



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ανάλυση μεθόδων βροχής – απορροής σε
υδρολογικά μοντέλα με χρήση ΣΓΠ»

ΚΑΒΒΑΔΑ ΟΛΓΑ

Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ

Μεταπτυχιακή Εργασία η οποία υποβάλλεται για
μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για το
Διεπιστημονικό – Διατμηματικό Δίπλωμα Ειδίκευσης
του Δ.Π.Μ.Σ. του Ε.Μ.Πολυτεχνείου
"Περιβάλλον και Ανάπτυξη"

Αθήνα, Φεβρουάριος 2012

Περιβάλλον

και

Ανάπτυξη

Επιβλέπων Καθηγητής: Ν. Μαμάσης

Επιτροπή Παρακολούθησης:

Καθηγητής Κ. Κουτσόπουλος

Λέκτορας Ν. Μαμάσης

Επίκουρος Καθηγητής Ι. Ναλμπάντης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Ανάλυση μεθόδων βροχής – απορροής σε υδρολογικά
μοντέλα με χρήση ΓΣΠ»**

ΚΑΒΒΑΔΑ ΟΛΓΑ

Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την εξάμηνη ενασχόληση μου με την μεταπτυχιακή εργασία στο Δ.Π.Μ.Σ. «Περιβάλλον και Ανάπτυξη» του ΕΜΠ αποκόμισα μια σφαιρική εικόνα για τα διάφορα υδρολογικά στάδια της διαδικασίας βροχής – απορροής αλλά και μια γενικότερη εμπειρία σε θέματα αξιοποίησης των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) σε διάφορες εφαρμογές.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Νίκο Μαμάση, Λέκτορα στο ΕΜΠ, για την ευκαιρία που μου έδωσε να προσεγγίσω ένα πρόβλημα της υδρολογίας μέσα από σύγχρονες μεθόδους, καθώς και για την καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Η επιλογή του θέματος, οι πολύτιμες συμβουλές του και η εν γένει σοβαρή καθοδήγηση του ήταν πολύτιμες.

Επίσης ευχαριστώ τους Καθηγητές ΕΜΠ κ. Κουτσόπουλο και κ. Ναλμπάντη που δέχθηκαν να συμμετάσχουν στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Ακόμη, ευχαριστώ την οικογένεια μου για την πολύτιμη συμπαράσταση της και τη βοήθεια που μου προσέφερε.

Τέλος, Θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους φίλους μου για την υποστήριξη και την υπομονή τους αλλά και για το ευχάριστο κλίμα που δημιούργησαν κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	6
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	8
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	10
ABSTRACT	12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
ΓΕΝΙΚΑ	14
ΣΚΟΠΟΣ – ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	20
1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ - ΟΡΙΣΜΟΙ	20
1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	22
1.3 ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	24
1.4 ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ.....	25
1.5 ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑ	28
1.6 ΜΕΘΟΔΟΣ ΧΡΟΝΟΥ - ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ Σ.Γ.Π. (GIS)	36
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ Σ.Γ.Π.	36
2.2 ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΨΗΦΙΔΩΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	38
2.3 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΕ Σ.Γ.Π.	40
2.4 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ARCGIS	41
2.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΧΡΟΝΟΥ - ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	47
2.5.1 Δημιουργία κανάβου χερσαίας ροής.	48
2.5.2 Δημιουργία κανάβου ταχύτητας ροής υδρογραφικού δικτύου.....	50
2.5.3 Υπολογισμός Ισόχρονων καμπυλών	53
2.6 ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ	56
2.6.1 <i>Inverse Distance Weighted</i>	58
2.6.2 Υπολογισμός παροχής	59
2.7 MODEL BUILDER.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ	64
3.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ	64
3.2 ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ.....	65

3.2.1	Γεωμετρία – Ανάγλυφο	65
3.2.2	Υδρογραφικό Δίκτυο	67
3.2.3	Χρήσεις Γης.....	68
3.2.4	Γεωλογία.....	70
3.2.5	Βροχομετρικά Στοιχεία	72
3.2.6	Αντιπλημμυρικά Έργα.....	74
3.3	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ		82
4.1	ΜΟΝΤΕΛΟ ΧΡΟΝΟΥ – ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	83
4.1.1	Περιγραφή εκτέλεσης του μοντέλου	83
4.1.2	Επίδραση του συντελεστή τραχύτητας εδάφους στο μοναδιαίο υδρογράφημα	88
4.1.3	Επίδραση της τιμής του κατωφλίου στο μοναδιαίο υδρογράφημα	91
4.2	ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ	92
4.2.1	Περιγραφή εκτέλεσης του μοντέλου	92
4.3	ΣΕΝΑΡΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ	94
4.3.1	Σενάριο 1	95
4.3.2	Σενάριο 2	100
4.3.3	Σενάριο 3	104
4.3.4	Σενάριο 4	108
4.4	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	112
4.4.1	Μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ	112
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....		116
5.1	Σ.Γ.Π. ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ	116
5.2	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	117
5.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	119
5.4	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	121
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΧΑΡΤΕΣ.....		128
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΜΟΝΤΕΛΑ		143

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 1-1: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΠΡΟΕΛΕΥΣΕΩΝ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	22
ΣΧΗΜΑ 1-2: ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ STRANHLER ΚΑΙ ΚΑΤΑ SHREVE	25
ΣΧΗΜΑ 1-3: ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	27
ΣΧΗΜΑ 1-4: Η «ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΟΓΙΑΣ» ΤΟΥ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ.	29
ΣΧΗΜΑ 1-5: Η «ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΕΠΑΛΛΗΛΙΑΣ» ΤΟΥ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ	30
ΣΧΗΜΑ 1-6: ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΙΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΑΝΑΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΠΑΛΛΗΛΙΑΣ.	31
ΣΧΗΜΑ 1-7: ΜΕΘΟΔΟΣ ΧΡΟΝΟΥ – ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ.....	33
ΣΧΗΜΑ 2-1: Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΥΠΕΡΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΣΤΑ GIS	37
ΣΧΗΜΑ 2-2: ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ.	39
ΣΧΗΜΑ 2-3: ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΧΩΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	40
ΣΧΗΜΑ 2-4: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΕΝΟΣ ΒΥΘΙΣΜΑΤΟΣ (SINK)	43
ΣΧΗΜΑ 2-5: ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΤΟΛΗΣ FLOW DIRECTION	44
ΣΧΗΜΑ 2-6: ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΤΟΛΗΣ FLOW ACCUMULATION.....	44
ΣΧΗΜΑ 2-7: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΛΑΔΩΝ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	46
ΣΧΗΜΑ 2-8: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	47
ΣΧΗΜΑ 2-9: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΧΕΡΣΑΙΑΣ ΡΟΗΣ	50
ΣΧΗΜΑ 2-10: ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΑΤΝΙΩΝ ΜΕ ΤΙΜΗ ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ 5.....	51
ΣΧΗΜΑ 2-11: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΡΟΗΣ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	53
ΣΧΗΜΑ 2-12: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	54
ΣΧΗΜΑ 2-13: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΧΡΟΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ (ΑΝΑΝΤΗ ΓΟΡΓΟΠΟΤΑΜΟΥ)	55
ΣΧΗΜΑ 2-14: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΧΡΟΝΟΥ – ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.	56
ΣΧΗΜΑ 2-15: ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ IDW	59
ΣΧΗΜΑ 2-16: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ RIXEL ΠΟΥ ΑΠΟΡΡΕΟΥΝ ΣΕ 5 ΩΡΕΣ ΚΑΙ Η ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΠΟΥ ΔΕΧΟΝΤΑΙ.	60
ΣΧΗΜΑ 2-17: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟ ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑ ΑΠΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ.....	61
ΣΧΗΜΑ 2-18: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ MODEL BUILDER.....	61
ΣΧΗΜΑ 3-1: ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ.....	65
ΣΧΗΜΑ 3-2: ΚΑΜΠΥΛΗ ΥΨΟΜΕΤΡΩΝ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ	66
ΣΧΗΜΑ 3-3: ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΚΛΙΣΕΩΝ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ.....	67
ΣΧΗΜΑ 3-4: ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ.....	68
ΣΧΗΜΑ 3-5: ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ	70
ΣΧΗΜΑ 3-6: ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	72
ΣΧΗΜΑ 3-7: ΕΤΗΣΙΕΣ ΤΙΜΕΣ ΚΑΙ ΚΙΝΟΥΜΕΝΟΙ ΜΕΣΟΙ ΟΡΟΙ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ	73
ΣΧΗΜΑ 3-8: ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ (ΑΝΑΝΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΜΕ ΓΟΡΓΟΠΟΤΑΜΟ)	77
ΣΧΗΜΑ 3-9: ΜΗΚΟΤΟΜΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	78

ΣΧΗΜΑ 3-10: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΙΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ	79
ΣΧΗΜΑ 3-11: ΙΕΡΑΡΧΗΣΗ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΕ ΤΑΞΕΙΣ ΚΑΤΑ STRAHLER.....	80
ΣΧΗΜΑ 4-1: ΜΟΝΤΕΛΟ ΙΣΟΧΡΟΝΕΣ: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΑΠΟΡΡΟΗΣ.	84
ΣΧΗΜΑ 4-2: ΧΡΟΝΟΙ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΩΝ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	85
ΣΧΗΜΑ 4-3: ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑ ΧΡΟΝΟΥ – ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	86
ΣΧΗΜΑ 4-4: ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 25x25 Μ	87
ΣΧΗΜΑ 4-5: ΣΥΝΘΕΤΙΚΟ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ, ΑΝΑΝΤΗ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΜΕ ΓΟΡΓΟΠΟΤΑΜΟ.	88
ΣΧΗΜΑ 4-6: ΜΟΝΤΕΛΟ ΙΣΟΧΡΟΝΕΣ_Κ: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΑΠΟΡΡΟΗΣ.....	89
ΣΧΗΜΑ 4-7: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΙΑΙΩΝ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΜΕ ΒΑΣΗ: (Α) ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΟΠΩΣ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΑΠΟ ΤΙΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ ΤΟΥ CORINE, (Β) ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ Κ=25, (Γ) ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ Κ=50, (Δ) ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ Κ=100, (Ε) ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ Κ=200.....	90
ΣΧΗΜΑ 4-8: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΙΑΙΩΝ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ (ΕΚΤΑΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ)	91
ΣΧΗΜΑ 4-9: ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΙΣ.	93
ΣΧΗΜΑ 4-10: ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 25x25 Μ ΜΕΣΩ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΑΡΟΧΗ	94
ΣΧΗΜΑ 4-11: ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΕΝΑΡΙΟ 1	96
ΣΧΗΜΑ 4-12: ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ 1	97
ΣΧΗΜΑ 4-13: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ IDW	97
ΣΧΗΜΑ 4-14: ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑ ΓΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΕΞ' ΟΛΟΚΛΗΡΟΥ ΣΤΑ ΔΥΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	98
ΣΧΗΜΑ 4-15: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ 1 ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑ	99
ΣΧΗΜΑ 4-16: ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΕΝΑΡΙΟ 2	100
ΣΧΗΜΑ 4-17: ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ 2	101
ΣΧΗΜΑ 4-18 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ IDW.	102
ΣΧΗΜΑ 4-19: ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑ ΓΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΕΞ' ΟΛΟΚΛΗΡΟΥ ΣΤΑ ΑΝΑΤΟΛΙΚΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ	102
ΣΧΗΜΑ 4-20: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ 2 ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑ.	103
ΣΧΗΜΑ 4-21: ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΕΝΑΡΙΟ 3	104
ΣΧΗΜΑ 4-22: ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ 3	105
ΣΧΗΜΑ 4-23: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ IDW.	106
ΣΧΗΜΑ 4-24: ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑ ΓΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΕΞ' ΟΛΟΚΛΗΡΟΥ ΣΤΑ ΒΟΡΕΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	106
ΣΧΗΜΑ 4-25: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ 3 ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑ.	107
ΣΧΗΜΑ 4-26: ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΕΝΑΡΙΟ 4	108
ΣΧΗΜΑ 4-27: ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ 4	109
ΣΧΗΜΑ 4-28: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ IDW.	110
ΣΧΗΜΑ 4-29: ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑ ΓΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΕΞ' ΟΛΟΚΛΗΡΟΥ ΣΤΑ ΝΟΤΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.	110
ΣΧΗΜΑ 4-30: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ 4 ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑ.	111
ΣΧΗΜΑ 4-31: ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΓΙΑ ΠΕΡΙΟΔΟ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ T=50 ΕΤΗ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΕΙ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΩΝ ΜΠΛΟΚ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΟΜΒΡΙΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ.	115

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1: ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-2: ΠΙΝΑΚΑΣ ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	71
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-3: ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΑΝΑ ΤΑΞΕΙΣ	80
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1: ΕΚΤΙΜΗΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΟΜΒΡΙΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ	114

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα φυσικά φαινόμενα είναι ιδιαίτερα δύσκολο να μοντελοποιηθούν και να αναπαρασταθούν με ακρίβεια καθώς δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει πλήρης γνώση των φυσικών νόμων που διέπουν τα φαινόμενα αυτά και τα διαθέσιμα δεδομένα για την υπάρχουσα κατάσταση είναι ελάχιστα ως ανεπαρκή. Συνεπώς τα μοντέλα που δημιουργούνται για τις διεργασίες αυτές είναι εννοιολογικά και η ακρίβεια τους εξαρτάται από τις τιμές των παραμέτρων που ορίζονται.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκαν δύο καταναμεμημένα εννοιολογικά μοντέλα αποκλειστικά σε περιβάλλον G.I.S. μέσω του λογισμικού ArcGIS.

Το πρώτο εννοιολογικό μοντέλο βροχής – απορροής προσομοιώνει τα υδρολογικά γεγονότα που λαμβάνουν χώρα κατά την απορροή και υπολογίζει τους χρόνους που απαιτούνται από το κάθε σημείο της λεκάνης για να γίνει πλήρης απορροή αυτής. Επομένως το μοντέλο αυτό, με δεδομένο μόνο το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής, μπορεί να υπολογίσει τις ισόχρονες καμπύλες για τη συγκεκριμένη λεκάνη και να παράγει το αντίστοιχο υδρογράφημα της απορροής το οποίο προκύπτει από το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης. Κύριος στόχος του μοντέλου είναι η εκτίμηση της πλημμυρικής αιχμής και κατά δεύτερο λόγο η εκτίμηση του χρόνου ανόδου (ή χρόνου αιχμής). Το μοντέλο προέκυψε με τροποποίηση υπάρχόντων μοντέλων βροχής – απορροής, εισάγοντας νέες τεχνικές (νέους εμπειρικούς τύπους) και εξελίσσοντας την όλη διαδικασία έτσι ώστε να επιφέρει καλύτερα και πιο ακριβή αποτελέσματα στον ελάχιστο δυνατό χρόνο.

Το δεύτερο μοντέλο που αναπτύχθηκε υπολογίζει την παροχή στην έξοδο της λεκάνης με δεδομένα τις μετρημένες τιμές του ύψους βροχόπτωσης σε συγκεκριμένους βροχομετρικούς σταθμούς ή την επιφανειακή κατανομή μιας βροχόπτωσης. Σκοπός του μοντέλου αυτού είναι η δημιουργία πλημμυρογραφημάτων για τη δεδομένη λεκάνη απορροής με διαφορετικές συνθήκες βροχόπτωσης (ένταση, διάρκεια και χωρική κατανομή).

Τα δύο μοντέλα εφαρμόστηκαν στη λεκάνη απορροής του Σπερχειού ποταμού, ανάντη της συμβολής του με το Γοργοπόταμο, όπου υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα, και κατά την εφαρμογή αυτών ελέγχθηκε η επίδραση διαφόρων παραμέτρων. Τα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της επίδρασης της χωρικής κατανομής

της βροχόπτωσης στα παραγόμενα πλημμυρογραφήματα της λεκάνης απορροής μέσω της εφαρμογής διαφορετικών συνθηκών βροχόπτωσης καθώς και για την εκτίμηση του πλημμυρογραφήματος σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς 50 ετών.

Το πρώτο κεφάλαιο της εργασίας περιλαμβάνει το θεωρητικό υπόβαθρο των διαδικασιών που μελετώνται σε όλη την εργασία καθώς και γενικά στοιχεία και ορισμούς για τα υδρολογικά φαινόμενα και τις λεκάνες απορροής.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.), στη σχέση τους με την υδρολογία και στα εργαλεία που αυτά περιλαμβάνουν για την αναπαράσταση των υδρολογικών φαινομένων. Επίσης στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναλυτική περιγραφή, βήμα προς βήμα, των μοντέλων που δημιουργήθηκαν στην εργασία αυτή με αναλυτική περιγραφή των εργαλείων και των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για να παραχθούν τα απαιτούμενα αποτελέσματα.

Το τρίτο κεφάλαιο της εργασίας περιλαμβάνει τη γεωμορφολογική περιγραφή της λεκάνης απορροής του Σπερχειού αλλά και συγκεκριμένα του τμήματος αυτής που επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στην εφαρμογή των μοντέλων στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Επίσης, γίνεται διερεύνηση των παραμέτρων των μοντέλων και περιγραφή της επίδρασης αυτών στα παραγόμενα αποτελέσματα. Επιπλέον στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μελέτη της επίδρασης της χωρικής κατανομής της βροχόπτωσης στα αποτελέσματα μέσω της εφαρμογής τεσσάρων πιθανών σεναρίων διαφορετικής βροχόπτωσης και τέλος εκτιμάται το πλημμυρογράφημα σχεδιασμού της λεκάνης απορροής για περίοδο επαναφοράς 50 ετών.

Το πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας αναφέρεται στα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη, στο σχολιασμό των αποτελεσμάτων και σε πιθανές προτάσεις για περαιτέρω μελλοντική εργασία πάνω στο θέμα.

Στα παραρτήματα της εργασίας περιλαμβάνονται οι χάρτες που δημιουργήθηκαν κατά τα στάδια της εργασίας και παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν και οι πίνακες με τις εντολές βήμα προς βήμα για την καλύτερη κατανόηση και επαναδημιουργία των μοντέλων.

ABSTRACT

Natural phenomena are very difficult to be accurately simulated, as our knowledge of the physical laws that govern these phenomena is not complete and the available data on the current situation are inadequate. Therefore, the models that are created for these processes are conceptual and their accuracy depends on the values of the parameters.

This thesis develops two distributed conceptual models in G.I.S. environment using the ArcGIS software.

The first model simulates the hydrological phenomena that take place during rainfall - runoff and calculates the required time for each section of the basin to be fully drained. The model can calculate the curves representing equal timing conditions for the runoff of each region, given the Digital Terrain Model, and produces the corresponding runoff hydrograph resulting from the synthetic unit hydrograph of the basin. The main objective of the model is to estimate the peak of the flood discharge and the corresponding time. This model was derived by modifying existing models of rainfall – runoff, introducing new techniques (new empirical formulas) and updating the whole process to make the results more accurate in the minimum possible time.

The second model provides estimates of the discharge at the outlet of the basin, taking as input the measured values of rainfall in specified measuring stations or a surface distribution of a given rainfall. The purpose of this model is the creation of the flood hydrographs for a basin with different conditions of rainfall (intensity, duration and spatial distribution).

These models were applied in the Sperhios river basin, upstream of the junction with Gorgopotamos river by varying numerous parameters. The models were used to investigate the spatial distribution of rainfall in the produced flood hydrograph of the basin by applying different rainfall conditions in the region and to estimate the design flood hydrograph with 50-year return period.

ABSTRACT

The first chapter of the thesis includes the theoretical background of the processes considered in the entire thesis and general information and definitions of the hydrological phenomena and basins.

The second chapter refers to the Geographical Information Systems (G.I.S.) with a brief reference to their relation with hydrology and the tools which they contain for the simulation of the hydrological phenomena. This section also includes a detailed step by step description of the methods used.

The third chapter includes the geomorphological description of the Sperhios river basin in general and the particular section chosen for this study. It includes the geometry and altitude characteristics, hydrological network, land cover and geology of the basin.

The fourth chapter addresses the application of these models in the specified study area, the description of the parameters used and the presentation of the obtained results. It includes an investigation of the parameters and a description of their effects on the output of the models. Furthermore, this chapter includes the study of the effect of spatial distribution of rainfall in the results through the implementation of four possible scenarios of different rainfall conditions and the design flood hydrograph with 50-year return period.

The fifth and final chapter of this thesis gives the conclusions of this study, discussion of the results and proposal for further research on this topic.

The appendices of this thesis include the maps created throughout the whole procedure, diagrams of the models used and tables with step by step instructions for rebuilding the models.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Γενικά

Το νερό μπορεί να θεωρηθεί ως φυσικός πόρος, ως οικονομικό αγαθό και ως περιβαλλοντικό στοιχείο, ανάλογα με το κύριο κριτήριο και το είδος της διαχείρισης στην οποία υπόκειται. Σε σχέση πάντως με άλλους φυσικούς πόρους και με άλλα οικονομικά αγαθά έχει μία ιδιαιτερότητα: είναι μοναδικό και αναντικατάστατο. Το νερό είναι ο πιο σημαντικός φυσικός πόρος για τον πλανήτη αλλά και για τον άνθρωπο, καθώς αυτό είναι απαραίτητο για την ύπαρξη της ζωής, τη διατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος και την κάλυψη των βασικών αναγκών του ανθρώπινου πληθυσμού. Επομένως, το νερό αποτελεί κλειδί για την ανάπτυξη όχι μόνο διότι τα έργα ύδρευσης και αποχέτευσης αποτελούν τα κύρια έργα υποδομής των ανθρώπινων κοινωνιών, αλλά επίσης διότι το νερό είναι το βασικό στοιχείο, για την παραγωγή τροφίμων (άρδευση) και αγαθών (βιομηχανία), για την παραγωγή, τη ρύθμιση και την αποθήκευση της ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές.

Οι υδατικοί πόροι αποτελούν βασικό αγαθό για τη ζωή και το περιβάλλον στον πλανήτη μας, αλλά και ρυθμιστικός παράγοντας της οικονομικής, τεχνολογικής, κοινωνικής και πολιτισμικής ανάπτυξης των χωρών. Το νερό μαζί με τον αέρα και το έδαφος αποτελούν τις κύριες πηγές απ' όπου ο άνθρωπος μπορεί να αντλήσει πόρους και αγαθά. Επίσης λόγω της υψίστης σημασίας του το νερό αποτελεί ζήτημα το οποίο απασχολεί την παγκόσμια κοινότητα καθώς είναι κύριος λόγος για προστριβές μεταξύ των χωρών και κύριο αίτιο ενός μελλοντικού πολέμου μεταξύ των χωρών που έχουν διασυννοριακά ποτάμια, λίμνες ή υπόγειους υδροφορείς (Μιμίκου και Φωτόπουλος, 2004)

Τα κύρια προβλήματα που δημιουργούνται από την ανισοκατανομή του νερού στον πλανήτη είναι οι πλημμύρες και οι ξηρασίες, τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν μέσω έργων και δράσεων με κύρια φιλοσοφία την προστασία του περιβάλλοντος, τη σωστή διαχείριση των φυσικών πόρων και των συστημάτων αλλά και την πρόληψη και αντιμετώπιση των κινδύνων. Οι πλημμύρες είναι ένα καταστρεπτικό φαινόμενο το οποίο θίγει τις παραποτάμιες - παρόχθιες περιοχές με εξαιρετικά δυσάρεστα

αποτελέσματα καθώς τίθενται σε κίνδυνο οι χρήσεις γης της περιοχής, οι ανθρωπογενείς δομημένες εκτάσεις αλλά και οι ζωές των ανθρώπων.

Η ορθή εκτίμηση και πρόβλεψη των υδατικών πόρων, ο κατάλληλος σχεδιασμός των υδραυλικών έργων και η ορθολογική διαχείριση του νερού είναι βασικό στοιχείο για την ανάπτυξη της κάθε χώρας. Οι αποφάσεις που λαμβάνονται συνήθως στα πλαίσια της διαχείρισης των υδατικών πόρων αφορούν μεγάλες λεκάνες απορροής. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η κατανόηση όλων των παραμέτρων που συμμετέχουν στις ευρύτερες διαδικασίες μιας λεκάνης απορροής.

Η Υδρολογία σύμφωνα με ένα γενικό ορισμό είναι η επιστήμη που ασχολείται με την παρουσία του νερού στη γη, με την κυκλοφορία του, τις φυσικές και χημικές ιδιότητές του και την αλληλεπίδρασή του με το περιβάλλον στο οποίο περιλαμβάνονται και τα έμβια όντα.

