinger, G., and Tockner, K., 2016. Non-perennial Mediterranean rivers in Europe: Status, pressures, and challenges for research and management. *Science of the Total Environment* 577:1–18.
- Smith, K.G., 1958. Erosional processes and landforms in Badlands National Monument, South Dakota. *Geol. Soc. Am. Bull.* 69, 975–1008.
- Smith, T.R., Bretherton, F.P., 1972. Stability and the conservation of mass in drainage basin evolution. *Water Resour. Res.* 8, 1506–1529.
- Smith, T.R., Zhan, C., and Gao, P., 1990. A knowledge-based, two-step procedure for extracting channel networks from noisy DEM data. *Computers and Geosciences*, 16(6), 777–786.
- Snell, J. D., Sivapalan, M., 1994. On geomorphological dispersion in natural catchments and the geomorphological unit hydrograph. *Water Resources Research*, 30(7), 2311–2323.
- Snyder, F.F., 1938. Synthetic unit hydrographs. *Trans Am Geophys Union* 19:447–454

- Soille, P., Vogt, J., and Colombo, R., 2003. Carving and adaptive drainage enforcement of grid digital elevation models. *Water resources research*, 39(12).
- Son, K., and Sivapalan, M., 2007. Improving model structure and reducing parameter uncertainty in conceptual water balance models through the use of auxiliary data. *Water resources research*, 43(1).
- Sorooshian, S., Gupta, V. K., 1983. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: The question of parameter observability and uniqueness. *Water resources research*, 19(1), 260-268.
- Sorooshian, S., Gupta, V.K., and Fulton, J.L., 1983. 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.
- Soulsby, C., Neal, C., Laudon, H., Burns, D.A., Mérot, P., Bonell, M., Dunn, S.M. and Tetzlaff, D., 2008. Catchment data for process conceptualization: simply not enough?. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(12), pp.2057-2061.
- Speed, M., Tetzlaff, D., Hrachowitz, M., and Soulsby, C., 2011. Evolution of the spatial and temporal characteristics of the isotope hydrology of a montane river basin. *Hydrological Sciences Journal—Journal des Sciences Hydrologiques*, 56(3), 426-442.
- Spence, C., and Woo, M. K., 2003. Hydrology of subarctic Canadian shield: soil-filled valleys. *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 151-166.
- Spence, C., 2007. On the relation between dynamic storage and runoff: A discussion on thresholds, efficiency, and function. *Water Resources Research*, 43(12).
- Spence, C., 2010. A paradigm shift in hydrology: Storage thresholds across scales influence catchment runoff generation. *Geography Compass*, 4(7), 819-833.
- Strahler, A. N., 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological society of America bulletin*, 63(11), 1117-1142.
- Strahler, A. N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913-920.
- Sutcliffe, J.V., 1978. *Methods of flood estimation, A Guide to Flood Studies Report*. Report No 49, Institute of Hydrology, U.K.
- Tarboton, D.G., Bras, RL, and Rodriguez-Iturbe, I., 1988. The fractal nature of river networks. *Water Resources Research* 24(8):1317-1322.
- Tarboton, D.G., Bras, RL, and Rodriguez-Iturbe, I., 1991. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes* 5(1):81-100.
- Tarboton, D.G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research* 33(2): 309-319.
- Tarboton, D.G., Bras, RL, Rodriguez-Iturbe, I., 1992. A physical basis for drainage density. *Geomorphology*, 5 (1/2) (1992), pp. 59-76.
- Tarboton, D.G., and Ames, D. P., 2001. Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data. In *Bridging the gap: Meeting the World's water and environmental resources challenges* (pp. 1-10).
- Tarolli, P., and Fontana, G. D., 2009. Hillslope to valley transition morphology: New opportunities from high resolution DTMs. *Geomorphology*, 113, 47-56.

- Tate, E. C., Olivera, F., Maidment, D. R., 2002. Creating a terrain model for floodplain mapping. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, 7(2), 00–108.
- Tetford, P.E., Desloges, J.R., and Nakassis, D., 2017. Modelling surface geomorphic processes using the RUSLE and specific stream power in a GIS framework, NE Peloponnese, Greece. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(4), 1229–1244. doi:10.1007/s40808-017-0391-z.