Ο υδρολογικός κύκλος αποτελεί τη σχηματική περιγραφή μιας σειράς διαδικασιών με τις οποίες το νερό κυκλοφορεί στη φύση. Οι απορροές αποτελούν το τμήμα του υδρολογικού κύκλου που έχει μεγαλύτερη σχέση με τις δραστηριότητες και τα έργα των ανθρώπων. Σε αυτές βασίζονται όλα τα έργα που γίνονται για τον έλεγχο, την αξιοποίηση και την προστασία των υδατικών πόρων καθώς και ένας μεγάλος αριθμός τεχνικών έργων στηρίζονται / υπολογίζονται με βάση τα μεγέθη της απορροής (Τσακίρης Γ., 1995). Η διαδικασία της βροχόπτωσης – απορροής είναι μια πολύπλοκη, δυναμική και μη γραμμική διεργασία η οποία επηρεάζεται από διάφορους και συνήθως μη συσχετιζόμενους φυσικούς παράγοντες. Το πως οι φυσικοί αυτοί παράγοντες αλλά και οι συνδυασμοί τους επηρεάζουν τη δημιουργία της απορροής είναι μια πολύπλοκη φυσική μέθοδος η οποία δεν είναι σαφώς κατανοητή.

Η τεχνολογία έχει προχωρήσει αρκετά και πλέον οι τεχνικές μοντελοποίησης μπορούν να παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα για την αναπαράσταση και τη λειτουργία των αλληλεπιδράσεων εντός της λεκάνης απορροής. Τα υδρολογικά μοντέλα έχουν ως στόχο να εκτιμήσουν ποσοτικά τις υδρολογικές μεταβλητές οι οποίες είναι πρακτικώς αδύνατο να μετρηθούν στο πεδίο. Συνεπώς, τα υδρολογικά μοντέλα εφαρμόζουν πολύπλοκες μαθηματικές σχέσεις και μετασχηματισμούς με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα πεδίου αλλά και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς. Τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να

περιγράψουν μεμονωμένα γεγονότα, όπως ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας. Η αναπαράσταση του γεγονότος γίνεται μέσω εμπειρικών, συνήθως, προσεγγίσεων (π.χ. ορθολογική μέθοδος, μοναδιαίο υδρογράφημα), στις οποίες αγνοούνται οι διεργασίες του υδρολογικού κύκλου που δεν ενδιαφέρουν τη συγκεκριμένη μελέτη, (π.χ. η εξάτμιση και η διήθηση). Επίσης, τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν τη διαχρονική εξέλιξη του ισοζυγίου των υδατικών πόρων μιας πεπερασμένης χωρικής ενότητας (π.χ. μιας λεκάνης απορροής), όπου η διαδικασία διέπεται εν μέρει από το φυσικό υπόβαθρο για την αποτύπωση του οποίου χρησιμοποιούνται εργαλεία προσομοίωσης, μέσω των οποίων αναπαρίστανται υπόψη οι κύριες, τουλάχιστον, διεργασίες που επηρεάζουν τον κύκλο του νερού. (Μαμάσης, 2009)

Μια μέτρια μέτρηση αξίζει πολύ περισσότερο από έναν καλό υπολογισμό. Η σημασία των μετρήσεων στην υδρολογία είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς η επιστήμη αυτή δεν μπορεί να εξάγει παγκόσμιους νόμους, κατά τα πρότυπα των νόμων της φυσικής, αλλά μπορεί να εξάγει εξισώσεις και σχέσεις περιορισμένης χωρο - χρονικής ισχύος. Η εξαγωγή και επαλήθευση αυτών των εξισώσεων και σχέσεων δεν είναι δυνατή παρά μόνο όταν υπάρχουν αξιόπιστες μετρήσεις των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου.

Τα εννοιολογικά μοντέλα (conceptual models) δεν διατυπώνουν τους φυσικούς νόμους αλλά παραμετρικές σχέσεις σε υδραυλικά ανάλογα τα οποία αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες στην ελάχιστη χωρική ενότητα που υποστηρίζεται από την σχηματοποίηση (λεκάνη, υπολεκάνη). Το πλεονέκτημα των εννοιολογικών σχημάτων είναι η απλότητά τους, που επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών με έντονη χωρική ανομοιογένεια, μέσω ενός μικρού αριθμού παραμέτρων. Οι εν λόγω παράμετροι, αν και δεν έχουν πλήρη φυσική ερμηνεία, μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές των «μακροσκοπικών» χαρακτηριστικών της χωρικής ενότητας. Τα εννοιολογικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί σε διάφορες χρονικές διακριτότητες και διάφορους βαθμούς πολυπλοκότητας. Αρκετοί ερευνητές εκφράζουν έντονο σκεπτικισμό ως προς τη δυνατότητα γενίκευσης των σημειακών φυσικών νόμων, που ισχύουν στην απειροστή κλίμακα (δηλαδή σε έναν πεπερασμένο όγκο αναφοράς), για την προσομοίωση χωρικά κατανεμημένων διεργασιών, έστω και σε μια σχετικά μικρή επιφάνεια. Έτσι, θεωρούν ότι ακόμη και τα κατανεμημένα σχήματα είναι στην πραγματικότητα εννοιολογικά, όχι όμως σε

κλίμακα λεκάνης ή υπολεκάνης αλλά στη μονάδα χωρικής διακριτότητας που αναφέρεται η σχηματοποίηση του μοντέλου, στην οποία το σύστημα θεωρείται ομοιογενές και ισότροπο. (Ευστρατιάδης, 2008)

Η μοντελοποίηση και πρόβλεψη των πλημμυρικών φαινομένων και των συνεπειών τους απαιτεί την ύπαρξη εκτενών χωρικών πληροφοριών για τις λεκάνες απορροής αλλά και για τις περιοχές υψηλού πλημμυρικού κινδύνου. Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.) αλλά και η Τηλεπισκόπηση προσφέρουν πολύτιμα εργαλεία για την απόκτηση των απαιτούμενων δεδομένων. Η χρήση των Σ.Γ.Π. διευκολύνει και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για τη βελτίωση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων.

Η χρήση της Τηλεπισκόπησης μπορεί να παρέχει μετρήσεις για πολλές από τις υδρολογικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές υδρολογικών μοντέλων. Ένα από τα σημαντικότερα δεδομένα των υδρολογικών εφαρμογών είναι το ανάγλυφο, όπου η δορυφορική τηλεπισκόπηση είναι η καλύτερη πηγή χαρτογράφησης και δημιουργίας του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM). Η τηλεπισκόπηση σήμερα μέσω της χρήσης του θερμικού υπέρυθρου φάσματος και των μικροκυμάτων μπορεί και ανιχνεύει θερμοκρασίες και εδαφικές υγρασίες τα οποία είναι πολύ σημαντικά δεδομένα για τις υδρολογικές διαδικασίες και συνεπώς οι πληροφορίες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα από τα Σ.Γ.Π. και να παραχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα.

Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν σημαντικά κατανεμημένα υδρολογικά μοντέλα¹ που εκμεταλλεύονται την χωρική κατανομή των δεδομένων. Τα κατανεμημένα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να συνδυάσουν πληροφορίες για τη χωρική μεταβλητότητα της τοπολογίας, των χρήσεων γης, της γεωλογίας και οποιωνδήποτε άλλων παραμέτρων περιλαμβάνει ένα μοντέλο. Το μεγάλο μειονέκτημα των κατανεμημένων μοντέλων, στην προ των ηλεκτρονικών υπολογιστών εποχή, ήταν ο μεγάλος όγκος υπολογισμών που έπρεπε να γίνουν με το χέρι. Το πρόβλημα αυτό λύθηκε με την είσοδο του ηλεκτρονικού υπολογιστή στην υπηρεσία των επιστημόνων

¹ Στα κατανεμημένα υδρολογικά μοντέλα γίνεται κατάτμηση του φυσικού συστήματος σε χωρικές ενότητες μικρής κλίμακας (κύτταρα), που προκύπτουν είτε από την εφαρμογή ενός ορθογωνικού κανάβου δεδομένης ισοδιάστασης είτε έχουν ακανόνιστο γεωμετρικό σχήμα. Σε κάθε περίπτωση, η χωρική διαμέριση δεν έχει γεωγραφικό ή φυσικό νόημα, και τα κύτταρα αντιπροσωπεύουν ομοιογενή και ισότροπα εδαφικά τμήματα, στα οποία αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων

και των μηχανικών. Το αμέσως επόμενο πρόβλημα που προέκυψε ήταν η διαχείριση του μεγάλου όγκου των δεδομένων και των υπολογισμών από ένα κατάλληλο λογισμικό. Ως συνέπεια, πραγματοποιήθηκε στροφή των υδρολόγων προς τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π. - G.I.S.)

Το βασικό πλεονέκτημα των Σ.Γ.Π. είναι η οργάνωση και επεξεργασία των δεδομένων με τοπολογικές σχέσεις αναφορικά με τον γεωγραφικό χώρο. Τα Σ.Γ.Π. μπορούν να διαχειριστούν τον μεγάλο όγκο δεδομένων και επεξεργασιών που απαιτούν τα κατανεμημένα υδρολογικά μοντέλα. Επίσης, με την ραγδαία ανάπτυξη της υπολογιστικής δύναμης των υπολογιστών, δόθηκε η δυνατότητα ανάπτυξης περισσότερο πολύπλοκων και αναλυτικών υδρολογικών μοντέλων, τα οποία εκτελούνται κατά κύριο λόγο μέσα στο περιβάλλον ενός Σ.Γ.Π.

Σκοπός – Αντικείμενο εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία, με χρήση του λογισμικού ArcGIS, δύο μοντέλων τα οποία αναπαριστούν κάποιες φυσικές υδρολογικές διεργασίες. Το πρώτο κατανεμημένο εννοιολογικό μοντέλο βροχής - απορροής, προσομοιώνει μεμονωμένα υδρολογικά γεγονότα, και μπορεί να παράγει υδρογραφήματα. Το μοντέλο αυτό είναι προσδιοριστικό διότι δεν εισάγεται στην διαδικασία η στοχαστικότητα των μεταβλητών που χρησιμοποιεί. Κύριος στόχος του μοντέλου αυτού είναι η εκτίμηση της πλημμυρικής αιχμής και κατά δεύτερο λόγο η εκτίμηση του χρόνου απορροής της λεκάνης απορροής. Αναλυτικότερα, το μοντέλο προσδιορίζει το ιστόγραμμα χρόνου – επιφάνειας της λεκάνης απορροής, από το οποίο προκύπτει ένα συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης.

Το δεύτερο υδρολογικό μοντέλο που δημιουργήθηκε, υπολογίζει την παραγόμενη παροχή του ποταμού στην έξοδο της λεκάνης για διαφορετικές επιφανειακές βροχοπτώσεις. Κύριοι στόχοι του μοντέλου είναι η δημιουργία του τελικού πλημμυρογραφήματος, το οποίο προκύπτει από μια συγκεκριμένη βροχόπτωση στη λεκάνη απορροής, και η διερεύνηση της επίδρασης της χωρικής μεταβλητότητας της βροχόπτωσης στο παραγόμενο πλημμυρογράφημα.

Η συμβολή της δημιουργίας τέτοιων μοντέλων είναι σημαντική, καθώς μοντελοποιούνται και αναπαριστούνται οι διαδικασίες της υδρολογικής ανάλυσης,

έτσι ώστε αυτές να μπορούν να διενεργούνται ταχύτατα και σε άλλες υδρολογικές λεκάνες αλλά και από μη πεπειραμένους χρήστες του λογισμικού αυτού. Τα μοντέλα αυτά δημιουργήθηκαν με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να είναι δυνατή η χρήση τους και σε άλλες λεκάνες απορροής χωρίς να είναι απαραίτητη η γνώση των υδρολογικών δεδομένων. Τα μοντέλα αυτά λειτουργούν σε περιβάλλον Σ.Γ.Π. χωρίς να απαιτείται σημαντική προεπεξεργασία των δεδομένων και χωρίς να περιλαμβάνουν πολύπλοκες μακροεντολές που αυξάνουν το χρόνο εκτέλεσής τους.

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου που προσομοιώνει τη φύση, χωρίς πλήρη γνώση της υφιστάμενης κατάστασης, είναι ένα αρκετά δύσκολο εγχείρημα με αμφίβολα αποτελέσματα. Τα διαθέσιμα δεδομένα της υφιστάμενης κατάστασης είναι ελάχιστα έως ανεπαρκή. Για το λόγο αυτό στην παρούσα διπλωματική εργασία τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν είναι εννοιολογικά, δηλαδή βασίζονται στην επιλογή παραμέτρων από το χρήστη. Η ακρίβεια των μοντέλων στηρίζεται στην ακρίβεια της ρύθμισης των παραμέτρων και στη σωστή επιλογή των τιμών τους με βάση μετρημένα στοιχεία ή εμπειρικές γνώσεις. Το πλεονέκτημα των εννοιολογικών μοντέλων είναι η απλότητά τους, η οποία επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών με έντονη χωρική ανομοιογένεια μέσω ενός μικρού αριθμού παραμέτρων.

Στην εργασία αυτή αναφέρεται αρχικά το θεωρητικό υπόβαθρο των υδρολογικών διεργασιών αλλά και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται από τα εννοιολογικά μοντέλα για να γίνει αναπαράσταση της πραγματικότητας. Επίσης γίνεται μια περιληπτική αναφορά στα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών και στη σχέση τους με την υδρολογία και περιγράφονται αναλυτικά και βήμα προς βήμα τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν στο λογισμικό ArcGIS. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η περιοχή μελέτης και περιγράφεται η διαδικασία εφαρμογής των μοντέλων. Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν και γίνεται εφαρμογή των μοντέλων σε τέσσερα πιθανά σενάρια διαφορετικής κατανομής της βροχόπτωσης. Στο τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα μέσω των μεθοδολογιών που εφαρμόστηκαν και παρουσιάζονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1.1 Γενικά Στοιχεία - Ορισμοί

Η Υδρολογία σύμφωνα με έναν γενικό ορισμό είναι επιστήμη που ασχολείται με την παρουσία του νερού στη γη, την κυκλοφορία του, τις φυσικές και χημικές ιδιότητές του και την αλληλεπίδρασή του με το περιβάλλον. Αντικείμενο της υδρολογίας είναι η ανάλυση και εξαγωγή συμπερασμάτων και νόμων για τις διάφορες διαδικασίες του υδρολογικού κύκλου και ιδιαίτερα για τη χωροχρονική εξέλιξη των υδρολογικών φαινομένων (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Υδρολογική λεκάνη (watershed, catchment, drainage basin) σ' ένα σημείο ή καλύτερα σε μία διατομή ενός υδατορεύματος ορίζεται ως η συνολική τοπογραφική επιφάνεια, τα νερά οποίας συνεισφέρουν στην απορροή που περνάει από τη συγκεκριμένη διατομή (Dingman, 1994 και Wilson, 1990). Έτσι, όλες οι απορροές που δημιουργούνται στο εσωτερικό της επιφάνειας ακολουθώντας την πορεία τους προς τα κατόντη οφείλουν να διέλθουν μέσω της διατομής. Η υδρολογική λεκάνη αποτελεί το φυσικό υποδοχέα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και δρα με όλα τα μορφολογικά, εδαφικά και λοιπά χαρακτηριστικά της σαν ένα σύστημα μετασχηματισμού της βροχής σε απορροή σε ένα συγκεκριμένο σημείο (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999)

Υδρογραφικό δίκτυο μιας περιοχής θεωρείται το σύστημα των ρυακιών, χειμάρρων και παραποτάμων, τα οποία αποστραγγίζουν την περιοχή.

Υδροκρίτης μπορεί να οριστεί η νοητή γραμμή που συνδέει τα υψηλότερα σημεία της επιφάνειας και διαχωρίζει δύο υδρολογικές λεκάνες απορροής. Ο υδροκρίτης διέρχεται από τις κορυφές των τοπικών τοπογραφικών εξάρσεων που περικλείουν τον κλάδο ή τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου της υπό οριοθέτηση λεκάνης απορροής. Ο υδροκρίτης τέμνει σχεδόν κάθετα τις ισούψεις καμπύλες και δεν κινείται ποτέ παράλληλα προς αυτές. Ο υδροκρίτης δεν τέμνει ποτέ τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου. Θα πρέπει να σημειωθεί πως ο υδροκρίτης των

επιφανειακών νερών, πολλές φορές δεν συμπίπτει με τον υδροκρίτη των υπόγειων νερών, ο οποίος καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωλογική δομή μιας περιοχής και όχι αποκλειστικά από τη μορφή του τοπογραφικού ανάγλυφου.

Απορροή² χαρακτηρίζεται το μέρος των βροχοπτώσεων, το οποίο εμφανίζεται εντός των επιφανειακών παροδικών ή μόνιμων ρευμάτων και είναι δυνατό να διαχωριστεί στην επιφανειακή απορροή και στην υπόγεια απορροή. Η επιφανειακή απορροή δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα ως φυσικό μέγεθος. Μπορεί όμως να υπολογιστεί έμμεσα μέσω της υδρομετρίας.

Η επιφανειακή απορροή είναι η ροή του νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας, κατά μήκος των φυσικών υδατορευμάτων (βλ. Ward και Robinson, 1989; Mosley και McKerchar, 1993), δηλαδή το μέρος της βροχόπτωσης το οποίο ρέει αρχικά πάνω στην επιφάνεια του εδάφους και στη συνέχεια, μέσω του υδρογραφικού συστήματος, καταλήγει στην έξοδο της λεκάνης απορροής.

Η υπόγεια απορροή ορίζεται ως η ποσότητα του υπόγειου νερού, που διέρχεται από το σημείο μέτρησης των απορροών. Το νερό που κατέρχεται προς τα κατώτερα εδαφικά στρώματα φτάνει στη ζώνη όπου το έδαφος βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού και δημιουργεί τους υπόγειους υδροφορείς. Όταν η διήθηση και η πλευρική κίνηση συμβαίνει σε μικρό σχετικά βάθος, τότε η απορροή χαρακτηρίζεται ειδικότερα ως υπεδάφιος.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απορροή είναι κυρίως:

A) Οι κλιματικοί: οι οποίοι περιλαμβάνουν τις βροχοπτώσεις (μορφή, ένταση, διάρκεια, κατανομή κ.λ.π.), το είδος της βλάστησης, την πυκνότητα κάλυψης, την εποχή του έτους, την ένταση της βροχής, την ταχύτητα του ανέμου και τέλος την εξατμισοδιαπνοή και

B) Οι φυσιογραφικοί: οι οποίοι περιλαμβάνουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (σχήμα, μέγεθος, κλίση, υδρογραφική πυκνότητα κ.ά.), τα φυσικά χαρακτηριστικά της (γεωλογία, φυτοκάλυψη κ.ά.) και τα χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου (διατομή, κλίση, μήκος κ.ά.)

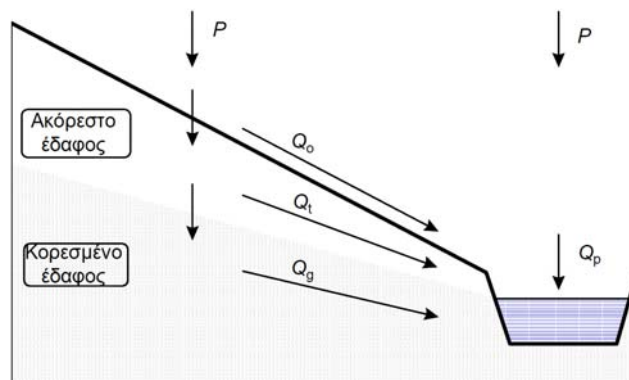
² Συχνά ο όρος απορροή χρησιμοποιείται ως ισοδύναμος του όρου επιφανειακή απορροή. Στην αγγλική βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται οι όροι stream flow και runoff κατά κανόνα ως ισοδύναμοι μεταξύ τους (βλ. Ward και Robinson, 1989)

Η απορροή στα υδατορεύματα συνήθως εκφράζεται σε μονάδες παροχής, δηλαδή σε όγκο ανά μονάδα χρόνου (m^3/sec) ή (m^3/h). Επίσης, προκειμένου να συγκριθεί με το ύψος της βροχόπτωσης από την οποία προέρχεται, μπορεί να εκφραστεί με το ισοδύναμο ύψος νερού (συνήθως σε mm), το οποίο μπορεί να καλύψει επιφάνεια ίση με την έκταση της λεκάνης απορροής. Στην περίπτωση αυτή ο λόγος του ύψους της απορροής προς το ύψος της βροχόπτωσης, καλείται συντελεστής απορροής.

$$c = \frac{h_{απορ}}{P} \quad (1.1)$$

Η μέτρηση της απορροής (Q) στα υδατορεύματα επιτυγχάνεται με τη μέτρηση της υγρής διατομής (A) αυτών και της μέσης ταχύτητας ροής (v) και παρέχεται από τη σχέση:

$$Q = A \times V \quad (1.2)$$



Σχήμα 1-1: Σχηματικό διάγραμμα των διαφορετικών προελεύσεων της απορροής
(πηγή: Κουτσογιάννης, και Ξανθόπουλος, 1999)

1.2 Χαρακτηριστικά Λεκάνης Απορροής

Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά μιας λεκάνης απορροής καθώς και τα χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου επηρεάζουν σημαντικά τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτή όπως είναι η δημιουργία της απορροής από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, η διάβρωση του εδάφους, η στερεομεταφορά των υδατορευμάτων κ.λ.π. (Strahler, 1957). Η κατανόηση της γεωμορφολογίας της λεκάνης, εκτός από τη μελέτη των διεργασιών του παρόντος, διευκολύνει και την

πρόβλεψη των μελλοντικών διεργασιών καθώς και εκείνων που έλαβαν χώρα στο παρελθόν. Μια τέτοια σχέση μπορεί να διατυπωθεί παραμετρικά, στοχαστικά ή και με πειραματικές μετρήσεις (Gregory και Walling, 1983).

Το μέγεθος της λεκάνης απορροής έχει σημασία αφού επηρεάζει γενικά τόσο τη συνολική απορροή (water yield) στην έξοδο της, όσο και το χρόνο συγκέντρωσής της απορροής και κατά συνέπεια το σχήμα του υδρογραφήματος. Επίσης, το μέγεθος της λεκάνης επηρεάζει όλα τα άλλα χαρακτηριστικά αυτής. Συγκεκριμένα, η κλίση της λεκάνης αυξάνεται όσο μειώνεται το μέγεθος αυτής, ενώ η ειδική παροχή ($m^3/s/km^2$) μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους της λεκάνης (Τσακίρης και Μπαλούτσος, 1995).

Το σχήμα της λεκάνης απορροής επηρεάζει το χρόνο συγκέντρωσης³ της απορροής και επομένως το μέγεθος της παροχής που παρατηρείται στο στόμιο της λεκάνης (Gregory και Walling, 1983, Garg, 1987). Συγκεκριμένα, επιμήκεις λεκάνες απορροής έχουν μεγαλύτερο χρόνο συγκέντρωσης από κυκλικές και συνεπώς, κάτω από τις ίδιες συνθήκες, οι πρώτες εμφανίζουν μικρότερες παροχές.

Το υψόμετρο της λεκάνης απορροής έχει άμεση σχέση τόσο με τα κατακρημνίσματα που δέχεται όσο και με τις θερμοκρασίες που επικρατούν σ' αυτήν. Συγκεκριμένα, τα κατακρημνίσματα αυξάνουν ανάλογα με το υψόμετρο και συνεπώς λεκάνες με μεγαλύτερα υψόμετρα θα δέχονται περισσότερες βροχοπτώσεις. Έχει παρατηρηθεί ότι αυτό ισχύει μέχρι το υψόμετρο των 2,5 km άνω του οποίου παρατηρείται ελάττωση (Τσακίρης και Μπαλούτσος, 1995). Αντίθετα η θερμοκρασία μειώνεται με την αύξηση του υψόμετρου και συνεπώς σε μεγαλύτερα υψόμετρα της λεκάνης απορροής παρατηρείται μείωση της εξάτμισης και συνεπώς αύξηση της απορροής.

Τέλος, το ανάγλυφο της λεκάνης απορροής και οι κλίσεις των διαφόρων επιφανειών της επηρεάζουν σημαντικά τις διεργασίες βροχής-απορροής. Πιο συγκεκριμένα, λεκάνες με ομαλό ανάγλυφο και μεγάλες κλίσεις έχουν μικρότερο χρόνο συγκέντρωσης και συνεπώς τα υδρογραφήματα⁴ των λεκανών αυτών

³ Χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης (Concentration time), ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται το νερό να διανύσει την απόσταση από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης (υδρολογικά), ακολουθώντας το υδρογραφικό δίκτυο, ως την έξοδο.

⁴ Υδρογράφημα είναι το διάγραμμα της παροχής συναρτήσει του χρόνου σε ένα συγκεκριμένο σημείο της κοίτης ενός υδατορεύματος [$Q=Q(t)$].

χαρακτηρίζονται από μικρή χρονική βάση και απότομες εναλλαγές των καμπυλών ανόδου και καθόδου καθώς και υψηλές πλημμυρικές αιχμές.

1.3 Υδρογραφικό Δίκτυο Λεκάνης Απορροής

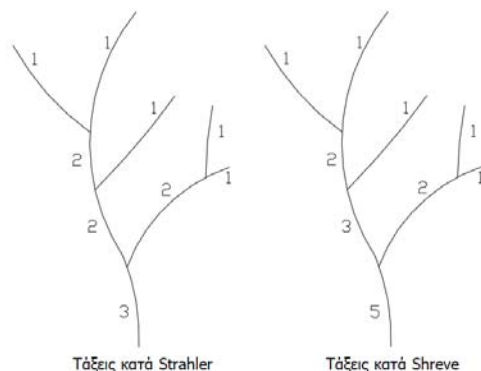
Η μελέτη μιας λεκάνης απορροής παραπέμπει άμεσα στη μελέτη του υδρογραφικού δικτύου της, δεδομένου ότι η υδρολογική απόκριση της λεκάνης καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά αυτού. Οι διάφοροι κλάδοι του δικτύου διακρίνονται σε τάξεις. Η διαίρεση των κλάδων σε τάξεις επιβλήθηκε από την ανάγκη διαίρεσης της λεκάνης σε αντίστοιχες τάξεις, αναλόγως του μεγέθους αυτής (Gregory και Walling, 1983). Η ταξινόμηση των κλάδων βασίζεται στη διαφορά μεγέθους αυτών όσο και στη θέση κάθε κλάδου ως προς τους υπόλοιπους.

Διάφοροι ερευνητές όπως ο Horton, ο Schreidigger, ο Strahler και ο Shreve πρότειναν τις παρακάτω μεθόδους αρίθμησης των κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου:

- Αρίθμηση κατά Strahler: κάθε κλάδος που δεν δέχεται νερά άλλων μικρότερων ρευμάτων ονομάζεται κλάδος 1ης τάξης. Ο κλάδος που προκύπτει από τη σύνδεση δύο κλάδων 1ης τάξης ονομάζεται κλάδος 2ης τάξης. Ο κλάδος που προκύπτει από τη σύνδεση δύο κλάδων 2ης τάξης ονομάζεται 3ης τάξης κ.ο.κ. Στην περίπτωση που συνδέονται δύο κλάδοι διαφορετικής τάξης, ο νέος κλάδος που προκύπτει εξακολουθεί να έχει την αρίθμηση της μεγαλύτερης τάξης του ενός από τους δύο συνδεόμενους κλάδους.
- Αρίθμηση κατά Horton: οι κλάδοι ενός υδρογραφικού δικτύου, οι οποίοι δεν δέχονται τα νερά κανενός μικρότερου κλάδου, αλλά τα επιφανειακά νερά μιας μικρής λεκάνης, ονομάζονται κλάδοι 1ης τάξης. Κλάδοι που δέχονται τα νερά κλάδων 1ης τάξης ονομάζονται κλάδοι 2ης τάξης, κ.ο.κ. Η αρίθμηση ενός κλάδου ισχύει από την αρχή του μέχρι το τέλος του, έτσι οι μεγαλύτεροι σε μήκος κλάδοι είναι και μεγαλύτερης τάξης.
- Αρίθμηση κατά Shreve: δεν γίνεται αναφορά στην τάξη των κλάδων, αλλά στο μέγεθος σύνδεσής τους. Συγκεκριμένα, κάθε εξωτερικός κλάδος έχει μέγεθος

1, ενώ αν συνδέονται κλάδοι μεγεθών μ_1 και μ_2 , τότε ο κλάδος που προκύπτει έχει μέγεθος $\mu_1 + \mu_2$.

Από τις τρεις παραπάνω μεθόδους αρίθμησης των υδρογραφικών δικτύων, η μέθοδος του Strahler (1957, 1964) θεωρείται η πλέον ορθόδοξη, ικανή να ερμηνεύσει τους νόμους της υδρογραφικής σύνθεσης, όπως αυτοί διατυπώθηκαν πρώτα από τον Horton (1945).



Σχήμα 1-2: Τρόπος κατάταξης των υδατορευμάτων κατά Strahler και κατά Shreve

Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής 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 (Gregory και Walling, 1983; Dunne και Leopold, 1978). Επιπλέον, η μεγάλη πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου συνδέεται με επιφάνειες μεγάλων κλίσεων της λεκάνης.

1.4 Πλημμύρες

Πλημμύρα είναι το γεγονός κατά το οποίο η άμεση απορροή (επιφανειακή και ταχεία υπεδάφια) είναι τόσο σημαντική ώστε η συνολική παροχή υπερβαίνει τη διοχετευτική ικανότητα του υδατορεύματος και κατακλύζει τις γύρω περιοχές προκαλώντας δυσμενείς συνέπειες. Πρόκειται για φυσικό φαινόμενο (αφού συνήθως προέρχεται από μετεωρολογικές καταστάσεις), όμως, συμβαίνει όταν η χωρητικότητα του

συστήματος αποστράγγισης (φυσικού ή ανθρωπογενούς) δεν μπορεί να διοχετεύσει τον όγκο νερού που παράγεται από τη βροχόπτωση (Μαμάσης, 2009)

Οι πλημμυρικές απορροές αποτελούν το άμεσο επακόλουθο των έντονων βροχοπτώσεων, χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλή ένταση και η διάρκειά τους κυμαίνεται συνήθως από μερικές ώρες έως μερικές ημέρες. Οι πλημμυρικές απορροές έχουν εξαιρετική σημασία για την οικονομική και κοινωνική ζωή μιας περιοχής. Είναι γνωστό ότι οι πλημμύρες επιφέρουν τεράστιες οικονομικές ζημιές σε γεωργικές καλλιέργειες και σε οικίες που βρίσκονται κοντά στις κοίτες χειμάρρων, ενώ συχνά προκαλούν και απώλειες ανθρώπινων ζωών. Η γνώση των πλημμυρικών απορροών αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση τόσο στο σχεδιασμό, όσο και στη λήψη προστατευτικών μέτρων σε υδραυλικά έργα (αρδευτικά, υδρευτικά, υδροηλεκτρικά φράγματα και λιμνοδεξαμενές).

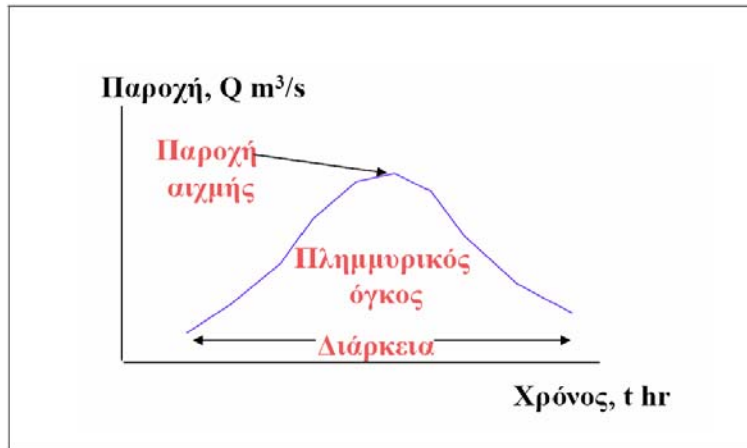
Οι πλημμυρικές απορροές υπολογίζονται με την κατασκευή του υδρογραφήματος ενός ποταμού. Υδρογράφημα πλημμυρικής απορροής είναι το διάγραμμα της παροχής συναρτήσεως του χρόνου που αφορά ένα πλημμυρικό γεγονός. Για την κατασκευή του υδρογραφήματος ενός χειμάρρου απαιτούνται συστηματικές μετρήσεις της απορροής ανά τακτά και μικρά διαστήματα. Αυτές μπορούν να επιτευχθούν μόνο με αυτόματες καταγραφές της στάθμης, με χρήση κατάλληλων αυτογραφικών οργάνων (σταθμηγράφοι).

Ο υδραυλικός σχεδιασμός ενός αντιπλημμυρικού έργου γίνεται με βάση την εκτίμηση μιας πλημμύρας η οποία ονομάζεται πλημμύρα σχεδιασμού. Η έννοια της πλημμύρας σχεδιασμού είναι ότι το έργο σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να παραμένει ασφαλές και λειτουργικό για πλημμύρες μικρότερες ή ίσες της πλημμύρας σχεδιασμού.

Τα τρία κύρια μεγέθη μιας πλημμύρας είναι:

- Η παροχή αιχμής και η αντίστοιχη στάθμη στο υδατόρευμα
- Ο πλημμυρικός όγκος
- Η χρονική διάρκεια

Τα μεγέθη των πλημμυρών συνδέονται με τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης (συνολικό ύψος, ένταση, διάρκεια), της λεκάνης απορροής (έκταση, συντελεστή απορροής, χρόνο συρροής) και των υδατορευμάτων (διατομή, κλίση, τραχύτητα) (Μαμάσης, 2009).



Σχήμα 1-3: Υδρογράφημα πλημμυρικής απορροής

Το υδρογράφημα πλημμυρικής απορροής χαρακτηρίζεται από το ανιόν σκέλος, την κορυφή και το κατιόν σκέλος. Το πλάτος της βάσης του σε μονάδες χρόνου αποτελεί τη χρονική βάση του υδρογραφήματος, η οποία ισούται με το άθροισμα του χρόνου συγκεντρώσεως της λεκάνης απορροής συν τη διάρκεια της βροχόπτωσης. Όταν ξεκινήσει η ραγδαία βροχή, η απορροή αυξάνει δημιουργώντας τον ανιόντα κλάδο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-3. Η παροχή αιχμής εμφανίζεται μετά το τέλος της βροχής και ακολουθεί ο κατιών κλάδος. Το κυριότερο χαρακτηριστικό της πλημμύρας είναι η τιμή της πλημμυρικής αιχμής. Με βάση αυτήν την τιμή γίνεται ο υδραυλικός σχεδιασμός των αντιπλημμυρικών έργων.

Σημαντικό μέγεθος είναι και ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης (Concentration time), ο οποίος ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται το νερό να διανύσει την απόσταση από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης (υδρολογικά), ακολουθώντας το υδρογραφικό δίκτυο, ως την έξοδο. Υπό κάποιες αδρομερείς παραδοχές ο χρόνος συγκέντρωσης συμπίπτει με το χρόνο εμφάνισης της αιχμής του πλημμυρικού υδρογραφήματος με αφετηρία την έναρξη του γεγονότος της ραγδαίας βροχής (Κουτσογιάννης, 1999)

Οι πλημμύρες στην Ελλάδα οφείλονται συνήθως στις έντονες βροχοπτώσεις. Οι περισσότερες έντονες βροχοπτώσεις παράγονται από το πέρασμα χαμηλών βαρομετρικών, τα οποία συνήθως συνοδεύονται από ψυχρά μέτωπα (και πιο σπάνια από θερμά) και καταφθάνουν από τα δυτικά, νοτιοδυτικά ή βορειοδυτικά. Η μείωση των δασικών εκτάσεων και η αστικοποίηση παίζουν επίσης πολύ σημαντικό ρόλο στη εμφάνιση πλημμυρών, διότι αυξάνουν την πλημμυρική απορροή και μειώνουν τον χρόνο συγκέντρωσης. Οι δύο αυτοί παράγοντες, επομένως, είναι υπεύθυνοι για την αυξανόμενη σοβαρότητα και καταστροφική δύναμη των πλημμυρικών γεγονότων. Η αποδάσωση και η διάβρωση του εδάφους, που αυτή συνεπάγεται, είναι ένα σοβαρότατο πρόβλημα στην Ελλάδα.

1.5 Μοναδιαίο Υδρογράφημα

Υδρογράφημα θεωρείται γενικά η γραφική παράσταση της απορροής σε μια διατομή ενός ρεύματος ως συνάρτηση του χρόνου. Το υδρογράφημα αποτελεί μία ολοκληρωμένη έκφραση των φυσιογραφικών και κλιματικών παραγόντων, οι οποίοι επιδρούν και καθορίζουν τη σχέση μεταξύ βροχόπτωσης και απορροής σε μία υδρολογική λεκάνη.

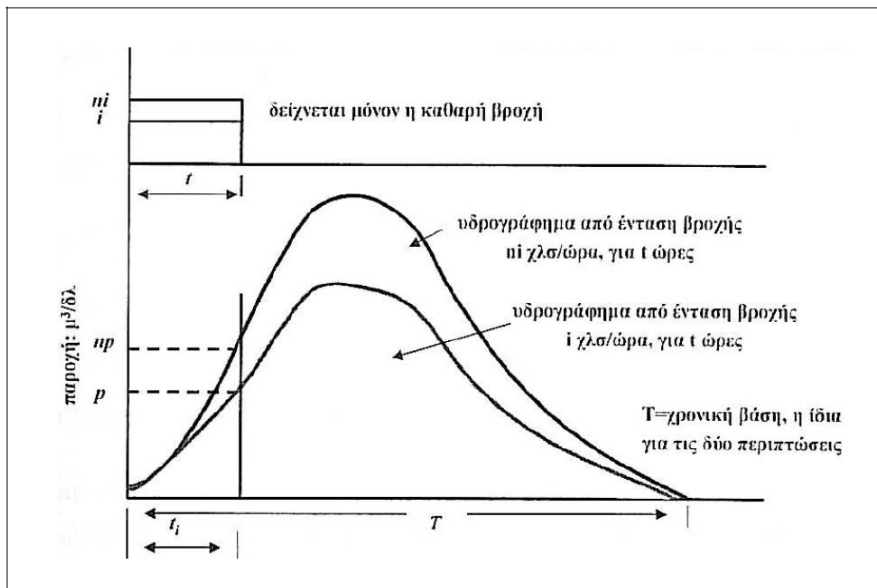
Η αρχή του μοναδιαίου υδρογραφήματος πρωτοπαρουσιάστηκε από τον Sherman το 1932, ο οποίος το όρισε ως εξής: Μοναδιαίο υδρογράφημα είναι το υδρογράφημα που προκαλείται από ενεργό βροχή⁵ ύψους ίσου με τη μονάδα (στο μετρικό σύστημα ίσου με ένα cm), η οποία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σ' όλη την έκτασή της υδρολογική λεκάνης κι έχει ομοιόμορφη ένταση.

Το Μοναδιαίο Υδρογράφημα (ΜΥΓ) είναι ουσιαστικά ένα μοντέλο που περικλείει όλα τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (σχήμα, μέγεθος, κλίση, έδαφος) και αναφέρεται στη συγκεκριμένη διάρκεια της ενεργού βροχόπτωσης που το προκάλεσε (τύπος, ένταση, διάρκεια). Δηλαδή για κάθε διάρκεια ενεργού βροχόπτωσης υπάρχει και ένα διαφορετικό μοναδιαίο υδρογράφημα το οποίο αποτελεί τη βάση (τη μονάδα)

⁵ Το ποσό της βροχής που αποτελεί την άμεση απορροή, ονομάζεται συνήθως περίσσειμα βροχής (rainfall excess) ή ενεργός βροχόπτωση (effective rainfall). Το ποσό αυτό της βροχής αποτελείται κυρίως από την επιφανειακή απορροή και από την υπεδάφια απορροή. Το υπόλοιπο ποσό της βροχής που αναφέρεται στη συγκράτηση από τη φυτοκάλυψη, στην εξατμισοδιαπνοή και στη βαθιά διήθηση αναφέρεται με τον όρο απώλειες βροχής (rainfall losses) (Μπέλλος, 2006)

για τον υπολογισμό του υδρογραφήματος άμεσης απορροής από οποιοδήποτε ύψος περισσεύματος βροχής της ίδιας διάρκειας (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2002). Η μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος στηρίζεται στις Αρχές της «Αναλογίας» και της «Επαλληλίας».

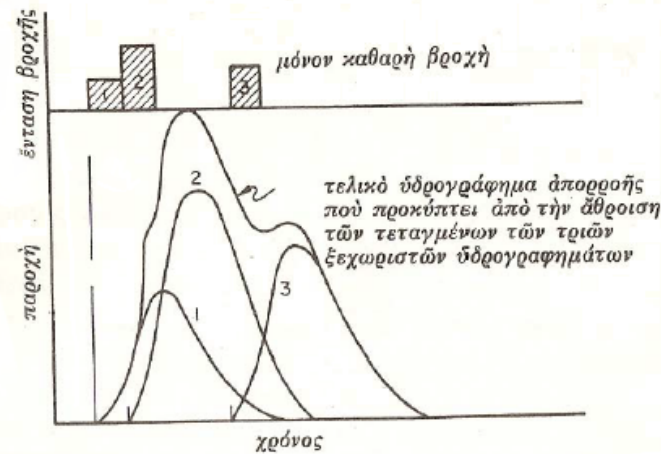
Σύμφωνα με την «Αρχή της Αναλογίας» δύο ενεργές βροχές, της ίδιας χρονικής διάρκειας αλλά με διαφορετικές εντάσεις, δημιουργούν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με την ίδια χρονική βάση αλλά με τεταγμένες σε κάθε χρονική στιγμή οι οποίες έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με το λόγο των εντάσεων (Σχήμα 1-4).



Σχήμα 1-4: Η «Αρχή της Αναλογίας» του μοναδιαίου υδρογραφήματος.

(πηγή: Μιμίκου και Μπαλτάς, 2002)

Η «Αρχή της Επαλληλίας» θεωρεί ότι το συνολικό υδρογράφημα άμεσης απορροής που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων. Η χρονική αρχή των επιμέρους υδρογραφημάτων που αθροίζονται, ταυτίζεται με την αρχή των αντιστοίχων επεισοδίων ενεργού βροχόπτωσης (Σχήμα 1-5).



Σχήμα 1-5: Η «Αρχή της Επαλληλίας» του μοναδιαίου υδρογραφήματος
(πηγή: Λέκκας, 2006)

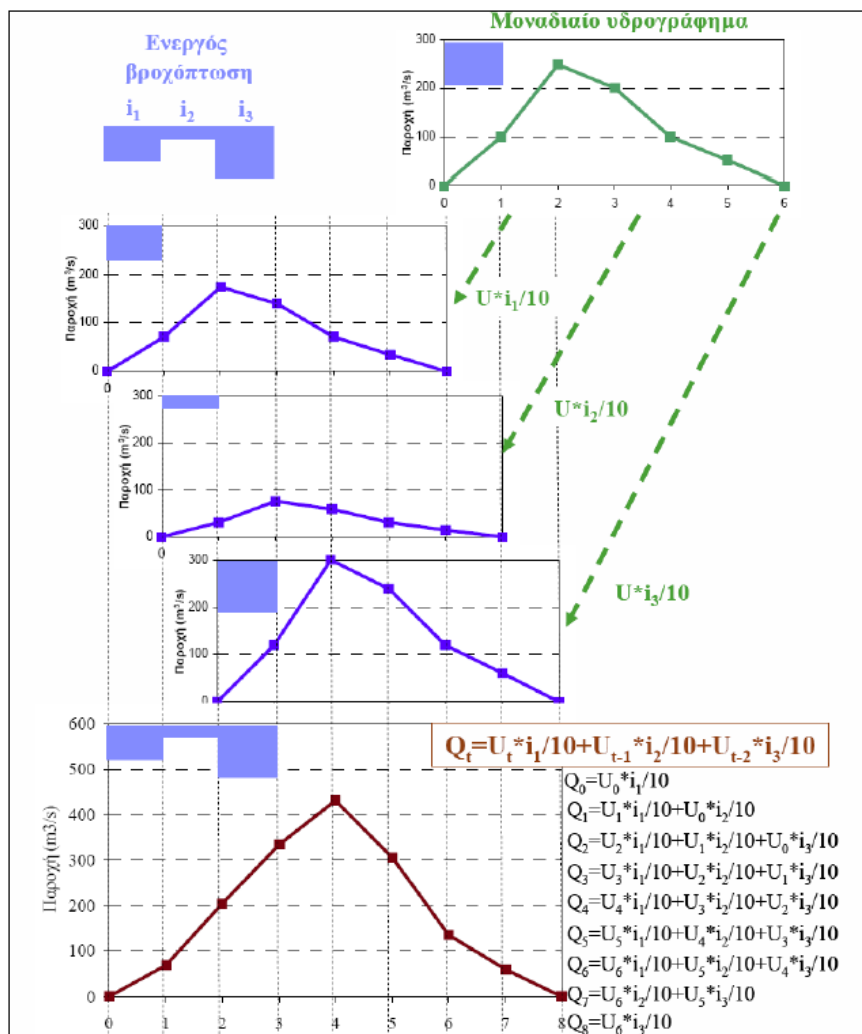
Με βάση τις δύο παραπάνω αρχές, αν είναι γνωστό το ΜΥΓ συγκεκριμένης διάρκειας, τότε μπορεί να προβλεφθεί το Υδρογράφημα της Άμεσης Απορροής (ΥΑΑ) κάθε άλλης βροχής (διαφορετικής έντασης) αλλά της ίδιας διάρκειας. Επίσης, αν είναι γνωστό το υδρογράφημα άμεσης απορροής μιας ραγδαίας βροχής γνωστού ύψους περισσεύματος και συγκεκριμένης διάρκειας, μπορεί να υπολογιστεί το ΜΥΓ της συγκεκριμένης διάρκειας αυτής της λεκάνης. Επιπλέον, αν είναι γνωστό το υδρογράφημα άμεσης απορροής ορισμένης διάρκειας και έντασης, τότε είναι δυνατός ο προσδιορισμός του υδρογραφήματος άμεσης απορροής που προέρχεται από πολλαπλάσια διάρκεια αλλά την ίδια ένταση. Τέλος, μπορεί να προκύψει ο προσδιορισμός ενός υετογράμματος⁶ το οποίο αποτελείται από επιμέρους περισσεύματα βροχής και το οποίο, συμπίπτει με τη διάρκεια περισσεύματος βροχής του ΜΥΓ που διαθέτουμε [Linsley et al. (1949, 1982); Dooge (1979, 1984); O' Donnell (1966); Sherman (1942)]

Σύμφωνα με τους Linsley et al (1949) οι προϋποθέσεις για τη χρήση του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι:

- Για βροχές με την ίδια διάρκεια, η κατανομή της ενεργού βροχόπτωσης στο χώρο και στο χρόνο είναι η ίδια.

⁶ Υετόγραμμα είναι η απεικόνιση της έντασης της βροχής σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Το υετόγραμμα διαιρείται σε τμήματα περίπου σταθερής εντάσεως και για καθένα από αυτά μετρείται το ύψος βροχής σε mm και υπολογίζεται η αντίστοιχη ένταση σε mm/h.

- Κατά τη διάρκεια της βροχής η ένταση είναι σταθερή.
- Δύο βροχοπτώσεις της ίδιας διάρκειας αλλά διαφορετικού ύψους βροχής, δημιουργούν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με τεταγμένες ανάλογες των υψών της ενεργού βροχόπτωσης (συνθήκη γραμμικότητας).
- Από δύο βροχές με το ίδιο ύψος περισσεύματος της βροχής και την ίδια διάρκεια, οι οποίες συμβαίνουν σε διαφορετικούς χρόνους, προκύπτουν όμοια μοναδιαία υδρογραφήματα (συνθήκη μονιμότητας).



Σχήμα 1-6: Κατάρτιση Υδρογραφήματος με τις αρχές της αναλογίας και της επαλληλίας.

(πηγή: Μαμάσης, 2007)

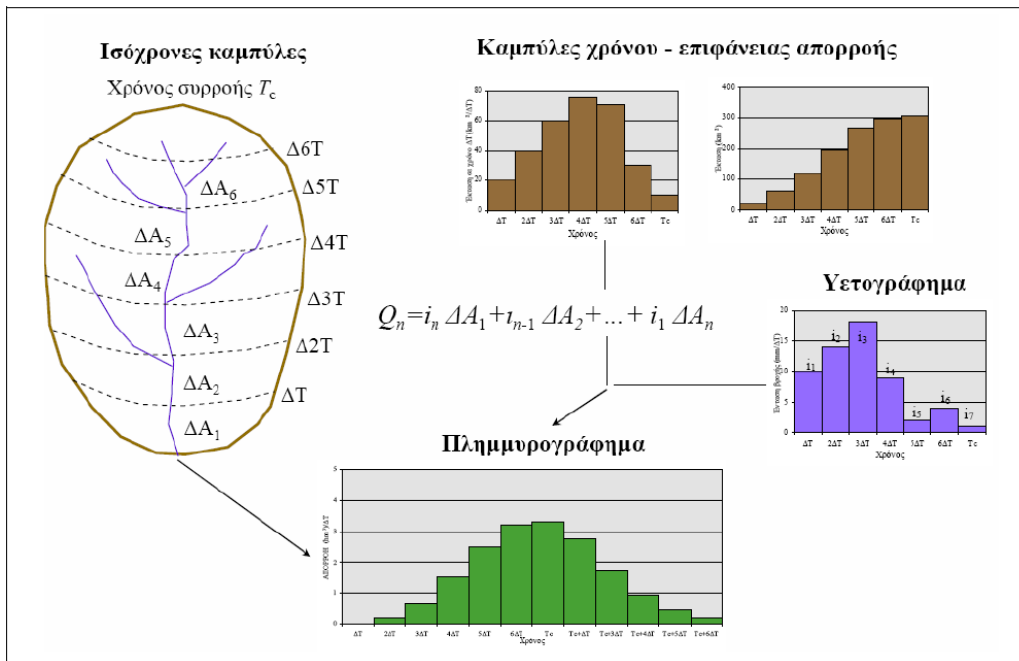
1.6 Μέθοδος χρόνου - επιφάνειας

Η θεμελιώδης αρχή της μεθόδου χρόνου - επιφάνειας είναι το ιστόγραμμα χρόνου – επιφάνειας το οποίο εκφράζει τη σχέση μεταξύ του χρόνου διαδρομής της απορροής και της επιφάνειας της λεκάνης απορροής που συμβάλλει στην απορροή κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου (Χριστοφίδης, 2008). Η μέθοδος, δηλαδή, αποσκοπεί στη συσχέτιση του μήκους διαδρομής⁷ της απορροής με την έκταση της επιφάνειας της λεκάνης. Η λεκάνη συνεπώς χωρίζεται σε υποπεριοχές με καμπύλες που ονομάζονται ισόχρονες⁸. Οι ισόχρονες καμπύλες δεν μπορούν να διασταυρώνονται μεταξύ τους καθώς η καθεμία περιλαμβάνει σημεία διαφορετικής χρονικής απόστασης από την έξοδο της λεκάνης. Επομένως, σκοπός της μεθόδου είναι η εύρεση των γεωμετρικών τόπων των σημείων που απέχουν την ίδια χρονική διάρκεια από την έξοδο της λεκάνης και ο υπολογισμός μέσω αυτών του αριθμού των σημείων που θα διέρχονται από την έξοδο της λεκάνης κάθε χρονική στιγμή. Είναι συνεπώς μια μορφή της μέτρησης της παροχής του ποταμού στην έξοδο της λεκάνης.