- Todd, M. J., Wigington Jr., P. J., and Sproles, E. A., 2017. Hydrologic landscape classification to estimate Bristol Bay, Alaska watershed hydrology, *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 53, 1008–1031, <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12544>.
- Todini, E., Ciarapica, L., 2001. The TOPKAPI model. *Mathematical models of large watershed hydrology*, 471-506.
- Todini, E., 2007. Hydrological catchment modeling: past, present and future. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11 (1), 468–482.
- Todini, E., 2011. History and perspectives of hydrological catchment modeling, *Hydrology Research*, 42 (2–3), 73–85.
- Todini, E., Ciarapica, L., 2001. The TOPKAPI model. *Mathematical models of large watershed hydrology*, 471-506.
- Toriwaki, J. I., Fukumura, T., 1978. Extraction of structural information from grey pictures. *Computer Graphics and Image Processing*, 7(1), 30-51.
- Townsend, C.R., Dolédec, S., Norris, R., Peacock, K., and Arbuttle C., 2003. The influence of scale and geography on relationships between stream community composition and landscape variables: description and prediction. *Freshwater Biology*, 48(5), 768-785.
- Trainer, F. W., 1969. Drainage density as an indicator of base flow in part of the Potomac River basin. *US Geological Survey Professional Paper*, C177-C183.
- Tribe, A., 1992. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. *Journal of Hydrology*, 139(1-4), 263-293.
- Troch, P. A., Carrillo, G. A., Heidbüchel, I., Rajagopal, S., Switanek, M., Volkmann, T. H., and Yaeger, M. 2009. Dealing with landscape heterogeneity in watershed hydrology: A review of recent progress toward new hydrological theory. *Geography Compass*, 3(1), 375-392.
- Troch, P.A., Paniconi, C., and McLaughlin, D., 2003. Catchment-scale hydrological modeling and data assimilation. *Advances in Water Resources*, 26, 131–135.
- Tromp-van Meerveld, H. J., and McDonnell, J. J., 2006. Threshold relations in subsurface stormflow: 2. The fill and spill hypothesis. *Water Resources Research*, 42(2).
- Tsakiris, G., Pistrika, Aim., Klampanos, I., Laoupi, A., Ioannidis, Ch., Soile, S., and Georgopoulos, A., 2007. DISMA – Disaster Management GIS with emphasis on cultural sites – Technical Report, Volume I (unpublished), INTERREG IIIC – Second Initiative and the Regional Operation Framework of NOE Prograsmme - Patrimoines et prevention des risques naturels. Centre for the Assessment of Natural Hazards and Proactive Planning, Athens, Greece.
- Tsakiris, G., Nalbantis, I., and Cavadias, G., 2011. Regionalization of low flows based on Canonical Correlation Analysis. *Adv Water Resour* 34:865–872.
- Tucker, G.E., 1996. Modeling the large-scale interaction of climate, tectonics and topography. *Tech. Rep. 96-003*, Earth System Science Center, Pennsylvania State Univ., University Park, 223 pp.

- Tucker, G. E., and Bras, R. L., 1998. Hillslope processes, drainage density, and landscape morphology. *Water resources research*, 34(10), 2751-2764.
- Tucker, G. E., Catani, F., Rinaldo, A., and Bras, R. L., 2001. Statistical analysis of drainage density from digital terrain data. *Geomorphology*, 36(3-4), 187-202.
- Turcotte, R., Fortin, J. P., Rousseau, A. N., Massicotte, S., Villeneuve, J. P., 2001. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of hydrology*, 240(3-4), 225-242.
- Upal, M. A., Neufeld, E., 1996. Comparison of unsupervised classifiers. In *Proceedings of the First International Conference on Information, Statistics and Induction in Science* (pp. 342-353).
- Valeo, C., Moin, S. M. A., 2000. Grid-resolution effects on a model for integrating urban and rural areas. *Hydrological Processes*, 14(14), 2505–2525.
- Vano, J. A., Kim, J. B., Rupp, D. E., Mote, P. W., 2015. Selecting climate change scenarios using impact-relevant sensitivities. *Geophysical Research Letters*, 42(13), 5516-5525.
- Viglione, A., Rogger, M., Pirkl, H., Parajka, J., and Blöschl, G., 2018. Conceptual model building inspired by field-mapped runoff generation mechanisms. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66(3), 303-315.