Η μέθοδος χρόνου – επιφάνειας μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε μικρές ή μεσαίου μεγέθους λεκάνες καθώς δεν λαμβάνει υπόψη την αποθηκευτικότητα της λεκάνης. Επίσης ισχύουν οι δύο αρχές του μοναδιαίου υδρογραφήματος, η αρχή της αναλογίας και η αρχή της επαλληλίας. Αυτό σημαίνει ότι για τον υπολογισμό της πλημμυρικής απορροής εφαρμόζεται μία και μοναδική συνάρτηση ανεξάρτητα από τις μεταβολές της έντασης της ενεργού βροχόπτωσης. (Sagjafian, Julien, Rajaie 2002).

⁷ Κατά συνέπεια και του χρόνου διαδρομής αν ληφθεί υπόψη η ταχύτητα χερσαίας και ποτάμιας ροής

⁸ Ισόχρονη καμπύλη είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων όπου οι σταγόνες της βροχής που πέφτουν εντός της λεκάνης απέχουν χρονικά το ίδιο από την έξοδο της λεκάνης.



Σχήμα 1-7: Μέθοδος χρόνου – επιφάνειας απορροής
(πηγή: Μαμάσης, 2007)

Για την ανάπτυξη της μεθόδου και τη δημιουργία του ιστογράμματος χρόνου – επιφάνειας ακολουθούνται συνοπτικά τα εξής βήματα στο GIS:

- Επεξεργασία και διόρθωση σφαλμάτων του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM) με σκοπό τη δημιουργία και απεικόνιση του υδρογραφικού δικτύου λαμβάνοντας υπόψη την κατεύθυνση ροής.
- Δημιουργία κανάβου (raster) που περιλαμβάνει τις ταχύτητες του υδρογραφικού δικτύου ανάλογα με την τάξη των κλάδων του δικτύου.
- Δημιουργία κανάβου (raster) με τις ταχύτητες της χερσαίας ροής⁹ λαμβάνοντας υπόψη το ανάγλυφο της περιοχής (κλίσεις) και την τραχύτητα του εδάφους ανάλογα με τις χρήσεις γης (corine).
- Συνδυασμός των παραπάνω κανάβων για τον υπολογισμό της ταχύτητας ροής.

⁹ Χερσαία ή επιφανειακή ροή ονομάζεται η ροή η οποία σχηματίζεται στην επιφάνεια του εδάφους, εκτός του υδρογραφικού δικτύου (Kilgore, 1997; Δερβός, 2005)

- Δημιουργία κανάβου (raster) των συγκεντρωτικών χρόνων ροής, λαμβάνοντας υπόψη τις κατευθύνσεις ροής και της ταχύτητας ροής.
- Δημιουργία ιστογράμματος χρόνου – επιφάνειας και σχηματισμός συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος.

Για να χρησιμοποιηθεί σωστά η μέθοδος πρέπει να ξεκαθαριστούν οι προϋποθέσεις για την εφαρμογή της. Η ένταση της βροχής καθ' όλη τη διάρκεια της πρέπει να είναι ομοιόμορφη και με ομοιόμορφη κατανομή πάνω στην υδρολογική λεκάνη για να υπολογιστεί σωστά το υδρογράφημα της συγκεκριμένης βροχόπτωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ Σ.Γ.Π. (GIS)

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν περιληπτικά τα βασικά στοιχεία των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, θα αναλυθεί η συσχέτισή τους με την υδρολογία και θα περιγραφούν αναλυτικά τα εργαλεία που υπάρχουν για την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών. Τέλος θα περιγραφούν αναλυτικά και βήμα προς βήμα τα δύο μοντέλα που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας. Στα παραρτήματα II και III της εργασίας γίνεται σχηματική αναπαράσταση των μοντέλων και των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν.

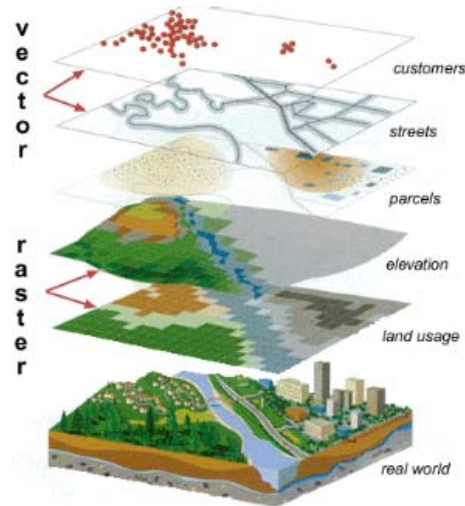
2.1 Γενικά χαρακτηριστικά των Σ.Γ.Π.

Η αντίληψη του χώρου δεν είναι κάτι στατικό αλλά αλλάζει και μεταμορφώνεται ανάλογα με το κοινωνικό, πολιτικό, οικονομικό και τεχνολογικό περιβάλλον. Έτσι τόσο ο χωρικός σχεδιασμός όσο και οι μέθοδοι ανάλυσης και διαχείρισης των χωρικών στοιχείων εξελίσσονται και μεταλλάσσονται στο χρόνο. Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) είναι το βασικό εργαλείο για την αντίληψη της σχέσης ανάμεσα στο χωρικό σχεδιασμό και τα συστήματα πληροφοριών. Τα GIS θεωρούνται ένα από τα πιο υποσχόμενα συστήματα πληροφοριών που κυκλοφορούν σήμερα. Ο λόγος που θεωρούνται τόσο αξιόλογα είναι το ότι μπορούν να συνδυάσουν δεδομένα με χωρική πληροφορία, επιτρέποντας στον χρήστη να δημιουργεί πληρέστερες βάσεις δεδομένων τις οποίες χρησιμοποιεί για την αποτελεσματικότερη λήψη αποφάσεων.

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών έχουν σαν κυρίαρχο στόχο το χωρικό σχεδιασμό. Τα Σ.Γ.Π. αντιπροσωπεύουν ένα ισχυρό εργαλείο για τη συλλογή, αποθήκευση, ανάληψη, μετασχηματισμό και απεικόνιση χωρικών στοιχείων του πραγματικού κόσμου (Burrough, 1983). Στο πλαίσιο των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.) τα δεδομένα αποτελούν μια συλλογή από χωρικά και μη χωρικά στοιχεία για συγκεκριμένες οντότητες, τα χαρακτηριστικά τους και τις σχέσεις

μεταξύ τους και επομένως εκφράζουν την ερμηνεία των γεωγραφικών φαινομένων (Κουτσόπουλος, 2006). Τα Σ.Γ.Π. προσφέρουν τη δυνατότητα προσομοίωσης του πραγματικού κόσμου σε δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα απεικόνισης, μέσω μαθηματικών αλγορίθμων.

Τα συστήματα GIS, όπως και τα συστήματα CAD, αποτυπώνουν χωρικά δεδομένα¹⁰ σε γεωγραφικό ή χαρτογραφικό ή καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Βασικό χαρακτηριστικό των Σ.Γ.Π. είναι ότι τα χωρικά δεδομένα συνδέονται και με περιγραφικά δεδομένα¹¹, π.χ. μια ομάδα σημείων που αναπαριστούν θέσεις πόλεων συνδέεται με ένα πίνακα όπου κάθε εγγραφή εκτός από τη θέση περιέχει πληροφορίες όπως ονομασία, πληθυσμός κλπ. Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών είναι πληροφοριακά συστήματα (Information Systems) που παρέχουν την δυνατότητα συλλογής, διαχείρισης, αποθήκευσης, επεξεργασίας, ανάλυσης και οπτικοποίησης, σε ψηφιακό περιβάλλον, των δεδομένων που σχετίζονται με τον χώρο. Τα δεδομένα αυτά συνήθως λέγονται γεωγραφικά ή χαρτογραφικά ή χωρικά (spatial) και μπορεί να συσχετίζονται με μια σειρά από περιγραφικά δεδομένα τα οποία και τα χαρακτηρίζουν μοναδικά.



Σχήμα 2-1: Η αρχή της υπέρθεσης των Πληροφοριακών επιπέδων στα GIS

¹⁰ Χωρικά στοιχεία είναι οποιαδήποτε δεδομένα αφορούν άμεσα ή έμμεσα σε συγκεκριμένη τοποθεσία ή γεωγραφική περιοχή.

¹¹ Περιγραφικά δεδομένα είναι τα περιγραφικά χαρακτηριστικά που αναφέρονται στα χωρικά στοιχεία

Το πεδίο εφαρμογής των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών είναι ευρύτατο καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπουδήποτε καθώς η παράμετρος της γεωγραφικής πληροφορίας υπεισέρχεται άμεσα ή έμμεσα, όπως είναι: οι ανάγκες χαρτογράφησης, τα ζητήματα χωροταξίας, περιπτώσεις αστικών και περιφερειακών μελετών, διαχείρισης φυσικών πόρων, οικολογικών ερευνών, διαχείρισης αποβλήτων, κτηματολογίου και πολεοδομικού σχεδιασμού κ.α. Σήμερα, τα Σ.Γ.Π. χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο ως εργαλεία που υποστηρίζουν τις λειτουργίες επιχειρήσεων και οργανισμών. Αυτές οι λειτουργίες μπορεί να απαιτούν είτε απλά διαχείριση της γεωγραφικής πληροφορίας, είτε πιο σύνθετη επεξεργασία των χωρικών και περιγραφικών βάσεων δεδομένων, με σκοπό την παραγωγή διαφόρων αναφορών και τη λήψη αποφάσεων.

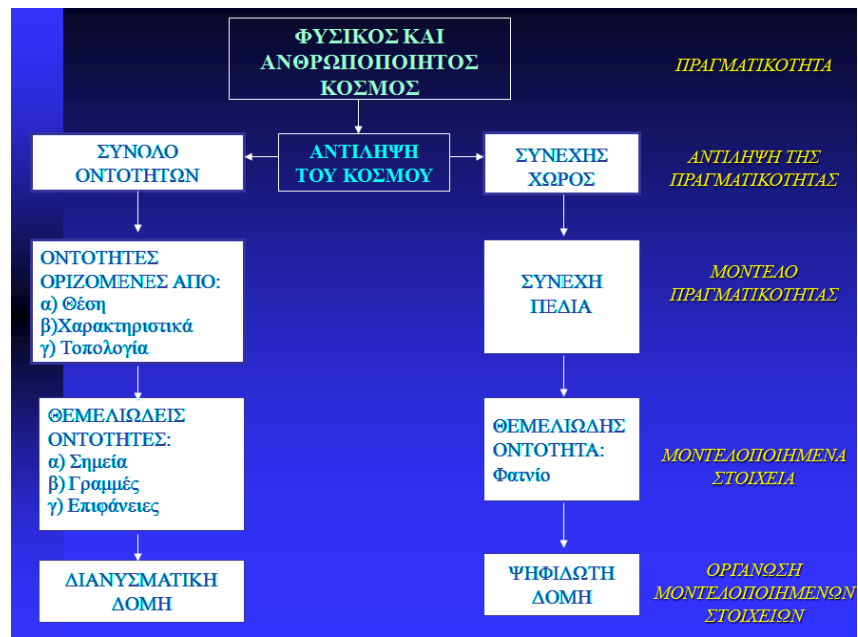
2.2 Διανυσματικά και Ψηφιδωτά Μοντέλα

Η βιβλιογραφία έχει δείξει οι τρόποι περιγραφής του χώρου στηρίζονται στην αντίληψη ότι αυτός καλύπτεται από οντότητες και από συνεχή στοιχεία τα οποία μεταβάλλονται ομαλά και συνεχώς με το χώρο. Τα ψηφιακά χωρικά μοντέλα διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες:

- Διανυσματικά μοντέλα (Vector)
- Ψηφιδωτά ή Κανονικοποιημένα (Raster)

Το πιο γνωστό μοντέλο, διανυσματικό μοντέλο (vector) είναι αυτό το οποίο θεωρεί ότι ο γεωγραφικός χώρος αποτελείται από οντότητες οι οποίες περιγράφονται από τα χαρακτηριστικά τους, ορίζονται από τη θέση τους με ένα σύνολο συντεταγμένων και οι χωρικές σχέσεις μεταξύ τους προσδιορίζονται από την τοπολογία τους.

Η προσέγγιση των συνεχών πεδίων, ψηφιδωτό μοντέλο (raster), απεικονίζει το γεωγραφικό χώρο μέσα από συνεχείς καρτεσιανές συντεταγμένες, ο οποίος χωρίζεται σε χωρία κανονικού σχήματος, τα φατνία (pixel). Γενικά, ένα συνεχές πεδίο είναι εκείνο το οποίο συνίσταται στη σειριακή (μονοδιάστατη) απόδοση των φατνίων, το καθένα εκ των οποίων προσδιορίζεται από το ζεύγος σειράς - στήλης του αντίστοιχου κανάβου και την τιμή του χαρακτηριστικού που απεικονίζει.



Σχήμα 2-2: Πραγματικότητα και Περιγραφή της.

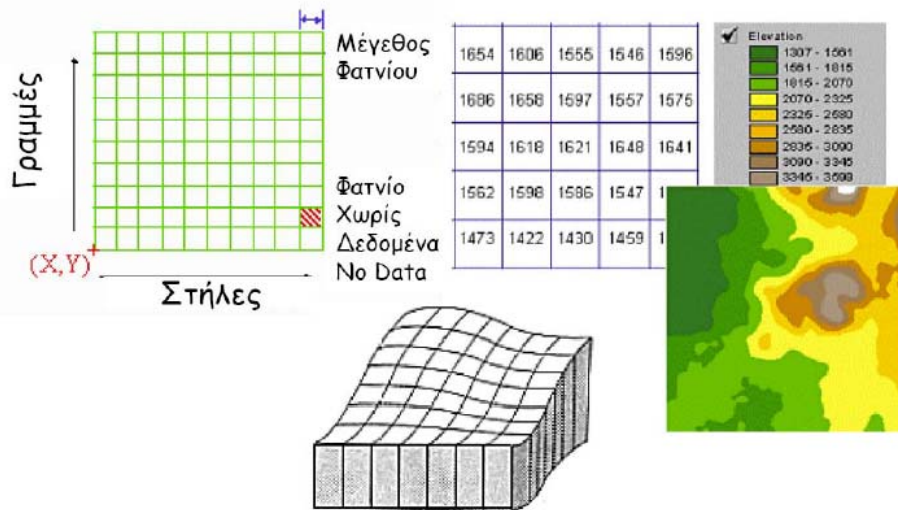
(πηγή: Κουτσόπουλος, 2006)

Τα πλεονεκτήματα των διανυσματικών μοντέλων είναι η καλή παρουσίαση των οντοτήτων καθώς και η ενιαία και συνεκτική δομή των δεδομένων. Επίσης παρέχουν ακριβής χαρτογραφική απόδοση για όλες τις κλίμακες και έχουν δυνατότητες ενημέρωσης και γενίκευσης των γραφικών και ποιοτικών τους χαρακτηριστικών. Επιπλέον τα διανυσματικά δεδομένα επιτρέπουν την αποτελεσματική απεικόνιση της τοπολογίας και κατά συνέπεια είναι πιο επαρκή στην διεξαγωγή χωρικών αναζητήσεων ενώ ταυτόχρονα επιτρέπουν τον αποδοτικό τρόπο οργάνωσης μεγάλων ποσοτήτων χωρικών στοιχείων.

Αντίστοιχα στα ψηφιδωτά μοντέλα η θέση κάθε στοιχείου υποδηλώνεται έμμεσα από τη θέση του στοιχείου στον πίνακα και για το λόγο αυτό χαρακτηρίζονται ως απλές μορφές δεδομένων. Στα μοντέλα αυτά είναι εύκολες οι χωρικές αναλύσεις καθώς και η μαθηματική μοντελοποίηση της χωρικής μονάδας. Επιπλέον με τον τρόπο αυτό αντιπροσωπεύεται καλύτερα ο συνεχής χώρος και είναι εύκολη η διαδικασία της επικάλυψης των στοιχείων μεταξύ τους καθώς και με άλλα τηλεπισκοπικά δεδομένα.

Οι δύο προσεγγίσεις έχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους και η επιλογή ανάμεσα στα μοντέλα των οντοτήτων και του συνεχούς πεδίου εξαρτάται από τις απαιτήσεις

της κάθε εφαρμογής. Και οι δύο είναι αξιόπιστες και λειτουργικές, ενώ σε πολλές περιπτώσεις, είναι μετατρέψιμες η μία στην άλλη. Η υδρολογική ανάλυση στα Σ.Γ.Π. χρησιμοποιεί ως βάση της κανονικοποιημένα μοντέλα, για να μπορέσει να προσομοιώσει την κίνηση της κάθε σταγόνας πάνω στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους.



Σχήμα 2-3: Κανονικοποιημένο χωρικό μοντέλο

2.3 Υδρολογικά μοντέλα σε Σ.Γ.Π.

Ένα υδρολογικό μοντέλο βασίζεται στην προσομοίωση της βροχόπτωσης και την επίδραση της απορροής στην συγκέντρωση των επιφανειακών υδάτων. Τα υδρολογικά μοντέλα συνδυάζουν πολλά επί μέρους θεματικά επίπεδα όπως τοπογραφικά, γεωμορφολογικά, εδαφολογικά και επίπεδα χρήσεων γης τα οποία απαιτούν εξειδικευμένο λογισμικό για την κατάλληλη διαχείρισή τους.

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών είναι κατάλληλα εργαλεία για τέτοιες εφαρμογές καθώς το βασικό τους πλεονέκτημα είναι η οργάνωση και επεξεργασία των δεδομένων με τη δημιουργία τοπολογικών σχέσεων αναφορικά με τον γεωγραφικό χώρο. Τα Σ.Γ.Π. μπορούν να διαχειριστούν τον μεγάλο όγκο δεδομένων και επεξεργασιών που απαιτούν τα υδρολογικά μοντέλα. Επίσης, με την ραγδαία ανάπτυξη της υπολογιστικής δύναμης, δόθηκε η δυνατότητα ανάπτυξης πολύπλοκων και αναλυτικών υδρολογικών μοντέλων, τα οποία εκτελούνται κατά κύριο λόγο μέσα σε περιβάλλον ενός Σ.Γ.Π. χάρη στις ικανότητές τους σε θέματα χειρισμού και

επεξεργασίας των δεδομένων. Τα Σ.Γ.Π. παρέχουν τη δυνατότητα της χωρικής ανάλυσης των δεδομένων γεγονός που προσφέρει τον πλήρη έλεγχο των διεργασιών και των αποτελεσμάτων των υδρολογικών εφαρμογών αλλά και την οπτικοποίηση τους για την καλύτερη κατανόησή τους από το χρήστη.

Το κύριο στοιχείο της υδρολογικής ανάλυσης είναι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους από το οποίο μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες για το ανάγλυφο και τα τοπογραφικά στοιχεία της περιοχής αλλά και για την κίνηση και τη συγκέντρωση των υδάτων. Για το λόγο αυτό τα Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους¹² σε συνδυασμό με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών είναι η βάση για τις υδρολογικές εφαρμογές.

Τα κύρια εργαλεία που απαιτούνται για την εκτέλεση μιας υδρολογικής εφαρμογής είναι αρχικά η χάραξη της λεκάνης απορροής μέσω της εύρεσης του υδροκρίτη, η χάραξη του υδρογραφικού δικτύου, η εύρεση της κατεύθυνσης ροής του νερού, η εύρεση της συγκεντρωτικής ροής καθώς και ο υπολογισμός του μήκους ροής. (Fairfield and Leymarie, 1991; Tarboton et al., 1991; Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993).

2.4 Λογισμικό ArcGIS

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να περιγραφούν οι βασικές εντολές του λογισμικού ArcGIS που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκτέλεση της παρούσης εργασίας αλλά απαραίτητες για κάθε υδρολογική εφαρμογή.

Basin

Το εργαλείο Basin χρησιμοποιείται για τη χάραξη της λεκάνης απορροής. Το εργαλείο αυτό δέχεται ως δεδομένο ένα αρχείο raster που αφορά τη διεύθυνση ροής και το αναλύει με τέτοιο τρόπο ώστε να βρει όλα τα σύνολα των συνδεδεμένων

¹² Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) θεωρείται κάθε ψηφιακή αναπαράσταση της συνεχούς μεταβολής του αναγλύφου στο χώρο (Burrough, 1986). Ο όρος DEM είναι πιο ειδικός και αναφέρεται μόνο στην ψηφιακή αναπαράσταση του αναγλύφου, ενώ ο όρος DTM είναι γενικότερος και αναφέρεται επίσης και για οποιαδήποτε άλλη αναπαράσταση ενός χαρακτηριστικού συνεχούς μεταβολής στο χώρο. Τα ΨΜΕ είναι γκριζες εικόνες κλίμακας όπου η τιμή του κάθε εικονοστοιχείου (pixel) είναι πραγματικός αριθμός υψομέτρου.

μεταξύ τους φατνίων που ανήκουν στην ίδια λεκάνη απορροής. Οι λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης δημιουργούνται από τον εντοπισμό των σημείων συγκέντρωσης των υδάτων και αναγνωρίζοντας την περιοχή που συνεισφέρει για κάθε σημείο ξεχωριστά. Αντίθετα το εργαλείο Watershed εκτελεί την ίδια ακριβώς διεργασία αλλά για τα σημεία συγκέντρωσης που επιδεικνύει ο χρήστης.

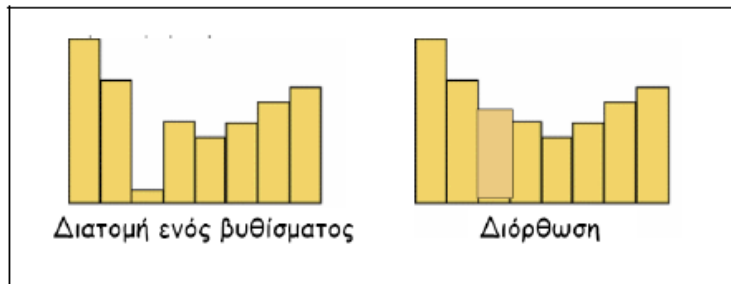
Fill

Οι ταπεινώσεις (sinks) του υποβάθρου είναι τις περισσότερες φορές σφάλματα λόγω της ανάλυσης των δεδομένων του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM). Οι ταπεινώσεις αυτές πρέπει να εξαλειφθούν για να εξασφαλιστεί η ορθότητα της οριοθέτησης των λεκανών και των υδατικών δικτύων. Αν δεν γίνει αυτό τα παράγωγα υδατικά δίκτυα μπορεί να φαίνονται ασυνεχή. Το εργαλείο αυτό έχοντας ως δεδομένο ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους δημιουργεί ένα νέο αρχείο στο οποίο έχει εξαλείψει όλες τις ταπεινώσεις μέχρι την καθορισμένη υψομετρική τιμή.

Sink

Με τον όρο βύθισμα (sink) εννοείται κάποιο φατνίο που έχει τιμή υψομέτρου μικρότερη από όλα τα γειτονικά του (8 φατνία που το περιβάλλουν) και έτσι το φατνίο αυτό δεν μπορεί να προσαρμοστεί στη διεύθυνση ροής. Τα σημεία αυτά θεωρείται ότι έχουν απροσδιόριστη κατεύθυνση ροής και συνήθως τους αποδίδεται μια τιμή που είναι το άθροισμα των πιθανών κατευθύνσεων ροής τους (Σχήμα 2-4).

Για την σωστή απόδοση της κατεύθυνσης ροής το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) πρέπει να είναι απαλλαγμένο από τυχόν βυθίσματα. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα βυθίσματα αυτά προκαλούνται από σφάλματα στα δεδομένα λόγω της μετατροπής των αρχικών τιμών υψομέτρου σε ακέραιες. Η δημιουργία βυθισμάτων σε δεδομένα με μέγεθος φατνίου 10 m ή και μεγαλύτερα είναι σπάνια (Mark, 1988) - εκτός από παγετώδη ή καρστικές περιοχές- και συνεπώς πρέπει να λαμβάνονται ως σφάλματα. Όσο αυξάνεται το μέγεθος του pixel τόσο περισσότερα βυθίσματα εμφανίζονται σε ένα DEM.



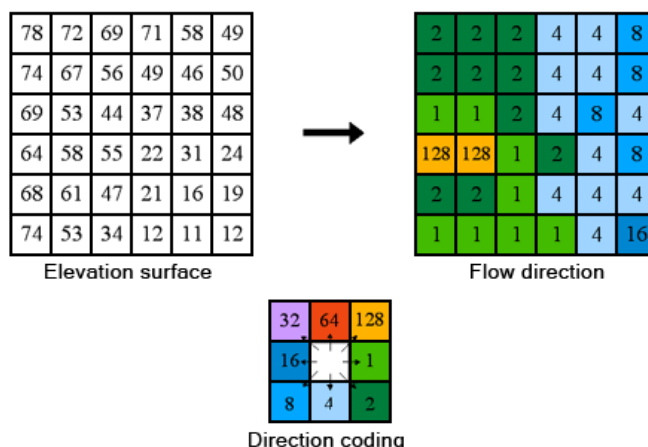
Σχήμα 2-4: Απεικόνιση ενός βυθίσματος (sink)

(πηγή: ArcGIS 10 Help)

Flow direction

Ένα σημαντικό στοιχείο για να προκύψουν τα υδρολογικά χαρακτηριστικά μιας επιφάνειας είναι η δυνατότητα να καθοριστεί η κατεύθυνση ροής από κάθε φαντίο της εικόνας raster. Η διαδικασία αυτή γίνεται με την εντολή Flow direction, η οποία δέχεται ως δεδομένο το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (αφού έχει υποστεί «γέμισμα») και δίνει ως αποτέλεσμα ένα raster αρχείο που δείχνει την κατεύθυνση ροής κάθε φαντίου. Για κάθε φαντίο υπάρχουν 8 διαφορετικές πιθανές κατευθύνσεις ροής που συνδέονται με τα 8 γειτονικά φαντίνια που ουσιαστικά το περιβάλλουν. Κατά τη διαδικασία αυτή ελέγχονται οι τιμές του υψομέτρου στα φαντίνια αυτά και ορίζεται η κατεύθυνση ροής από τα φαντίνια με τις μεγαλύτερες τιμές υψομέτρου προς αυτά με τις μικρότερες (Σχήμα 2-5).

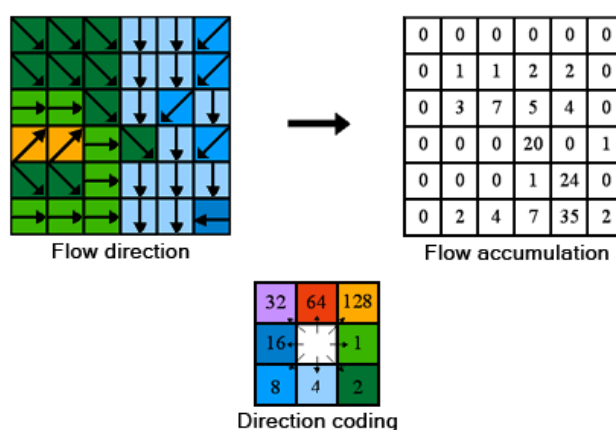
Ουσιαστικά το κλειδί της διαδικασίας αυτής είναι ο υπολογισμός των κλίσεων προς κάθε ένα από τα υπόλοιπα 8 φαντίνια και η διεύθυνση ροής αποκαλύπτεται στα φαντίνια στα οποία η τιμή της κλίσης μεγιστοποιείται.



Σχήμα 2-5: Κωδικοποίηση της εντολής Flow Direction
(πηγή: ArcGIS 10 Help)

Flow Accumulation

Το εργαλείο αυτό υπολογίζει τη συσσώρευση της ροής με την εξαγωγή ενός raster αρχείου σε κάθε φατνίο του οποίου καταχωρείται μια τιμή που υποδηλώνει τον αριθμό των φατνίων δια μέσου των οποίων διέρχεται το νερό. Η εντολή αυτή δέχεται ως δεδομένο το αρχείο που έχει προκύψει από τις κατευθύνσεις ροής (flow direction) και υπολογίζει τον αριθμό των φατνίων που απορρέουν δια μέσου του συγκεκριμένου φατνίου (Σχήμα 2-6). Φατνία με υψηλές τιμές συσσώρευσης είναι περιοχές όπου συγκεντρώνεται η ροή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση ποταμιών.



Σχήμα 2-6: Κωδικοποίηση της εντολής Flow Accumulation
(πηγή: ArcGIS 10 Help)

Επομένως για περιοχές κοντά στη κορυφογραμμή οι αναμενόμενες τιμές της εντολής αυτής θα είναι μηδενικές ενώ ιδιαίτερα υψηλές θα είναι οι τιμές για περιοχές σε κεντρικές κοίτες ποταμών.

Τέλος ο χρήστης μπορεί να θέσει στην τιμή συσσώρευσης ένα κατώφλι (threshold)¹³, με την παραδοχή ότι για τιμές μικρότερες από αυτήν δεν υφίσταται συγκεντρωμένη ροή, υπάρχει η δυνατότητα απεικόνισης ενός αποστραγγιστικού δικτύου πλήρως συνδεδεμένου (Chang, 2003).

Flow Length

Υδρολογικός Ορισμός: Το μήκος ροής είναι η απόσταση από οποιοδήποτε σημείο εντός της υδρολογικής λεκάνης ως το σημείο εξόδου της λεκάνης αυτής. Η απόσταση αυτή μετρείται κατά μήκος της διεύθυνσης ροής και όχι σε ευθεία γραμμή.

Ορισμός GIS: Στα GIS το μήκος ροής ενός αυθαίρετου φατνίου υπολογίζεται από το άθροισμα των στοιχειωδών αποστάσεων από το κέντρο στο κέντρο του κάθε φατνίου κατά μήκος της διεύθυνσης ροής από το επιλεγμένο φατνίο ως το φατνίο εξόδου της λεκάνης. Το μήκος ροής του φατνίου που βρίσκεται στην έξοδο της λεκάνης είναι μηδέν.

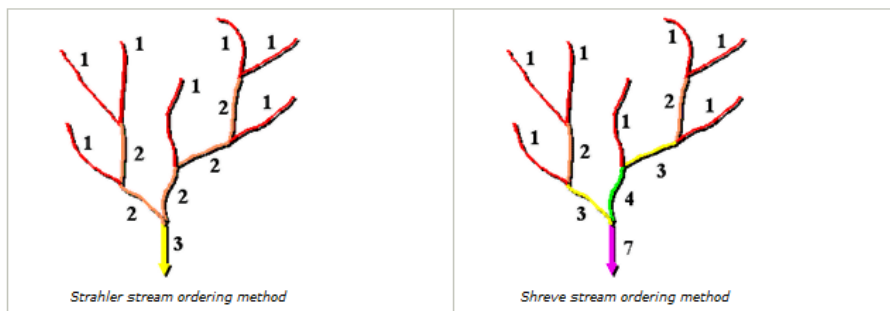
Ο υπολογισμός του μήκους ροής είναι ιδιαίτερα σημαντικός καθώς όταν βρέχει μια σταγόνα βροχής που προσγειώνεται κάπου εντός της λεκάνης απορροής πρέπει πρώτα να ταξιδέψει μια ορισμένη απόσταση προτού φτάσει στην έξοδο της λεκάνης. Συνεπώς το φατνίο με τη μεγαλύτερη απόσταση ροής είναι και το πιο υδρολογικά απομακρυσμένο φατνίο. Αν το μήκος ροής διαιρεθεί με την ταχύτητα ροής του κάθε φατνίου μπορεί να παραχθεί ένα αρχείο που θα δείχνει τους χρόνους απορροής για τη λεκάνη αυτή. Ο χρόνος απορροής είναι ο χρόνος που απαιτείται για την επιφανειακή ροή μέσω των υδατορευμάτων από το πιο μακρινό υδρολογικά σημείο της λεκάνης μέχρι την έξοδό της και είναι μια αντιπροσωπευτική κλίμακα του μεγέθους της λεκάνης.

¹³ Αριθμός των pixel που αντιστοιχούν στην έκταση της απορροής του υδατορεύματος. Παίρνει την αντίστοιχη τιμή, ανάλογα με την ανάλυση των δεδομένων, για έκταση απορροής περίπου 1km² το οποίο προκύπτει από εμπειρική γνώση.

Ο χρόνος απορροής μπορεί να υπολογιστεί αν στην εντολή Flow Length οριστεί ως βάρος της παραμέτρου (weight) το αντίστροφο της ταχύτητας ($1/\text{velocity}$). Στην περίπτωση αυτή το αποτέλεσμα είναι σαν να διαιρείται το μήκος ροής του κάθε pixel με την ταχύτητα που έχει κάθε στιγμή και συνεπώς το αποτέλεσμα που παράγεται είναι ο χρόνος απορροής.

Stream order

Η εντολή αυτή είναι μια μέθοδος απόδοσης αριθμητικών σειρών στους κλάδους ενός υδρολογικού δικτύου. Η σειρά αυτή είναι ένας τρόπος εντοπισμού και ταξινόμησης των τύπων των ροών με βάση τον αριθμό των παραποτάμων του κάθε υδατορεύματος. Πολλά χαρακτηριστικά των ρευμάτων μπορούν να εξαχθούν αν είναι γνωστή η τάξη τους. Το εργαλείο αυτό έχει δύο τρόπους ταξινόμησης των δικτύων, αυτόν του Strahler (1957)¹⁴ και αυτή του Shreve (1966) (Σχήμα 2-7). Και στις δύο μεθόδους τα ανάντη τμήματα του ρεύματος είναι τάξης 1.



Σχήμα 2-7: Ταξινόμηση κλάδων υδρογραφικού δικτύου
(πηγή: ArcGIS 10 Help)

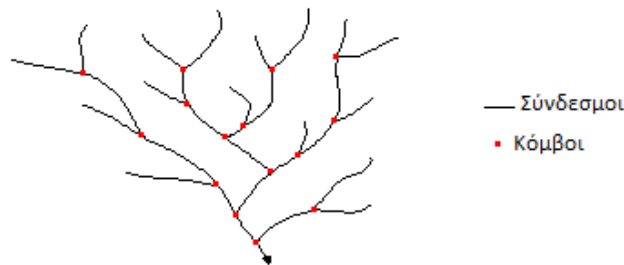
Snap pour point

Με το εργαλείο αυτό αποτυπώνονται τα σημεία εξόδου της λεκάνης και μεταφέρονται στο σημείο μεγαλύτερης συγκέντρωσης ροής που βρίσκεται εντός μιας ορισμένης απόστασης. Όσο μεγαλώνει αυτή η απόσταση, εντός ενός ορίου, τόσο πιο διακριτά αποτυπώνονται τα υδατορεύματα του δικτύου.

¹⁴ βλ. Κεφάλαιο 2.2 Υδρογραφικό Δίκτυο Λεκάνης Απορροής)

Stream Link

Το εργαλείο αυτό αποδίδει μια μοναδική τιμή στα σημεία της ένωσης των γραμμικών στοιχείων ενός raster γραμμικού δικτύου συναρτήσει του κανάβου κατεύθυνσης ροής. Οι σύνδεσμοι είναι τα τμήματα εκείνα του υδρογραφικού δικτύου που συνδέουν δύο διαδοχικούς κόμβους ή έναν κόμβο με το σημείο εξόδου της λεκάνης ή κόμβους με τα σημεία έναρξης της απορροής (Σχήμα 2-8).



*Σχήμα 2-8: Απεικόνιση συνδέσμων υδρογραφικού δικτύου
(πηγή: ArcGIS 10 Help ίδια επεξεργασία)*

Stream to Feature

Ο αλγόριθμος αυτό χρησιμοποιείται για τη διανυσματοποίηση (vectorization) του υδρογραφικού δικτύου ή οποιοδήποτε άλλου ψηφιδωτού γραμμικού στοιχείου (raster linear network). Το εργαλείο αυτό έχει βελτιστοποιηθεί για να χρησιμοποιεί το αρχείο της κατεύθυνσης ροής στην διανυσματοποίηση των φατνίων που τέμνονται ή είναι γειτονικά έτσι ώστε να μην υπερκαλύπτονται λαμβάνοντας υπόψη μια τιμή που υπάρχει ως κατώφλι.

2.5 Μέθοδος χρόνου - επιφάνειας

Η διαδικασία της μεθόδου χρόνου – επιφάνειας στο GIS ουσιαστικά αναφέρεται στην επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους DEM της περιοχής ενδιαφέροντος. Το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου περιγράφηκε στην παράγραφο 1.6. Το DEM που χρησιμοποιήθηκε για τη λεκάνη απορροής του Σπερχειού ποταμού ήταν ανάλυσης 25x25 m (πηγή: Τομέας Υδατικών Πόρων ΕΜΠ). Επίσης χρησιμοποιήθηκε και ένα

αρχείο που απεικόνιζε τις χρήσεις γης της περιοχής (Corine) (πηγή: Τομέας Υδατικών Πόρων ΕΜΠ) στο οποίο εισήχθη ένα ακόμη πεδίο που περιελάμβανε το συντελεστή τραχύτητας του εδάφους για την κάθε χρήση γης.

Αρχικά για την ορθότητα των δεδομένων το ψηφιακό μοντέλο εδάφους έπρεπε να διορθωθεί από τυχόν σφάλματα των δεδομένων του τα οποία θα επηρέαζαν την ακρίβεια της μεθόδου. Τα σφάλματα αυτά αναφέρονται σε απότομες (μη υπαρκτές) εναλλαγές του αναγλύφου και στη δημιουργία μεγάλων «βυθισμάτων» (sinks) τα οποία δημιουργούν προβλήματα κατά τη διαδικασία εύρεσης της κατεύθυνσης της ροής του νερού καθώς απομονώνουν μέρος της λεκάνης απορροής. Τα βυθίσματα αυτά διορθώνονται με χρήση του εργαλείου Fill του περιβάλλοντος ArcGIS.

Επίσης μέσω του λογισμικού ArcGIS μετασχηματίστηκε ο χάρτης χρήσεων γης σε ψηφιδωτό αρχείο (raster) ανάλογα με τις τιμές της τραχύτητας του εδάφους¹⁵. Αυτό ήταν απαραίτητο καθώς για να γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί και συσχετίσεις με τα υπόλοιπα αρχεία έπρεπε να υπάρχει κανάβος που να αποτυπώνει τις διάφορες τιμές της τραχύτητας του εδάφους στις σωστές συντεταγμένες, έτσι ώστε να υπάρχει αλληλεπίδραση με τα υπόλοιπα στοιχεία του αναγλύφου. Οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας του εδάφους ήταν πολλαπλασιασμένες με το 100 για να μην εισαχθούν δεκαδικές τιμές στο σύστημα αλλά κατά τη διάρκεια των υπολογισμών αυτό διορθώνεται. Η τιμή του μεγέθους του κάθε φατνίου ορίστηκε να είναι 25x25 m για να συμπίπτει με το μέγεθος των φατνίων του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

2.5.1 Δημιουργία κανάβου χερσαίας ροής.

Για τη δημιουργία του κανάβου της χερσαίας ροής ήταν απαραίτητη η δημιουργία του κανάβου κλίσεων της περιοχής μελέτης (Slope¹⁶). Η εντολή αυτή υπολογίζει τις κλίσεις του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, μέσω του υπολογισμού της μεταβολής της τιμής του υψομέτρου, για κάθε φατνίο ξεχωριστά, συναρτήσει των τιμών των

¹⁵ Η διαδικασία αυτή έγινε με χρήση της εντολής Convert Feature to Raster, του Toolbox του λογισμικού ArcGIS. Με την εντολή αυτή τα αρχικά πολύγωνα μετασχηματίζονται σε ψηφιδωτά αρχεία όπου η τιμή του κάθε εικονοστοιχείου (pixel) προέρχεται από την τιμή του πολυγώνου που συμπίπτει με το κέντρο του εικονοστοιχείου.

¹⁶ Η εντολή αυτή περιλαμβάνεται στο Toolset Surface του Spatial Analyst Tools του λογισμικού ArcGIS.

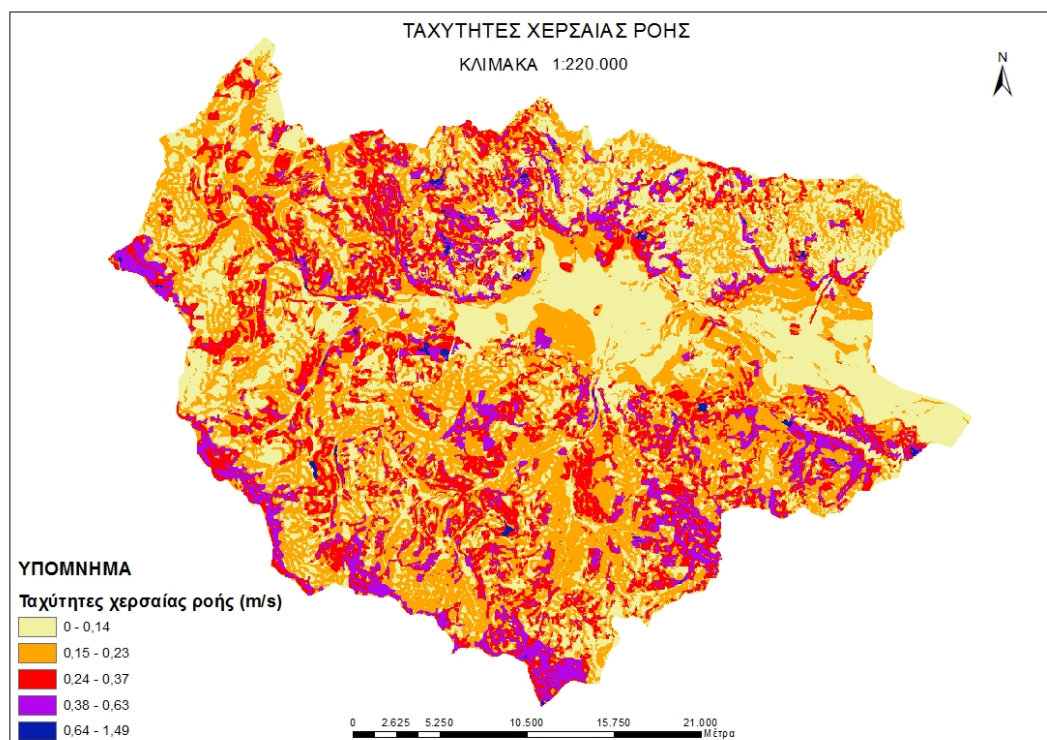
γειτονικών του φατνίων (Burrough and McDonell, 1998) (Σχήμα 2-9). Μικρή κλίση συνεπάγεται ομαλό έδαφος ενώ μεγάλη τιμή κλίσης συνεπάγεται έντονο ανάγλυφο.

Συνεπώς οι ταχύτητες χερσαίας ροής υπολογίστηκαν μέσω του τύπου (Μαμάσης, 2007):

$$V(m/s) = k * \sqrt{S(m/m)} \quad (2.1)$$

Όπου k είναι ο συντελεστής τραχύτητας του εδάφους και S η κλίση του εδάφους εκφρασμένη σε m/m.

Η πράξη αυτή έγινε μέσω του Raster Calculator του Toolset Map Algebra, του λογισμικού ArcGIS το οποίο επιτρέπει τις αριθμητικές πράξεις μεταξύ ψηφιδωτών αρχείων και αριθμών. Συνεπώς η εντολή αυτή δημιούργησε ένα νέο ψηφιδωτό (raster) αρχείο κάθε φατνίο του οποίου περιελάμβανε την τιμή που προκύπτει από την πράξη (2.1) των δύο φατνίων που βρίσκονταν στην αντίστοιχη θέση με αυτό. Επομένως ο κánaβος χερσαίας ροής (overland flow) αποτελείται από φατνία που έχουν ως τιμή την τιμή της ταχύτητας της χερσαίας ροής για κάθε σημείο, συναρτήσει της κλίσης και της τραχύτητας του εδάφους.



*Σχήμα 2-9: Απεικόνιση ταχυτήτων χερσαίας ροής
(πηγή: Ιδία επεξεργασία)*

2.5.2 Δημιουργία κανάβου ταχύτητας ροής υδρογραφικού δικτύου

Για τη δημιουργία του κανάβου ταχύτητας ροής του υδρογραφικού δικτύου απαραίτητο είναι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) διορθωμένο από τα βυθίσματα (sinks). Με το δεδομένο αυτό μπορεί να υπολογιστεί η κατεύθυνση της ροής μέσω του εργαλείου Flow direction¹⁷. Με το εργαλείο αυτό υπολογίζεται η κατεύθυνση του νερού κάθε φατνίου ξεχωριστά μέσω του υπολογισμού των υψομετρικών διαφορών του DEM και του ορισμού της ροής από το κεντρικό φατνίο προς το γειτονικό του με την μεγαλύτερη υψομετρική διαφορά (μέγιστη κλίση).

Στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί και η συγκέντρωση ροής με το εργαλείο Flow accumulation¹⁸. Το εργαλείο αυτό λαμβάνει υπόψη την κατεύθυνση ροής που

¹⁷ Το εργαλείο αυτό βρίσκεται στο Hydrology Toolset του Spatial Analyst Tools του λογισμικού ArcGIS.

¹⁸ Το εργαλείο αυτό βρίσκεται στο Hydrology Toolset του Spatial Analyst Tools του λογισμικού ArcGIS.

υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα και αθροίζει τον αριθμό των φατνίων που απορρέουν σε κάθε φατνίο και του προσδίδει την τιμή αυτή. Συνεπώς μπορούν να βρεθούν τα φατνία αυτά τα οποία έχουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ροής, τα οποία είναι δυνητικά υδρογραφικοί αποδέκτες.

Για να υπολογιστούν με ακρίβεια τα φατνία εκείνα που αποτελούν το υδρογραφικό δίκτυο (ποτάμια) ορίζεται από το χρήστη μια τιμή (κατώφλι) στον κάναβο συγκέντρωσης ροής (flow accumulation). Τα φατνία που έχουν τιμή μικρότερη από την τιμή αυτή διαγράφονται κι έτσι τα φατνία που μένουν αποτελούν το υδρογραφικό δίκτυο, διαχωρίζονται δηλαδή τα φατνία όπου σχηματίζεται η ροή του υδρογραφικού δικτύου από αυτά που περιέχουν τη χερσαία ροή (Σχήμα 2-10). Η επιλογή της τιμής του κατωφλίου μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους και γι' αυτό θέτεται ως παράμετρος επιλογής του χρήστη. Στη συγκεκριμένη εργασία η τιμή αυτή προέκυψε ύστερα από τη διαδικασία της ρύθμισης.

0	0	0	0	0
0	3	2	2	0
0	0	11	0	1
0	0	1	15	0
0	2	5	24	1

Σχήμα 2-10: Επιλογή φατνίων με τιμή κατωφλίου 5.

(πηγή: Σκοπελίτη και Στάμου, 2006)

Το επόμενο στάδιο είναι η ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου και ο διαχωρισμός του σε τάξεις¹⁹ με βάση τη μέθοδο Strahler. Η τάξη των υδατορευμάτων αντανakλά το βαθμό στον οποίο αυτά διακλαδώνονται εντός της λεκάνης απορροής και συνεπώς βοηθά στην εύρεση του αριθμού των παραποτάμων, στην πυκνότητα δηλαδή του υδρογραφικού δικτύου.

¹⁹ Αυτό γίνεται μέσω του εργαλείου Stream order του Hydrology Toolset του λογισμικού ArcGIS.

Αφού το υδρογραφικό δίκτυο έχει χωριστεί σε τάξεις μπορεί η κάθε τάξη να πολλαπλασιαστεί με την αντίστοιχη ταχύτητα ροής (οι ταχύτητες ροής στη συγκεκριμένη εργασία έχουν παραμετροποιηθεί για να μπορούν να ορίζονται από το χρήστη) και έτσι να προκύψει ο κánaβος με τις ταχύτητες ροής του υδρογραφικού δικτύου (channel flow) (Σχήμα 2-11). Στα φατνία που δεν περιέχουν τιμές (χερσαία ροή) γίνεται αντικατάσταση της τιμής τους (No Data) με το 0 έτσι ώστε ο τελικός κánaβος ταχύτητας υδρογραφικού δικτύου να περιέχει τις τιμές της ταχύτητας του υδρογραφικού δικτύου και εκτός των φατνίων αυτών να περιέχει την τιμή 0.