- Vincent L., 1990. Time series analysis: Testing the homogeneity of monthly temperature series. *Survey Paper 90-05*, York University, pp. 50.
- Vogel, R.M., Kroll, C.N., 1990. Generalized low-flow frequency relationships for ungauged sites in Massachusetts. *Water Resour Bull* 26(2):241-253.
- Vogel, R.M., Kroll, C.N., 1992. Regional geohydrologic-geomorphic relationships for the estimation of low-flow statistics. *Water Resour Res* 28:2451–2458.
- Vogt, J. V., Soille, P., de Jager, A., Rimaviciute, E., Mehl, W., Haastrup, P., and Bamps, C., 2007. Developing a pan-European data base of drainage networks and Catchment Boundaries from a 100 Metre DEM. In *Proceedings AGILE international conference*.
- Vogt, J.V., Colombo, R., and Bertolo, F., 2003a. Deriving drainage networks and catchment boundaries: a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. *Geomorphology* 53, 281–298.
- Vogt, J.V., Colombo, R., Paracchini, M.L., Soille, P., de Jager, A., and vFolving, S., 2003b. A European landscape stratification reflecting drainage density. In: Helming, K., Wiggering, H. (Eds.), *Sustainable Development of Multifunctional Landscapes*. Springer Verlag, Berlin, pp. 95–110.
- Vrugt, J. A., Bouten, W., Gupta, H. V., and Sorooshian, S., 2002. Toward improved identifiability of hydrologic model parameters: The information content of experimental data. *Water Resources Research*, 38(12), 48-1.
- Wagner, T., Wheeler, H. S., and Gupta, H. V., 2004. *Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments*. London, UK: Imperial College Press.
- Wagner, T., Boyle, D. P., Lees, M. J., Wheeler, H. S., Gupta, H. V., and Sorooshian, S., 2001. A framework for development and application of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 13-26.
- Wagner, T., Sivapalan, M., Troch, P., and Woods, R., 2007. Catchment classification and hydrologic similarity. *Geography compass*, 1(4), 901-931.

- Walker, J. P., Willgoose, G. R., 1999. On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology. *Water Resources Research*, 35(7), 2259-2268.
- Wang, Y., Zheng, T., 2005. Comparison of digital elevation models and understanding of their impact on the flood extent mapping on a coastal floodplain of North Carolina. *Natural Hazards Review*, 6(1), 34–40.
- Wang, Q. J., 1991. The POT model described by the generalized Pareto distribution with Poisson arrival rate. *Journal of Hydrology*, 129(1-4), 263-280.
- Ward, R. C., Robinson, M., 1975. *Principles of hydrology* (Vol. 367). London: McGraw-Hill.
- Wardrop, D. H., Bishop, J. A., Easterling, M., Hychka, K., Myers, W., Patil, G. P., and Taillie, C., 2005. Use of landscape and land use parameters for classification and characterization of watersheds in the mid-Atlantic across five physiographic provinces. *Environmental and Ecological Statistics*, 12, 209-223.
- Weber, M., Koch, F., Bernhardt, M., and Schulz, K., 2021. The evaluation of the potential of global data products for snow hydrological modelling in ungauged high-alpine catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(5), 2869-2894.
- Werner, M. J. F., 2001. Impact of grid size in GIS based flood extent mapping using a 1D flow model. *Physics & Chemistry of the Earth Part B*, 26 (7–8), 517–522.
- Werner, M. J. F., 2004. A comparison of flood extent modelling approaches through constraining uncertainties on gauge data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(6), 1141–1152.
- Westerberg, I.K., Wagener, T., Coxon, G., McMillan, H.K., Castellarin, A., Montanari, A. and Freer, J., 2016. Uncertainty in hydrological signatures for gauged and ungauged catchments. *Water Resources Research*, 52(3), pp.1847-1865.
- Western, A.W., Blöschl, G., and Grayson, R.B., 2001. Towards capturing hydrologically significant connectivity in spatial patterns. *Water Resources Research*, 37 (1), 83–97.
- Wigmosta, M. S., Vail, L. W., Lettenmaier, D. P., 1994. A Distributed Hydrology-Vegetation Model for Complex Terrain. *Water Resour. Res.* **30**: 1665– 1679.