Υπάρχει αμφισβήτηση στην καταλληλότητα του όρου «παράμετρος»²⁰ για τις σταθερές εισόδου όπως είναι η ταχύτητα ροής του υδρογραφικού δικτύου, αφού υποστηρίζεται ότι πρόκειται για ιδιότητες του φυσικού συστήματος, που μπορούν να είναι γνωστές από πληροφορίες πεδίου. Συχνά όμως, οι πληροφορίες αυτές είτε δεν είναι διαθέσιμες είτε προέρχονται από σημειακές μετρήσεις, που εξαιτίας της έντονης χωρικής ανομοιογένειας των χαρακτηριστικών της λεκάνης δεν είναι εφικτό να αναχθούν στη χωρική κλίμακα του μοντέλου, οσοδήποτε μικρή και αν είναι αυτή. Άρα η περιορισμένη χωρική πληροφορία οδηγεί στη χρήση εννοιολογικών μοντέλων, όπου η εκτίμηση ορισμένων τουλάχιστον χαρακτηριστικών μεγεθών, που υποτίθεται ότι αντιπροσωπεύουν μετρήσιμες ιδιότητες του φυσικού συστήματος, γίνεται θεωρώντας τα εν λόγω χαρακτηριστικά ως (άγνωστες) παραμέτρους.

²⁰ Οι παράμετροι των εννοιολογικών υδρολογικών μοντέλων δεν είναι μετρήσιμα μεγέθη αλλά εκτιμούνται έμμεσα, μέσω μιας συστηματικής διαδικασίας αξιολόγησης εναλλακτικών συνδυασμών που καλείται βαθμονόμηση (calibration). Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου γίνεται συγκρίνοντας τις προσομοιωμένες αποκρίσεις της λεκάνης με τις παρατηρημένες, και επιλέγοντας τον συνδυασμό εκείνο που επιτυγχάνει την καλύτερη προσαρμογή. Προφανώς, αυτό προϋποθέτει ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απόκρισης της λεκάνης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών με τα προσομοιωμένα δεδομένα.

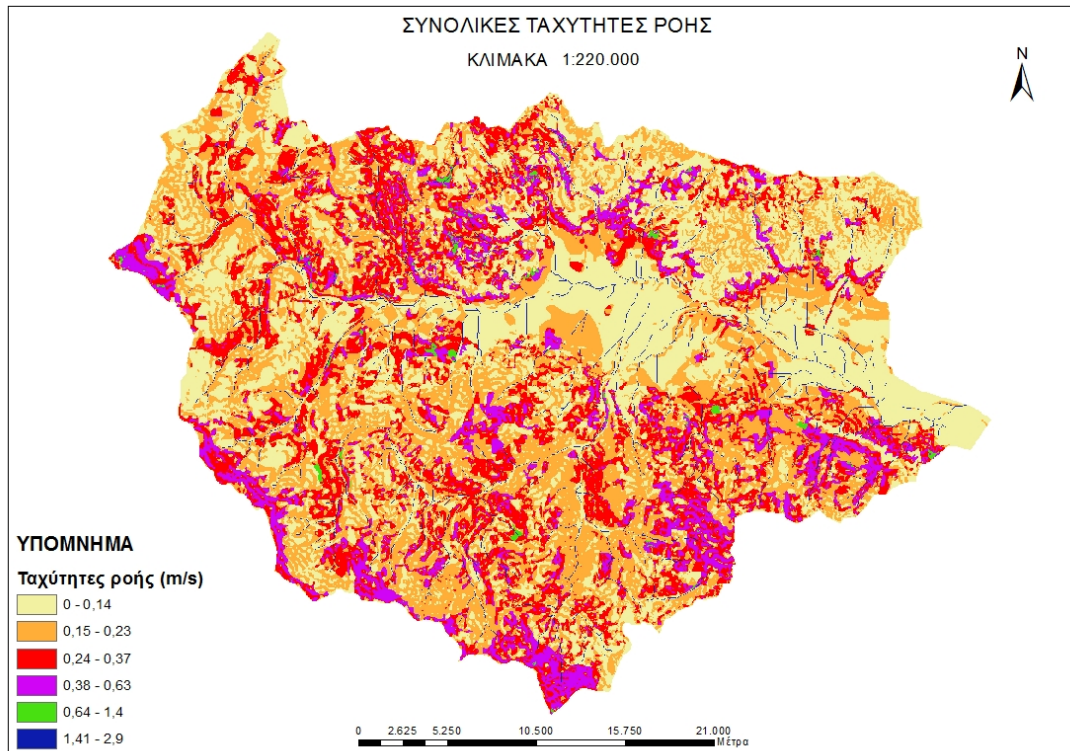


*Σχήμα 2-11: Απεικόνιση ταχυτήτων ροής υδρογραφικού δικτύου
(πηγή: Ιδία επεξεργασία)*

2.5.3 Υπολογισμός Ισόχρονων καμπυλών

Το επόμενο βήμα της διαδικασίας είναι η δημιουργία του κανάβου των αθροιστικών ταχυτήτων ροής (velocity), δηλαδή της χερσαίας ροής αλλά και αυτής του υδρογραφικού δικτύου (overland flow και channel flow). Για να γίνει αυτό γίνεται η αριθμητική πράξη της πρόσθεσης των δύο κανάβων της χερσαίας και της υδρογραφικής ροής (raster αρχεία)²¹ (Σχήμα 2-12).

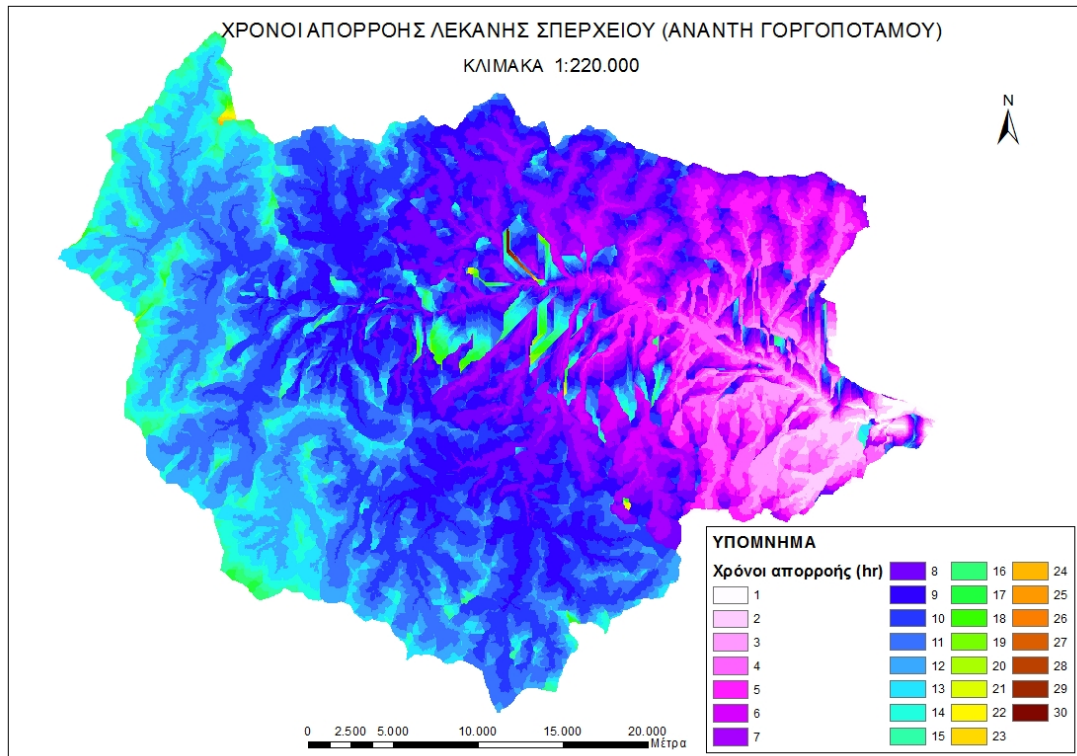
²¹ Η πράξη αυτή έγινε μέσω του Raster Calculator του Toolset Map Algebra, του λογισμικού ArcGIS το οποίο επιτρέπει τις αριθμητικές πράξεις μεταξύ ψηφιδωτών αρχείων και αριθμών.



*Σχήμα 2-12: Απεικόνιση συνολικών ταχυτήτων λεκάνης απορροής
(πηγή: Ιδία επεξεργασία)*

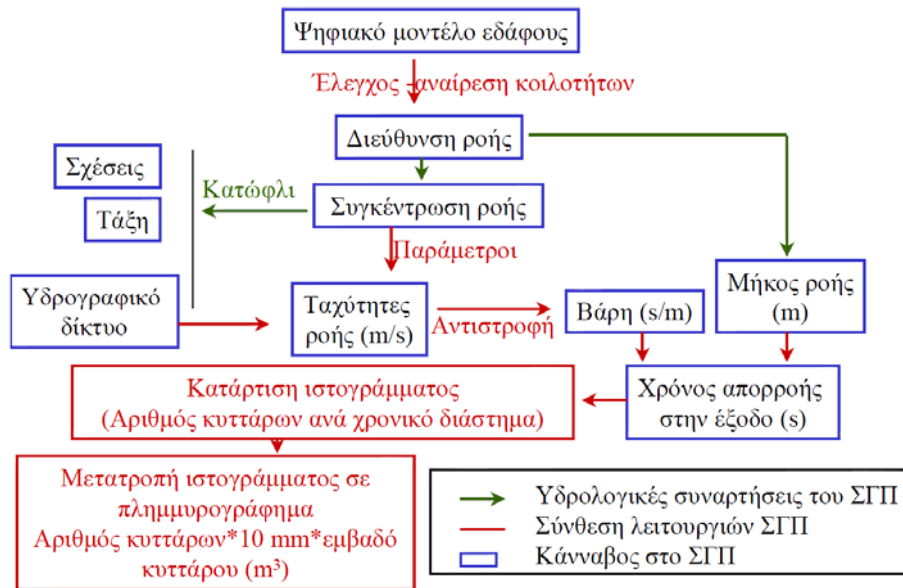
Στη συνέχεια υπολογίζεται ο κánaβος συγκεντρωτικών χρόνων ροής, δηλαδή του χρόνου που κάνει το κάθε φατνίο μέχρι την έξοδο της λεκάνης. Η διαδικασία αυτή γίνεται με την εντολή flow length²² η οποία υπολογίζει το μήκος διαδρομής του κάθε φατνίου μέχρι την έξοδο της λεκάνης λαμβάνοντας υπόψη την κατεύθυνση ροής (flow direction) που έχει υπολογιστεί σε προηγούμενο βήμα. Για τον υπολογισμό των χρόνων ροής εισάγεται στην εντολή flow length μια παράμετρος ως βάρος (weight raster) η οποία είναι το αντίστροφο της ταχύτητας (velocity). Συνεπώς όταν γίνεται ο υπολογισμός του μήκους διαδρομής πολλαπλασιασμένο με το αντίστροφο της ταχύτητας γίνεται ο υπολογισμός του χρόνου ροής του κάθε φατνίου. Επομένως σχηματίζονται οι ισόχρονες καμπύλες οι οποίες αποτυπώνουν το γεωμετρικό τόπο των σημείων που ισαπέχουν χρονικά από την έξοδο της λεκάνης (Σχήμα 2-13).

²² Το εργαλείο αυτό βρίσκεται στο Hydrology Toolset του Spatial Analyst Tools του λογισμικού ArcGIS.



*Σχήμα 2-13: Απεικόνιση χρόνων απορροής Σπερχειού (Ανάντη Γοργοποτάμου)
(πηγή: Ιδία επεξεργασία)*

Από αυτόν τον κάρναβο προκύπτει το ιστόγραμμα χρόνου - επιφάνειας, ανάλογα με το χρονικό βήμα που επιλέγει ο χρήστης. Αθροίζονται τα εμβαδά των επιμέρους τμημάτων μεταξύ των ισόχρονων καμπυλών και προκύπτει το ιστόγραμμα χρόνου - επιφάνειας που απεικονίζει το μέγεθος της λεκάνης που αποφορτίζεται στην έξοδο, σε κάθε χρονικό βήμα.



Σχήμα 2-14: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου χρόνου – επιφάνειας.

(πηγή: Μαμάσης, 2007)

2.6 Μέθοδος υπολογισμού της παροχής

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε και μια ακόμη μέθοδος για τον υπολογισμό της παροχής στην έξοδο της λεκάνης. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ως δεδομένο εισόδου το αρχείο με τους χρόνους απορροής του κάθε εικονοστοιχείου που δημιουργείται από την μέθοδο χρόνου – επιφάνειας (ισόχρονες καμπύλες). Το αρχικό δεδομένο εισόδου συνεπώς που απαιτείται είναι ένα ψηφιδωτό αρχείο (raster) του οποίου κάθε εικονοστοιχείο (pixel) έχει την τιμή του χρόνου (σε ώρες) στον οποίο το εικονοστοιχείο αυτό θα απορρεύσει από την έξοδο της λεκάνης.

Από τα βροχόμετρα και τους βροχογράφους λαμβάνονται μετρήσεις βροχόπτωσης οι οποίες όμως είναι σημειακές και συνεπώς αντιπροσωπεύουν το σημείο στο οποίο μετρήθηκε η βροχόπτωση. Στη συγκεκριμένη εργασία, ιδιαίτερη σημασία έχει η επιφανειακή βροχόπτωση, η βροχόπτωση δηλαδή που πέφτει σε ολόκληρη τη λεκάνη απορροής. Για να υπολογιστεί η επιφανειακή βροχόπτωση σε μία λεκάνη απορροής εγκαθίσταται δίκτυο βροχογράφων, οι θέσεις των οποίων θα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να περιγράφουν όσο το δυνατόν καλύτερα τη χωρική διαφοροποίηση της βροχής. Κατόπιν, οι σημειακές μετρήσεις των βροχογράφων

ανάγονται σε επιφανειακή βροχόπτωση της λεκάνης απορροής χρησιμοποιώντας μεθόδους επιφανειακής ολοκλήρωσης.

Υπάρχει πληθώρα μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης. Αυτές μπορούν να διαχωριστούν στις μεθόδους άμεσης ολοκλήρωσης και στις μεθόδους προσαρμογής επιφάνειας (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος 1997). Οι μέθοδοι άμεσης ολοκλήρωσης υπολογίζουν την επιφανειακή βροχόπτωση απευθείας, από τις τιμές της σημειακής βροχόπτωσης. Οι πιο γνωστές μέθοδοι που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι η μέθοδος του μέσου όρου, η μέθοδος Thiessen, η μέθοδος δυο αξόνων του Bethlahmy και η μέθοδος βέλτιστης ολοκλήρωσης (Kriging). Αντίθετα οι μέθοδοι προσαρμογής επιφάνειας εκτιμούν πρώτα τη γεωγραφική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης στην υπό εξέταση περιοχή και με βάση αυτή, υπολογίζουν την επιφανειακή βροχόπτωση. Εδώ ανήκουν η μέθοδος των ισοϋέτιων, η μέθοδος υπολογιστικής γραμμικής παρεμβολής η μέθοδος της αντίστροφης απόστασης, η μέθοδος πολυτετραγωνικής παρεμβολής η μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων με πολυώνυμα, η μέθοδος πολυωνύμων Lagrange, η μέθοδος προσαρμογής spline και η μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής. Ανεξάρτητα από τη μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί, η αξιοπιστία του τελικού αποτελέσματος εξαρτάται πρωτίστως από την πυκνότητα της σημειακής πληροφορίας: Όσο πυκνότερο είναι το δίκτυο των βροχομετρικών σταθμών τόσο πιο επιτυχημένη είναι η ολοκλήρωση.

Για τη μέθοδο υπολογισμού της παροχής είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός αρχείου που να περιλαμβάνει τους βροχομετρικούς σταθμούς της περιοχής μελέτης καθώς και τις μετρημένες τιμές ωριαίας βροχόπτωσης (σε χιλιοστά) του καθενός από αυτούς. Με το δεδομένο αυτό δημιουργείται ένα αρχείο επιφανειακής βροχόπτωσης για την περιοχή μελέτης με βάση τις μετρημένες τιμές του κάθε βροχομετρικού σταθμού με την παρεμβολή της σταθμισμένης αντίστροφης απόστασης (Inverse distance weighted).

2.6.1 Inverse Distance Weighted²³

Η παρεμβολή της σταθμισμένης αντίστροφης απόστασης καθορίζει τις τιμές των εικονοστοιχείων (pixels) χρησιμοποιώντας γραμμικά σταθμισμένους συνδυασμούς ενός συνόλου σημείων δειγματοληψίας, στη συγκεκριμένη περίπτωση τους βροχομετρικούς σταθμούς. Το βάρος που χρησιμοποιεί η παρεμβολή είναι το αντίστροφο της απόστασης μεταξύ του συνόλου των σημείων. Η παρεμβολή γίνεται με βάση τη σχέση:

$$h = \frac{d_1^{-k}}{\sum_{n=1}^N d_n^{-k}} h_1 + \frac{d_2^{-k}}{\sum_{n=1}^N d_n^{-k}} h_2 + \dots + \frac{d_N^{-k}}{\sum_{n=1}^N d_n^{-k}} h_N \quad (2.2)$$

όπου: h η μεταβλητή της τιμής στη ζητούμενη θέση,

N ο αριθμός των σημείων που συμμετέχουν

h_1, h_2, \dots, h_N οι σημειακές μετρήσεις στα σημεία 1, 2, ..., N

d_1, d_2, \dots, d_N οι αποστάσεις του κυττάρου από τα σημεία 1, 2, ..., N

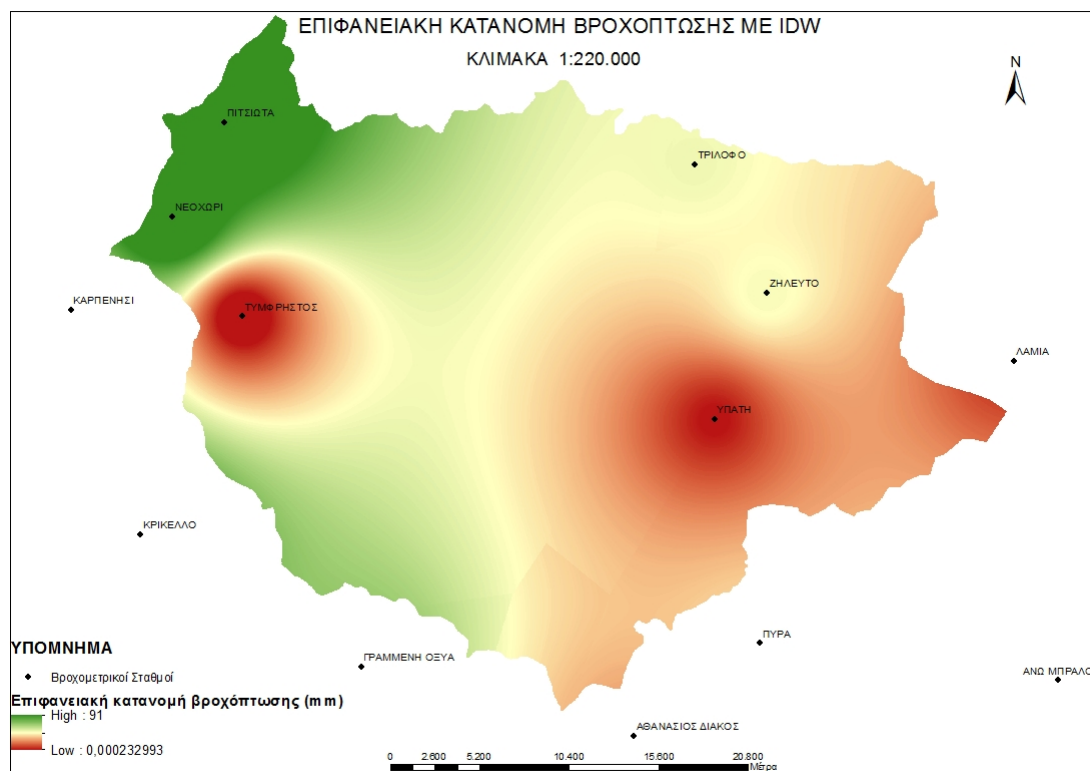
k ο συντελεστής επιρροής της απόστασης

Η τιμή του εκθέτη k συνήθως λαμβάνεται ίση με 1 ή 2 (Dingman, 1994).

Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει ότι η μεταβλητή η οποία χαρτογραφείται, δηλαδή η βροχόπτωση, μειώνεται ανάλογα με την απόσταση από την θέση του δείγματος. Αυτό συμβαίνει καθώς συνήθως οι βροχομετρικοί σταθμοί τοποθετούνται σε καίρια σημεία όπου θα δέχονται τη μέγιστη βροχόπτωση και συνεπώς με τη μέθοδο αυτή μπορεί να γίνει παρεμβολή μεταξύ τους και να δημιουργηθεί μια επιφάνεια που θα απεικονίζει το ποσό της βροχόπτωσης που δέχεται σε κάθε σημείο (Σχήμα 2-15).

²³ Philip, G. M., and D. F. Watson. "A Precise Method for Determining Contoured Surfaces." Australian Petroleum Exploration Association Journal, 1982.

Watson, D. F., and G. M. Philip. "A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation." Geoprocessing, 1985.



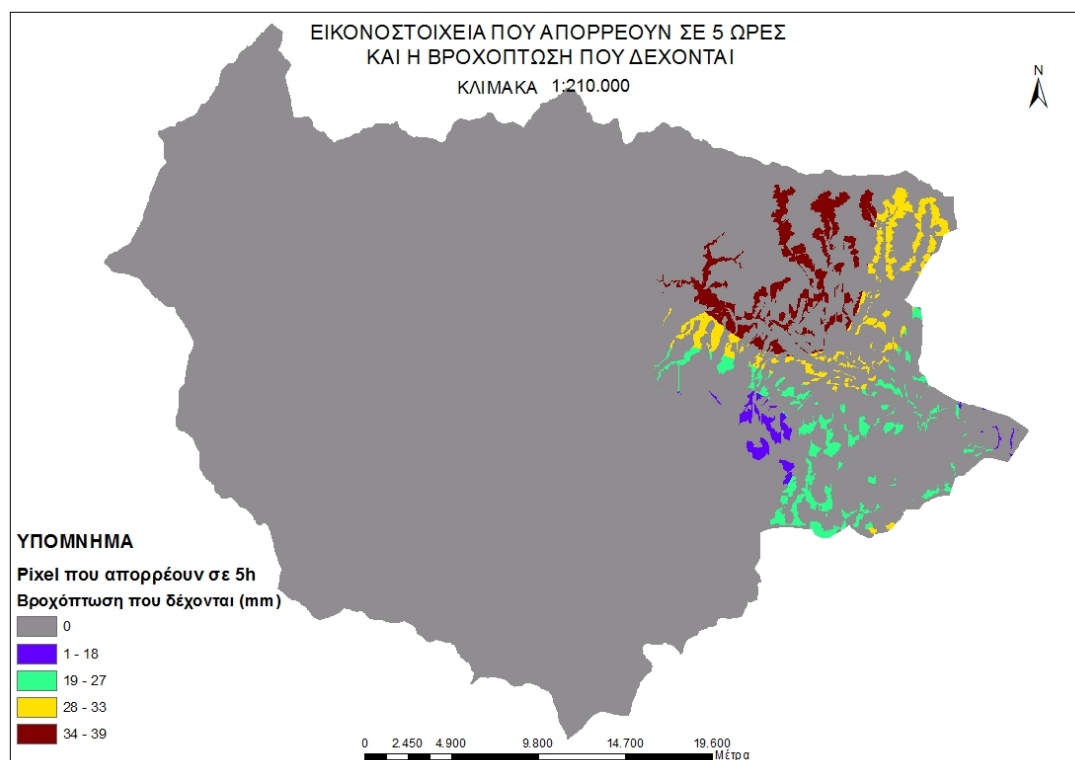
*Σχήμα 2-15: Επιφανειακή κατανομή βροχόπτωσης με την παρεμβολή IDW
(πηγή: Ιδία επεξεργασία)*

2.6.2 Υπολογισμός παροχής

Το επόμενο βήμα της μεθόδου, αφού έχει υπολογιστεί η επιφανειακή κατανομή της βροχόπτωσης, είναι βρεθούν και να απεικονιστούν τα εικονοστοιχεία εκείνα τα οποία απορρέουν την πρώτη ώρα. Αυτό γίνεται με την εντολή equal to η οποία θα απεικονίσει από το αρχείο με τους χρόνους απορροής μόνο τα στοιχεία εκείνα τα οποία έχουν χρόνο απορροής μία ώρα.

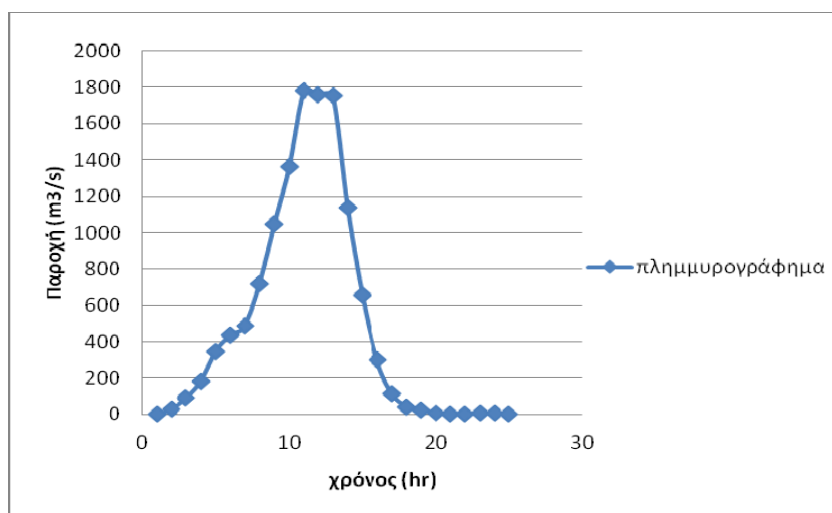
Στη συνέχεια αφού έχουν επιλεγεί μόνο τα εικονοστοιχεία που απορρέουν την πρώτη ώρα γίνεται ένας πολλαπλασιασμός του επιπέδου αυτού με την επιφανειακή κατανομή της βροχόπτωσης. Το αποτέλεσμα του γινομένου αυτού είναι η απεικόνιση των στοιχείων που απορρέουν σε μία ώρα αλλά το καθένα από τα οποία περιέχει και πληροφορία για το ποσό της βροχόπτωσης που δέχεται (Σχήμα 2-16). Συνεπώς αν τα χιλιοστά αυτά της βροχόπτωσης πολλαπλασιασθούν με τις διαστάσεις του κάθε

εικονοστοιχείου και αθροιστούν μεταξύ τους υπολογίζεται η παροχή που εμφανίζεται στην έξοδο της λεκάνης την πρώτη ώρα.



*Σχήμα 2-16: Απεικόνιση των rixel που απορρέουν σε 5 ώρες και η βροχόπτωση που δέχονται.
(πηγή: Ιδία επεξεργασία)*

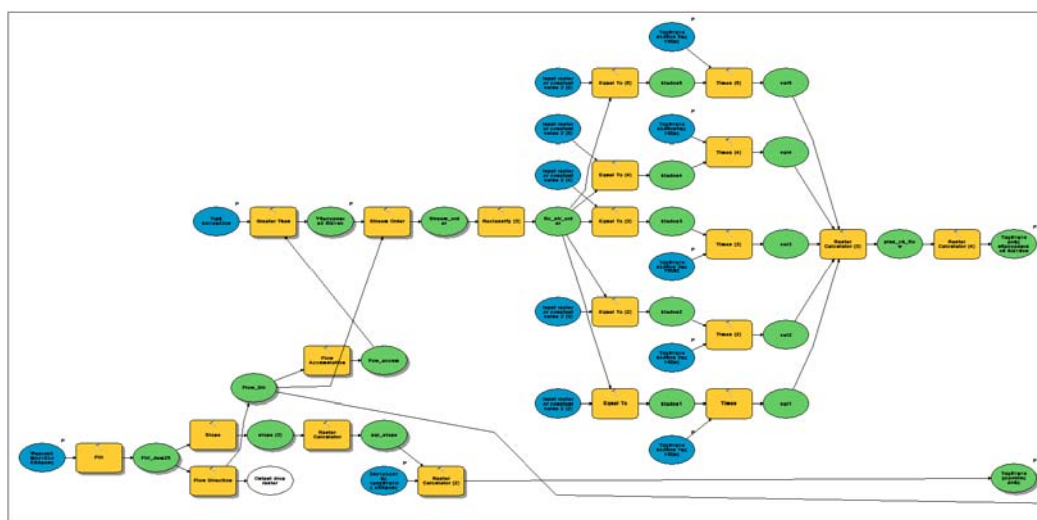
Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και για τις επόμενες ώρες ορίζοντας κάθε φορά την ώρα της απορροής (1^η, 2^η, 3^η κ.ο.κ) και δημιουργείται έτσι ένας πίνακας που περιέχει τις ώρες απορροής και την παροχή που εμφανίζεται στην έξοδο της λεκάνης για την κάθε ώρα. Από τον πίνακα αυτόν μπορεί να δημιουργηθεί το αντίστοιχο γράφημα το οποίο είναι και το αντίστοιχο πλημμυρογράφημα για τη συγκεκριμένη ωριαία βροχόπτωση (Σχήμα 2-17).



Σχήμα 2-17: Ενδεικτικό πλημμυρογράφημα από εφαρμογή της μεθόδου υπολογισμού της παροχής

2.7 Model Builder

Το Model Builder είναι ένα περιβάλλον του λογισμικού ArcGIS. Μέσω της εφαρμογής αυτής ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει, να διορθώσει και να διαχειριστεί μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούν μια σειρά εργαλείων για να επιτύχουν ένα συγκεκριμένο σκοπό (Σχήμα 2-18).



Σχήμα 2-18: Παράδειγμα δημιουργίας μοντέλου με την εφαρμογή Model Builder (πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Η εφαρμογή αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη καθώς επιτρέπει στο χρήστη την άμεση εποπτεία όλων των διεργασιών που εκτελούνται ενώ η διαδικασία της χωρικής ανάλυσης αυτοματοποιείται. Ο χρήστης έχει τον πλήρη έλεγχο των δεδομένων αλλά και των διεργασιών που εκτελούνται. Σημαντικό στοιχείο της εφαρμογής αυτής είναι η δημιουργία παραμέτρων, μέσω της οποίας ο χρήστης μπορεί να πειραματίζεται με αυτές και να έχει άμεση εποπτεία της επίδρασής τους.

Μέσω του Model Builder ο χρήστης μπορεί να χτίσει ένα μοντέλο από την αρχή το οποίο θα εκτελεί κάποια διαδικασία, να το παραμετροποιήσει και να το χρησιμοποιήσει για διαφορετικά δεδομένα και διαφορετικές παραμέτρους όσες φορές θέλει. Η εφαρμογή αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για πειραματισμό με διαφορετικά αρχικά δεδομένα και διαφορετικές παραμέτρους αφού προσφέρει την αυτοματοποίηση της διαδικασίας με πλήρη έλεγχο του χρήστη. Επίσης προσφέρει τη δυνατότητα της επαναληπτικής διαδικασίας αυτόματα έτσι ώστε να μειώνει σημαντικά το χρόνο ανάλυσης για το χρήστη.

Η εφαρμογή αυτή είναι ιδιαίτερα φιλική προς το χρήστη και εύκολη στη χρήση της καθώς βασίζεται στην οπτικοποίηση της σειράς των διεργασιών και των επί μέρους σχέσεων μεταξύ τους. Επίσης μειώνει το χρόνο της χωρικής ανάλυσης και μπορεί μέσω επεξεργασίας να χρησιμοποιηθεί και για διαφορετικές εφαρμογές με άλλα δεδομένα. Το model Builder επιτρέπει και την δημιουργία περιγραφής του σκοπού του κάθε μοντέλου αλλά και των διαδικασιών του έτσι ώστε το κάθε μοντέλο να μπορεί εύκολα να κοινοποιηθεί και να χρησιμοποιηθεί από περισσότερους από έναν χρήστες.

Στη συγκεκριμένη εργασία η εφαρμογή του Model Builder ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη καθώς όλες οι διεργασίες ενσωματώθηκαν σε παραμετροποιημένα μοντέλα τα οποία ύστερα μπορούσαν να αναπαραχθούν εύκολα με νέα δεδομένα. Πρόσφερε σημαντική μείωση του χρόνου ανάλυσης και εύκολο πειραματισμό με τις τιμές των παραμέτρων για τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Επίσης μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας που προσφέρει ήταν δυνατό να παραχθούν σειρές αποτελεσμάτων εύκολα που διαφορετικά θα ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρο για το χρήστη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ

3.1 Γεωγραφική θέση Σπερχειού ποταμού

Ο Σπερχειός είναι ποταμός της Στερεάς Ελλάδας και έχει μήκος 82 χιλιόμετρα. Πηγάζει από το βουνό Τυμφρηστός (Βελούχι) της Ευρυτανίας και, με γενική κατεύθυνση της τα ανατολικά, εισέρχεται στη Φθιώτιδα, διασχίζει την ομώνυμη κοιλάδα (Κοιλάδα του Σπερχειού), ανάμεσα στην Οίτη και στη δυτική προέκταση του όρους Όθρυς, και χύνεται στον Μαλιακό Κόλπο.

Η κύρια μισγάγγεια του Σπερχειού ξεκινά από της ανατολικές κλιείς του Τυμφρηστού, στη θέση Άγιος Γεώργιος, και έχει μήκος 85.9 km. Πρόκειται για τεκτονικό βύθισμα, με διεύθυνση Δ-Α και με μεταβλητό πλάτος 3-12 km. Η κοιλάδα του Σπερχειού εγκλείεται μεταξύ δύο οροσειρών, με απότομο ανάγλυφο στη νότια πλευρά και ήπιο και χαμηλό της τη θάλασσα. Η κύρια κοίτη τροφοδοτείται από 63 συνολικά χείμαρρους μόνιμης και περιοδικής παροχής, οι λεκάνες απορροής των περισσότερων έχουν έκταση μεγαλύτερη των 25 km². Οι κυριότεροι εξ αυτών είναι ο Ρουσιανίτης, η Βίστρισα, ο Γοργοπόταμος, ο Ασωπός και ο Ξηριάς Λαμίας. Κατά τα 2/3 του μήκους της, η κοιλάδα του Σπερχειού εμφανίζει έντονες κλίσεις, που δίνουν στον ποταμό χαρακτήρα ορεινό - χειμαρρικό, με οξείες αιχμές πλημμυρών και έντονη στερεοπαροχή. Αντίθετα, κατά το τελευταίο 1/3 της διαδρομής του ο Σπερχειός μετατρέπεται σταδιακά σε πεδινό ποταμό και διασχίζει χαμηλές περιοχές, όπου προκαλεί συχνά σημαντικές πλημμύρες. Ο ποταμός παρουσιάζει έντονο μαιανδρισμό από τη θέση της σιδηροδρομικής γέφυρας μέχρι το έργο μερισμού και κατά μήκος της κοίτης της Αλαμάνας μέχρι της εκβολή της στο Μαλιακό Κόλπο. Το πεδινό τμήμα της κοιλάδας του Σπερχειού αποτελείται εξ ολοκλήρου από τεταρτογενείς και αλλουβιακές αποθέσεις. Το δελταϊκό προσχωσιγενές τμήμα της κοιλάδας έχει έκταση σχεδόν 200 km² και διαμορφώνεται συνεχώς, με ρυθμό μοναδικό σε δυναμικότητα σε όλη την Ελλάδα.

3.2 Λεκάνη απορροής Σπερχειού

3.2.1 Γεωμετρία – Ανάγλυφο

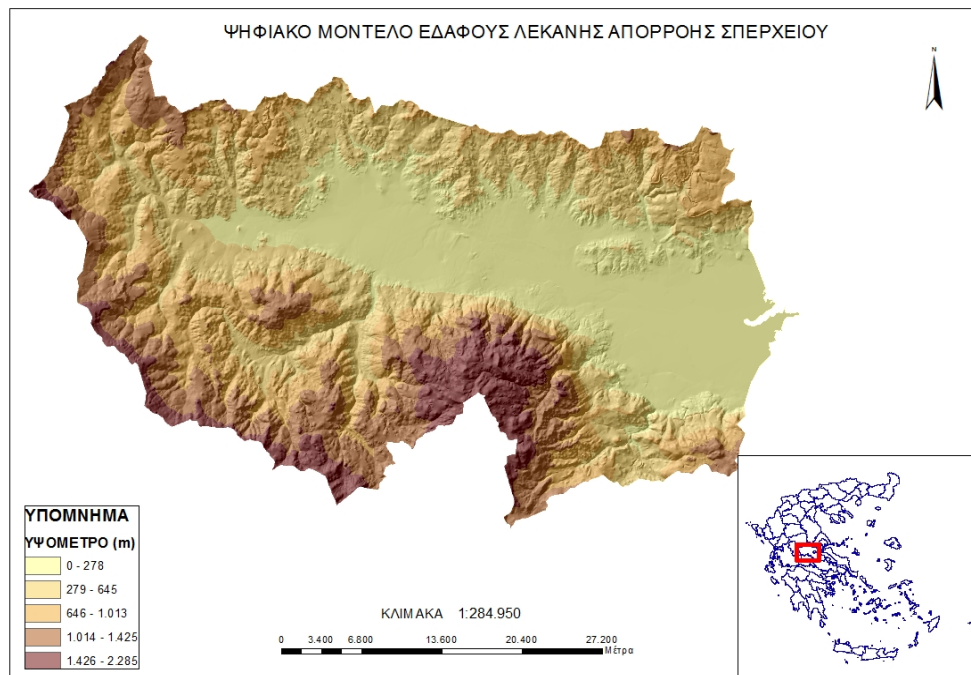
Το σχήμα της λεκάνης απορροής του Σπερχειού ποταμού, της άλλωστε και όλων των λεκανών απορροής είναι πολύπλοκο και δεν περιγράφεται εύκολα από κάποιο γεωμετρικό σχήμα. Το σχήμα της λεκάνης της είναι στενόμακρο με διεύθυνση Α-Δ. Η γεωμετρία της λεκάνης περιγράφεται από κάποια βασικά χαρακτηριστικά της, οι τιμές των οποίων έχουν γίνει απευθείας από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους. Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους που χρησιμοποιήθηκε για τη λεκάνη απορροής του Σπερχειού ποταμού ήταν ανάλυσης 25x25 m (πηγή: Τομέας Υδατικών Πόρων ΕΜΠ).

Εμβαδόν: 1660 km²

Περίμετρος: 247640 m

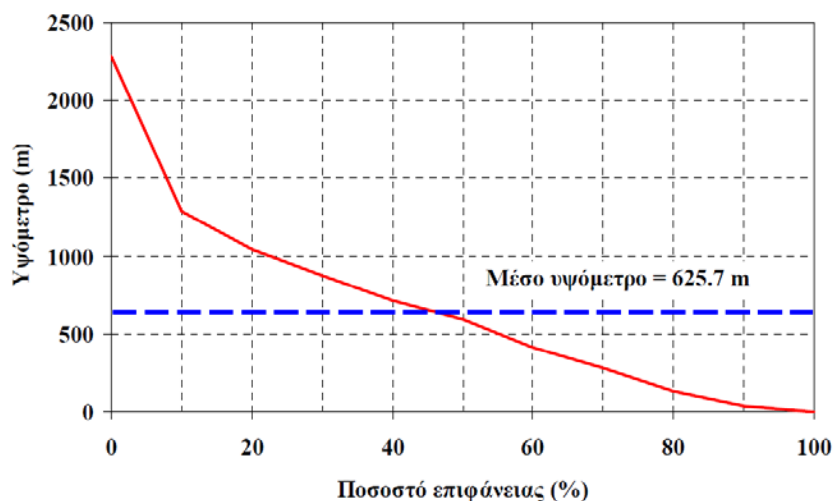
Μήκος Λεκάνης: 65,4 km

Μήκος κύριου Υδατορεύματος: 82 km



*Σχήμα 3-1: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους λεκάνης απορροής Σπερχειού ποταμού.
(πηγή: Ιδία επεξεργασία)*

Το ανάγλυφο της λεκάνης απορροής περιγράφεται από την υψομετρική καμπύλη, δηλαδή την καμπύλη η οποία σε κάθε δεδομένη τιμή του τοπογραφικού υψόμετρου αντιστοιχίζει το ποσοστό της επιφάνειας της λεκάνης που έχει υψόμετρο μεγαλύτερο ή ίσο της δεδομένης τιμής (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).



*Σχήμα 3-2: Καμπύλη υψόμετρων λεκάνης απορροής Σπερχειού ποταμού
(πηγή: Κουτσογιάννης κ.α., 2003)*

Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του ανάγλυφου της λεκάνης απορροής του Σπερχειού ποταμού είναι το:

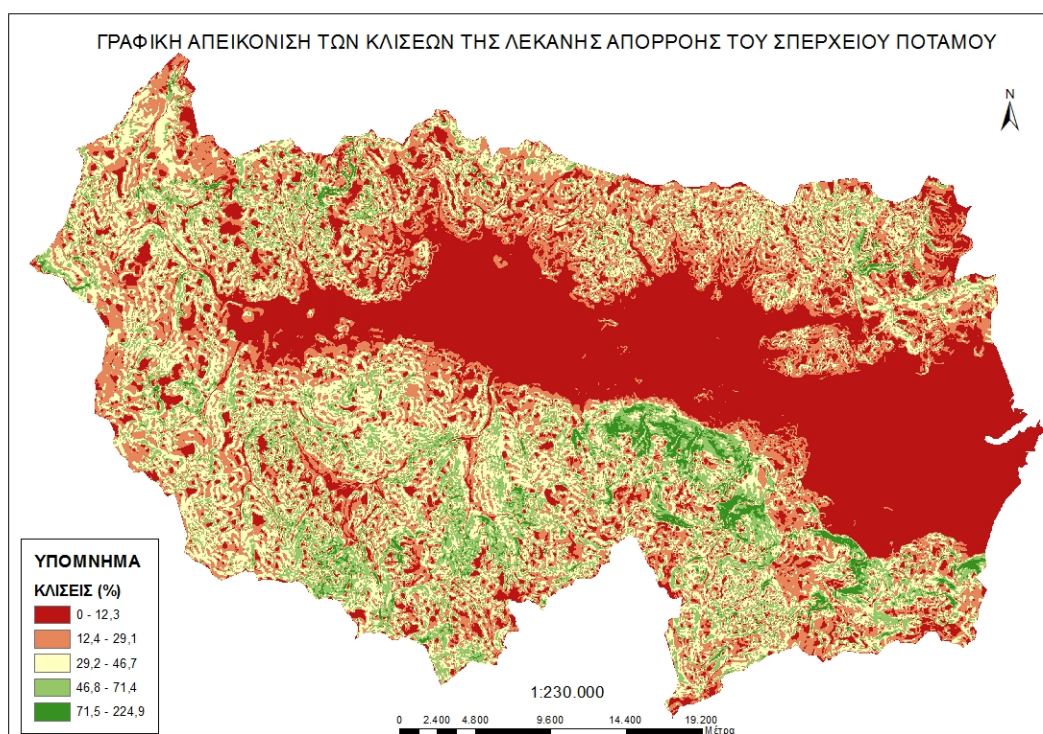
Μέγιστο Υψόμετρο λεκάνης: 2285 m

Μέσο Υψόμετρο λεκάνης: 625.7 m

Ελάχιστη κλίση: 0 %

Μέγιστη κλίση: 224,8 %

Μέση κλίση: 24,7 %

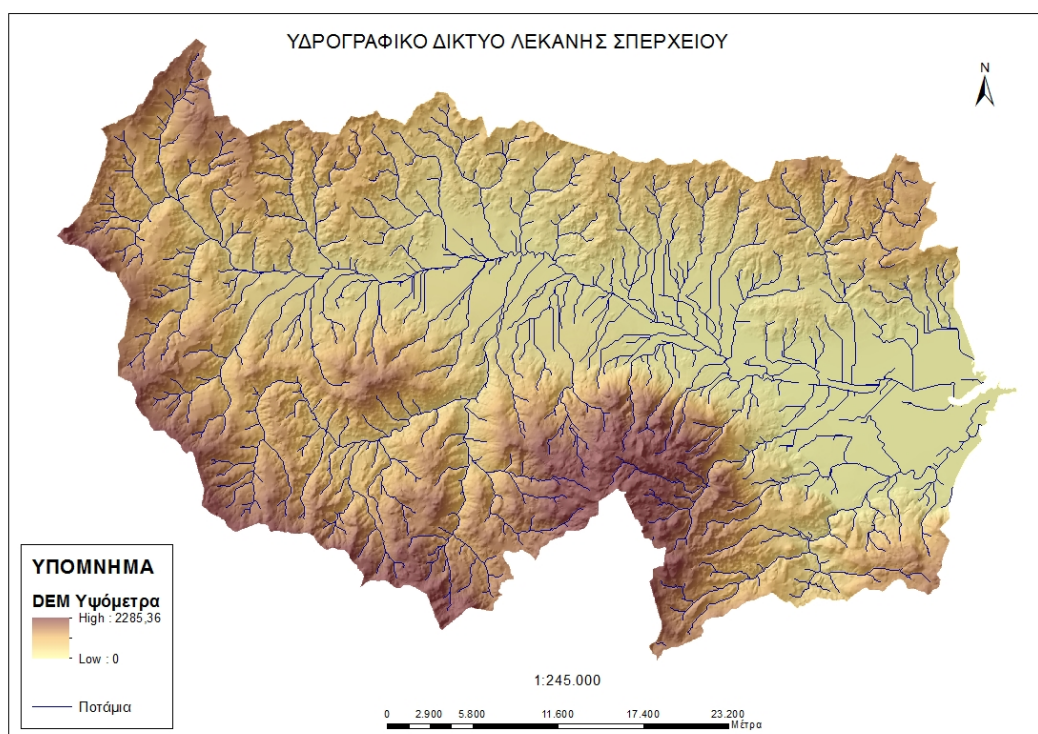


Σχήμα 3-3: Γραφική απεικόνιση των κλίσεων της λεκάνης απορροής του Σπερχειού ποταμού (πηγή: Ιδία επεξεργασία)

3.2.2 Υδρογραφικό Δίκτυο

Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του Σπερχειού είναι πλούσιο, γεγονός που οφείλεται στη μορφολογία της περιοχής και της άφθονες βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις. Ο υδροκρίτης της λεκάνης ορίζεται δυτικά από το όρος Τυμφρηστός, βόρεια από το όρος Όθρυς, και νότια από της ορεινούς όγκους των Βαρδουσιών, της Οίτης και του Καλλίδρομου. Η συνολική έκταση της λεκάνης απορροής είναι 1829.5 km². Για τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιήθηκε κατώφλι 1600 φατνίων στον κλίμακα συγκέντρωσης ροής (flow accumulation), το οποίο προέκυψε από την ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, έτσι ώστε η έκταση απορροής να είναι περίπου 1 km². Η τιμή αυτή του κατωφλίου προέκυψε και με σύγκριση με την πραγματική κατάσταση του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής έτσι ώστε να υπάρχει βελτιστοποίηση και ομοιογένεια με την πραγματικότητα. Τα φατνία που έχουν τιμή μικρότερη από την τιμή αυτή διαγράφονται κι έτσι τα φατνία που μένουν αποτελούν το υδρογραφικό δίκτυο, διαχωρίζονται δηλαδή τα φατνία όπου

σχηματίζεται η ροή του υδρογραφικού δικτύου από αυτά που περιέχουν τη χερσαία ροή.



Σχήμα 3-4: Γραφική αναπαράσταση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής του Σπερχειού ποταμού (πηγή: Ιδία επεξεργασία)

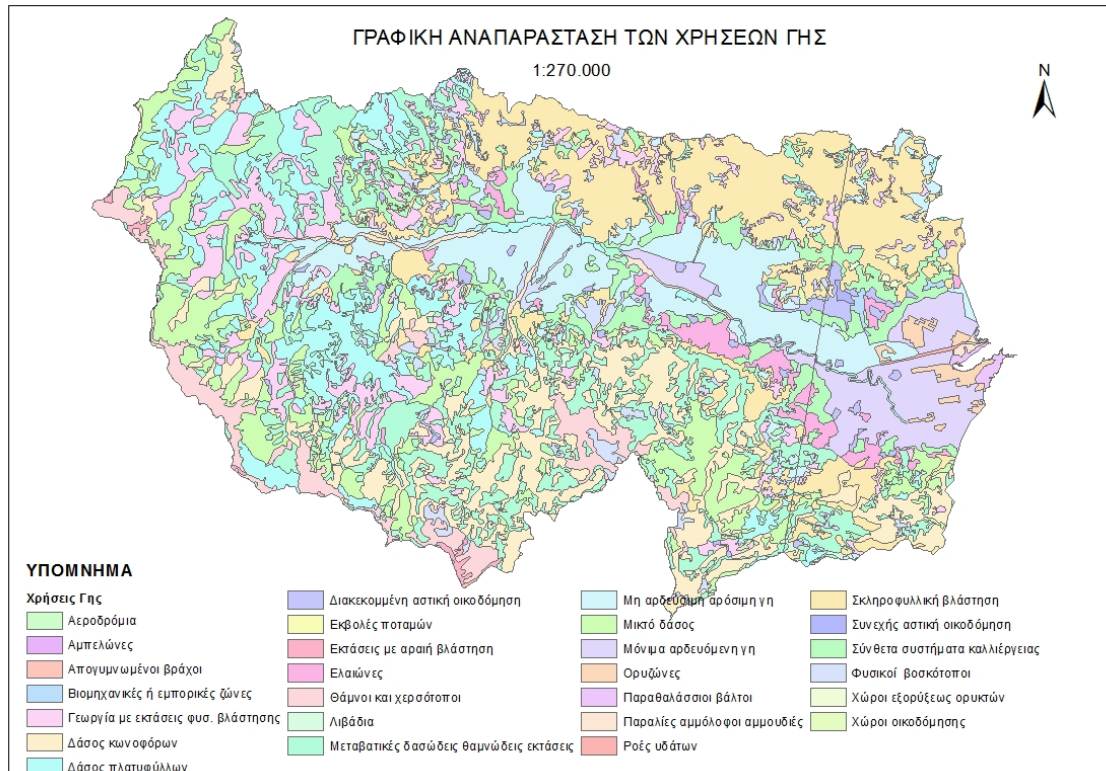
3.2.3 Χρήσεις Γης

Ο χάρτης χρήσεων γη προέρχεται από το πρόγραμμα Corine Land Cover 2000 του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος. Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή κωδικοποίηση Corine, η εδαφική κάλυψη στην Ευρώπη κατηγοριοποιείται σε 44 κατηγορίες, χρησιμοποιώντας χάρτες με κλίμακα 1:100.000. Οι κατηγορίες που απαντώνται στην λεκάνη του Σπερχειού είναι 27 (Πίνακας 1). Παρατηρείται πως στη συγκεκριμένη περιοχή η χρήση γης που υπερτερεί είναι η σκληροφυλλική βλάστηση με ποσοστό περίπου 25% ενώ σημαντικό ποσοστό επιφανείας κατέχουν και οι δασικές περιοχές (δάσος πλατύφυλλων, κωνοφόρων και μικτό δάσος).