- Wigington Jr., P. J., Leibowitz, S. G., Comeleo, R. L., and Ebersole, J. L., 2013. Oregon hydrologic landscapes: A classification framework. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 49, 163–182, <https://doi.org/10.1111/jawr.12009>.
- Wilby, R., 2005. Uncertainty in water resource model parameters used for climate change impact assessment. *Hydrological Processes*, 19(16),3201–3219.
- Wilson, L., 1971. Drainage density, length ratios, and lithology in a glaciated area of southern Connecticut. *Geol. Soc. Am. Bull.* 82, 2955–2956.
- Wilson, J.P., 2012. Digital terrain modelling. *Geomorphology* 137 (1), 107–121.
- Winter TC., 2001. The concept of hydrologic landscapes. *Journal of American Water Resources Association*, 37(2), 335–349.
- Wolman, M. G., 1955. *The natural channel of Brandywine creek, Pennsylvania* (Vol. 271). US Government Printing Office.
- Wolock, D. M., Winter, T. C., and McMahon, G.M., 2004. Delineation and evaluation of hydrologic-landscape regions in the United States using geographic information system tools and multivariate statistical analyses. *Environ. Manage.*, 34, S71–S88, <https://doi.org/10.1007/s00267-003-5077-9>.

- Wood, E. F., Lettenmaier, D. P., Zartarian, V. G., 1992. A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D3), 2717-2728.
- Wood, E.F., Roundy, J.K., Troy, T.J., Van Beek, L.P.H., Bierkens, M.F., Blyth, E., de Roo, A., Döll, P., Ek, M., Famiglietti, J. and Gochis, D., 2011. Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water. *Water Resources Research*, 47(5).
- Woods, R., 2003. The relative roles of climate, soil, vegetation and topography in determining seasonal and long-term catchment dynamics. *Adv Water Resour* 26(3):295–309.
- Wu, T., Li, J., Li, T., Sivakumar, B., Zhang, G., and Wang, G., 2019. High-efficient extraction of drainage networks from digital elevation models constrained by enhanced flow enforcement from known river maps. *Geomorphology*, 340, 184-201.
- Yadav, M., Wagener, T. and Gupta, H., 2007. Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. *Advances in Water Resources*, 30(8), pp.1756-1774.
- Yang, C., Wong, D. W., Yang, R., Kafatos, M., and Li, Q., 2005. Performance-improving techniques in web-based GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(3), 319-342.
- Yapo, P. O., Gupta, H. V., and Sorooshian, S., 1996. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. *Journal of hydrology*, 181(1-4), 23-48.
- Yapo, P. O., Gupta, H. V., and Sorooshian, S., 1998. Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 83-97.
- Yilmaz, K.K., Gupta, H.V., and Wagener, T., 2008. A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resour. Res.*, 44, W09417, doi:10.1029/2007WR006716.
- Yoeli, P., 1984. Cartographic contouring with computer and plotter. *The American Cartographer*, 11(2), 139-155.
- Young, P. C., 1999. Nonstationary time series analysis and forecasting. *Progress in Environmental Science* 1, 3–48.
- Zadeh, L., 1965. Fuzzy sets. *Inform Control*, 8, 338-353.
- Zhang, X., Srinivasan, R., and Hao, F., 2007. Predicting hydrologic response to climate change in the Luohe River basin using the SWAT model. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 901-910.
- Zhang, Z., Wagener, T., Reed, P., and Bhushan, R., 2008. Reducing uncertainty in predictions in ungauged basins by combining hydrologic indices, regionalization and multi-objective optimization. *Water Resour Res* 44: W00B04, doi:10.1029/2008WR006833.
- Zhao, R. J., 1992. The Xinanjiang model applied in China, *J. Hydrol.*, 135(1-4), 371–381.
- Zehe, E., Becker, R., Bárdossy, A., and Plate, E., 2005. Uncertainty of simulated catchment runoff response in the presence of threshold processes: Role of initial soil moisture and precipitation. *Journal of hydrology*, 315(1-4), 183-202.
- Zehe, E., Blöschl, G., 2004. Predictability of hydrologic response at the plot and catchment scales: role of initial conditions. *Water Resources Research*, 40, W10202.
- Zehe, E., Sivapalan, M., 2009. Threshold behavior in hydrological systems as (human) geo-ecosystems: manifestations, controls and implications. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13 (7), 1273–1297.