Κάθε χρήση γης αντιστοιχίζεται με ένα συντελεστή τραχύτητας του εδάφους έτσι ώστε να υπολογίζεται η ταχύτητα ροής των υδάτων. Στη συγκεκριμένη εργασία ορίστηκαν 6 τιμές του συντελεστή τραχύτητας και κατανεμήθηκαν ανάλογα της διάφορες κατηγορίες χρήσεων γης. Σε γενικές γραμμές η αστική δόμηση και οι βιομηχανικές περιοχές αντιστοιχήθηκαν με υψηλό συντελεστή τραχύτητας, 200, με συντελεστή τραχύτητας 100 και 90 αντιστοιχήθηκαν οι απογυμνωμένοι βράχοι, οι εκβολές των ποταμών, οι αμπελώνες και οι οριζώνες, με μέτριο συντελεστή τραχύτητας, 50 και 70 αντιστοιχήθηκαν οι περιοχές με μερική γεωργία, τα λιβάδια και οι εκτάσεις με φυσική βλάστηση ενώ τέλος μικρό συντελεστή τραχύτητας βαθμολογήθηκαν οι περιοχές που καλύπτονται από δάση και σκληροφυλλική βλάστηση.

Χρήση Γης	Ποσοστό Επιφάνειας (%)	Συντελεστής τραχύτητας
Συνεχής αστική οικοδόμηση	0,04	200
Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0,80	200
Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0,10	200
Αεροδρόμια	0,01	200
Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	7,66	90
Μόνιμα αρδευόμενη γη	3,54	70
Οριζώνες	0,49	90
Αμπελώνες	0,02	90
Ελαιώνες	1,55	90
Λιβάδια	0,16	70
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας κυρίως γεωργία με φυσική βλάστηση	4,23 6,01	90 50
Δάσος πλατυφύλλων	10,27	25
Δάσος κωνοφόρων	11,24	25
Μικτό δάσος	8,72	25
Θάμνοι και χερσότοποι	4,04	70
Σκληροφυλλική βλάστηση	24,75	25
Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	13,19	50
Παραλίες αμμόλοφοι αμμουδιές	0,44	100
Απογυμνωμένοι βράχοι	0,03	100
Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	0,41	50
Παραθαλάσσιοι βάλτοι	0,31	100
Ροές υδάτων	0,07	100
Εκβολές ποταμών	0,01	100
Χώροι εξορύξεως ορυκτών	0,11	100
Χώροι οικοδόμησης	0,05	200
Φυσικοί βοσκότοποι	1,76	70
ΣΥΝΟΛΟ	100	

Πίνακας 3-1: Χρήσεις γης σε συνάρτηση με το συντελεστή τραχύτητας του εδάφους στην περιοχή μελέτης



Σχήμα 3-5: Χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής του Σπερχειού ποταμού

(πηγή: Ιδία επεξεργασία)

3.2.4 Γεωλογία

Η λεκάνη απορροής του Σπερχειού αποτελείται από συμπαγείς και προσχωσιγενείς σχηματισμούς οι οποίοι έχουν σχηματίσει ένα έντονο μορφολογικό ανάγλυφο. Η λεκάνη χωρίζεται σε τρεις μεγάλες Λιθολογικές ενότητες (Μαρουκιάν και Παυλόπουλος, 1995):

- στη βόρεια-βορειοανατολική, όπου απαντούν ασβεστόλιθοι, οφιόλιθοι και σχιστοκερατόλιθοι της Υποπελαγονικής ενότητας
- στη νότια-νοτιοανατολική, όπου απαντούν ασβεστόλιθοι της ενότητας Παρνασσού-Γκιώνας
- στη δυτική, όπου απαντούν αποκλειστικά ο φλύσχης και η κλαστική ακολουθία της ενότητας της Πίνδου.

Από υδρογεωλογικής πλευράς, η λεκάνη απορροής του Σπερχείου καλύπτεται από αδιαπέρατους, ημιπερατούς, προσχωματικούς και καρστικούς σχηματισμούς, σε ποσοστά 62.6%, 0.2%, 20.5% και 16.7% αντίστοιχα της φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

Ειδικότερα, στους αδιαπέρατους σχηματισμούς που καλύπτουν περίπου τα 2/3 της λεκάνης, κατατάσσονται οι σχηματισμοί σχιστοκερατολιθικής διάπλασης, οι σχηματισμοί του φλύσχη (εκτός των κροκαλοπαγών και των ασβεστολιθικών ενστρώσεων), οι παλιότερες αποθέσεις ιλυαργίλων του Σπερχείου καθώς και οι ασβεστολιθικοί τόφοι των αποθέσεων των θερμών πηγών. Ως προς τη φυτοκάλυψη, η λεκάνη καλύπτεται από δάση, καλλιέργειες και λιβάδια-βοσκότοπους, σε ποσοστά 45.8%, 24.9% και 29.3% αντίστοιχα.

Σχηματισμοί	Κατηγορία	Περιγραφή	Ποσοστό (%)
Πορώδεις (προσχωματικοί και ημιπερατοί)	I ₁	Κοκκώδεις προσχωματικές αποθέσεις, κυμαινόμενης υδροπερατότητας	20.1
	I ₂	Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις, μέτριας έως πολύ μικρής υδροπερατότητας	0.1
	I ₃	Κοκκώδεις μολυσσικές αποθέσεις, σχετικά μικρής υδροπερατότητας	0.2
Καρστικοί	C	Ασβεστόλιθοι και μάρμαρα εκτεταμένης ανάπτυξης, μέτριας έως υψηλής διαπερατότητας	15.1
	C ₁	Ασβεστόλιθοι και μάρμαρα περιορισμένης ανάπτυξης, κυμαινόμενης διαπερατότητας	1.6
	C ₁ '	Τριαδικά ασβεστολιθικά λατυποπαγή της Ιονίου ζώνης, μικρής έως μέτριας διαπερατότητας	0.0
Αδιαπέρατοι	A ₁	Φλύσχη	48.1
	A ₂	Μεταμορφωμένα πετρώματα	3.6
	A ₃	Πλουτόνια και ηφαιστειακά πετρώματα	11.0

Πίνακας 3-2: Πίνακας Υδρολιθολογικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης²⁴

²⁴ Η υδρολιθολογική ταξινόμηση και ομαδοποίηση βασίζεται σε μελέτη του Υπουργείου Ανάπτυξης (1996), και έχει προκύψει με επεξεργασία των στοιχείων των γεωλογικών χαρτών του ΙΓΜΕ.



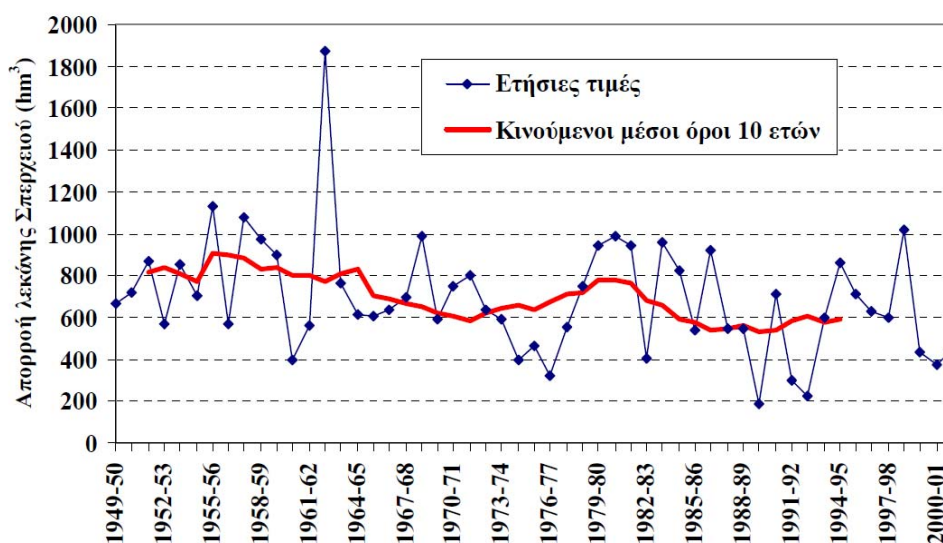
Σχήμα 3-6: Γεωλογικοί Σχηματισμοί της περιοχής μελέτης
(πηγή: *Ιδία επεξεργασία*)

3.2.5 Βροχομετρικά Στοιχεία

Η λεκάνη απορροής του καλύπτει έκταση 1.660 km². Από πλευράς επιφανειακού υδατικού δυναμικού, η λεκάνη του Σπερχειού χαρακτηρίζεται ως η πλουσιότερη της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στη λεκάνη ανέρχεται σε 905.6 mm, ενώ η μέση ετήσια απορροή της εκτιμάται σε 693.1 hm³ ή 378.8 mm. Ωστόσο, κατά την τελευταία εικοσαετία παρατηρείται μείωση του επιφανειακού δυναμικού της λεκάνης, με τη μέση τιμή να κυμαίνεται πλέον κοντά στα 600 hm³. Με τα νερά του αρδεύονται περί τα 35.000 στρέμματα με ανοιχτές διώρυγες στην περιοχή Ανθήλης-Μεγάλης Βρύσης.

Οι βροχομετρικοί σταθμοί της ευρύτερης περιοχής μελέτης είναι 14 συνολικά, αλλά μόνο οι μισοί εξ αυτών βρίσκονται μέσα στη λεκάνη απορροής του Σπερχειού. Στη λεκάνη του Σπερχειού έχουν λειτουργήσει κατά καιρούς υδρομετρικοί σταθμοί σε διάφορες θέσεις από τους οποίους μόνο δύο κρίνονται σχετικά αξιόπιστοι (Σταυρίδης κ.α., 1992). Οι εν λόγω σταθμοί είναι εγκατεστημένοι της γέφυρες Καστρίου και

Κομποτάδων. Συγκεκριμένα, ο σταθμός της γέφυρας Καστρίου, ο οποίος λειτουργεί από το 1961, είναι εγκαταστημένος περίπου 50 km ανάντη των εκβολών του Σπερχειού και ελέγχει υπολεκάνη έκτασης 853.2 km². Αντίστοιχα, ο σταθμός της γέφυρας Κομποτάδων, του οποίου η λειτουργία ξεκίνησε το 1949, είναι εγκαταστημένος περί τα 30 km ανάντη των εκβολών του Σπερχειού, ελέγχοντας υπολεκάνη έκτασης 1111.5 km². Σημαντικά μειονεκτήματα και των δύο σταθμών είναι η απουσία σταθμηγράφου, καθώς και το γεγονός ότι οι υδρομετρήσεις έχουν διακοπεί από το 1981.



Σχήμα 3-7: Ετήσιες τιμές και κινούμενοι μέσοι όροι χρονοσειράς απορροής λεκάνης Σπερχειού (πηγή: Κουτσογιάννης κ.α., 2003)

Το κλίμα στην περιοχή της κοιλάδας του Σπερχειού ανήκει γενικά στην υποτροπική μεσογειακή ζώνη με καλοκαίρι θερμό και ξηρό και χειμώνα ήπιο και υγρό. Αλλά παρατηρούνται διαφοροποιήσεις (μικροκλίμα) ανάλογα με την μορφολογία της περιοχής. Έτσι κοντά στο Μαλιακό το κλίμα είναι τυπικό Μεσογειακό, στο εσωτερικό κοντά στην κοιλάδα του Σπερχειού είναι πεδινό ηπειρωτικό ενώ ορεινό ηπειρωτικό είναι σε περιοχές με υψόμετρο πάνω από 500 m.

3.2.6 Αντιπλημμυρικά Έργα

Ο Σπερχειός χαρακτηρίζεται από τις έντονες πλημμυρικές απορροές του, που σε μερικές περιπτώσεις προκαλούν καταστροφές κυρίως στις παρόχθιες αρδευτικές εκτάσεις. Για το λόγο αυτό, η πλειονότητα των έργων που έχουν κατασκευαστεί στην κοίτη του (και κυρίως στο κατάντη τμήμα του) είναι αντιπλημμυρικά και αποστραγγιστικά.

Το σημαντικότερο αντιπλημμυρικό έργο είναι η λεγόμενη εκτροπή του Σπερχειού, η οποία κατασκευάστηκε την περίοδο 1957-58. Πρόκειται για ανακουφιστική διώρυγα (η λεγόμενη νέα κοίτη) με σχεδόν ευθύγραμμη κοίτη, μήκους 10 km. Κατά τις υγρές περιόδους, το μεγαλύτερο μέρος των πλημμυρικών απορροών του ποταμού διοχετεύεται μέσω της κοίτης στη θάλασσα. Αντίθετα, κατά την ξηρή περίοδο, η ροή του Σπερχειού κατευθύνεται σχεδόν στο σύνολό της προς τη φυσική, παλιά του κοίτη. Η τελευταία εκβάλλει στο Μαλιακό Κόλπο νοτιότερα από τις εκβολές της ανακουφιστικής κοίτης, τέμνοντας τη Νέα Εθνική Οδό Αθηνών-Θεσσαλονίκης στη γέφυρα της Αλαμάνας. Η διατομή της ανακουφιστικής κοίτης του Σπερχειού είναι τραπεζοειδής, με παροχευετικότητα $300 \text{ m}^3/\text{s}$ και μέγιστο πλάτος (στο ύψος των πλευρικών αναχωμάτων) 130 m περίπου κατάντη της Εθνικής Οδού και 60m ανάντη της Εθνικής Οδού. Ο διαχωρισμός της ροής στην παλιά και τη νέα κοίτη πραγματοποιείται στο έργο του μεριστή, που βρίσκεται στο ύψος της κοινότητας Κόμμα. Ο μεριστής είναι ένα φράγμα εκτροπής από σκυρόδεμα (τύπου εκχειλιστή), με πλάτος περίπου 40 m (Δαούλας, 1995).

Άλλα σημαντικά αντιπλημμυρικά έργα στην περιοχή μελέτης είναι (Δαούλας, 1995):

- Η τάφρος Λαμίας (γνωστή και ως Γερμανική τάφρος), η οποία κατασκευάστηκε το 1944, ακολουθεί τη γραμμή των χαμηλών υψομέτρων ανάμεσα στο Λειανοκλάδι και στη Νέα Εθνική Οδό, και αφού διασχίσει την περιοχή του αρδευτικού δικτύου Ανθήλης – Μεγάλης Βρύσης εκβάλλει στο Μαλιακό Κόλπο, ακολουθώντας πορεία παράλληλη με τη νέα κοίτη του Σπερχειού. Η τάφρος Λαμίας αποχετεύει τα νερά των κατακλύσεων που προκαλούν οι υπερχειλίσεις του Σπερχειού στη χαμηλή περιοχή της κοιλάδας του (μετά το χωριό Κομποτάδες), και ταυτόχρονα δέχεται τα πλημμυρικά νερά από τους βορινούς λόφους, και κυρίως από τη λεκάνη του χειμάρρου Ξηριά

Λαμίας. Η τάφος, στα τμήματα όπου δεν έχει ολοκληρωθεί η διευθέτηση, έχει πλάτος 10 m, βάθος 1.5 m και παροχετευτικότητα 30 m³/s.

- Ο εγκιβωτισμός της φυσικής κοίτης του Σπερχειού μεταξύ της Σιδηροδρομικής Γέφυρας και της οδικής γέφυρας κοντά στο χωριό Κόμμα, που πραγματοποιήθηκε τη δεκαετία του 1950. Αποτελείται από ένα συνεχές αριστερό ανάχωμα μήκους 5 km, καθώς και ένα δεξιό ανάχωμα που διακόπτεται στη συμβολή του Σπερχειού με το Γοργοπόταμο. Σε απόσταση περίπου 700 m κατάντη της Σιδηροδρομικής Γέφυρας, υπάρχει σημείο θεληματικής θραύσης του αριστερού αναχώματος, σε περίπτωση εξαιρετικά έντονων πλημμυρών.
- Ορισμένα σποραδικά προστατευτικά αναχώματα ανάντη της Σιδηροδρομικής Γέφυρας και στην κοίτη της Αλαμάνας, τα οποία παρέχουν προστασία τοπικής κλίμακας.
- Ο εγκιβωτισμός του χειμάρρου Βίστριτσας σε όλο το μήκος του από τον Άγιο Σώστη μέχρι τη συμβολή του με τον Σπερχειό στο Καστρί, που υλοποιήθηκε τη δεκαετία του 1970. Την περίοδο 1980-81 έγιναν έργα συντήρησης, δηλαδή καθαρισμού, εκβάθυνσης και διαπλάτυνσης της παλιάς και της κοίτης του Σπερχειού. Παρόμοια έργα εκτελέστηκαν και ανάντη της Σιδηροδρομική Γέφυρας, έως τη Γέφυρα Λουτρών Υπάτης.

3.3 Περιοχή Μελέτης

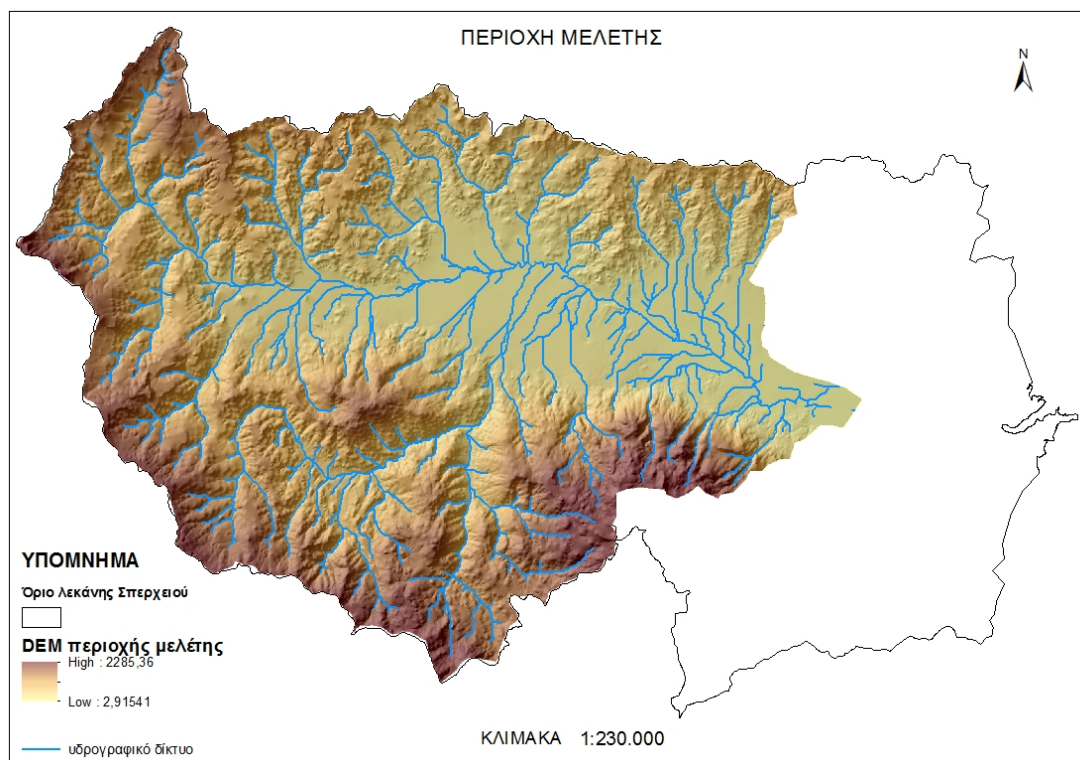
Στη συγκεκριμένη εργασία η περιοχή μελέτης ορίστηκε ως η υπολεκάνη απορροής του Σπερχειού ποταμού δηλαδή η λεκάνη απορροής του Σπερχειού ανάντη της συμβολής του με το Γοργοπόταμο. Επιλέχθηκε αυτό το τμήμα της λεκάνης για επεξεργασία καθώς υπήρχε η προγενέστερη μελέτη «Υδρολογική μελέτη λεκάνης Σπερχειού» (Κουτσογιάννης κ.α., 2003) η οποία αναφέρεται στην λεκάνη του Σπερχειού ανάντη της συμβολής με το Γοργοπόταμο και συνεπώς μπορούσε να γίνει

άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής. Επίσης με βάση τη μελέτη αυτή έγινε και η βαθμονόμηση²⁵ των μοντέλων.

Το σχήμα της λεκάνης της είναι πολύπλοκο και δεν περιγράφεται εύκολα από κάποιο γεωμετρικό σχήμα. Το σχήμα της είναι στενόμακρο με διεύθυνση Α-Δ. Η γεωμετρία της λεκάνης περιγράφεται από κάποια βασικά χαρακτηριστικά, οι τιμές των οποίων έχουν υπολογιστεί απευθείας από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους. Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους που χρησιμοποιήθηκε για τη λεκάνη απορροής του Σπερχειού ποταμού ήταν ανάλυσης 25x25 m (πηγή: Ίδια επεξεργασία από το αρχικό ΨΜΕ).

Για να προκύψει το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της λεκάνης απορροής του Σπερχειού ανάντη της συμβολής με το Γοργοπόταμο, δημιουργήθηκαν πολύγωνα που περιέγραφαν τις λεκάνες απορροής των ρεμάτων κατάντη της συμβολής με το Γοργοπόταμο. Έπειτα τα πολύγωνα αυτά ενσωματώθηκαν σε ένα ενιαίο πολύγωνο και το τελικό πολύγωνο αυτό αφαιρέθηκε από το πολύγωνο της συνολικής λεκάνης του Σπερχειού ποταμού. Το πολύγωνο της λεκάνης ανάντη του Γοργοποτάμου που προέκυψε εφαρμόσθηκε ως μάσκα (δηλαδή ως όριο) για να κοπεί το αρχικό Ψηφιακό Μοντέλο εδάφους και να προκύψει το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της λεκάνης ανάντη της συμβολής με το Γοργοπόταμο όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-8.

²⁵ Ο όρος *βαθμονόμηση* (calibration) προέρχεται από τις στατιστικές επιστήμες, και υποδηλώνει μια συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου, έτσι ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του να προσεγγίζουν όσο το δυνατό περισσότερο τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές. Το πρόβλημα της βαθμονόμησης υδρολογικών μοντέλων, αν και έχει διερευνηθεί διεξοδικά, παραμένει επίκαιρο, δεδομένου ότι τα μοντέλα τείνουν να γίνουν όλο και πιο σύνθετα (μεγάλος αριθμός παραμέτρων) και όλο και πιο απαιτητικά σε δεδομένα, και σε υπολογιστικό φόρτο.

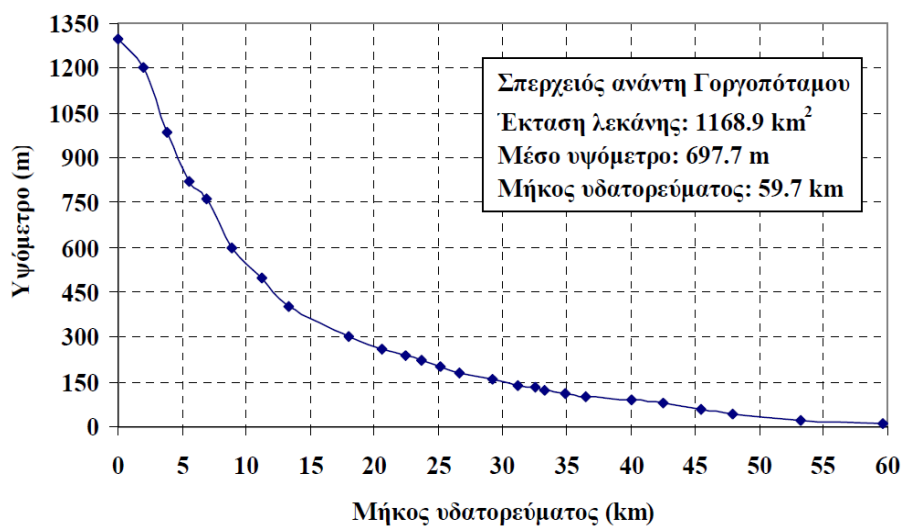


*Σχήμα 3-8: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής μελέτης (ανάντη συμβολής με Γοργοπόταμο)
(πηγή: Ιδία επεξεργασία)*

Εμβαδόν: 1161 km²

Μήκος λεκάνης: 52.8 km

Μήκος κύριου Υδατορεύματος: 54 km



*Σχήμα 3-9: Μηκοτομή και Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης
(πηγή: Κουτσογιάννης κ.α., 2003)*

Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του ανάγλυφου της λεκάνης απορροής του Σπερχειού ανάντη της συμβολής με το Γοργοπόταμο είναι:

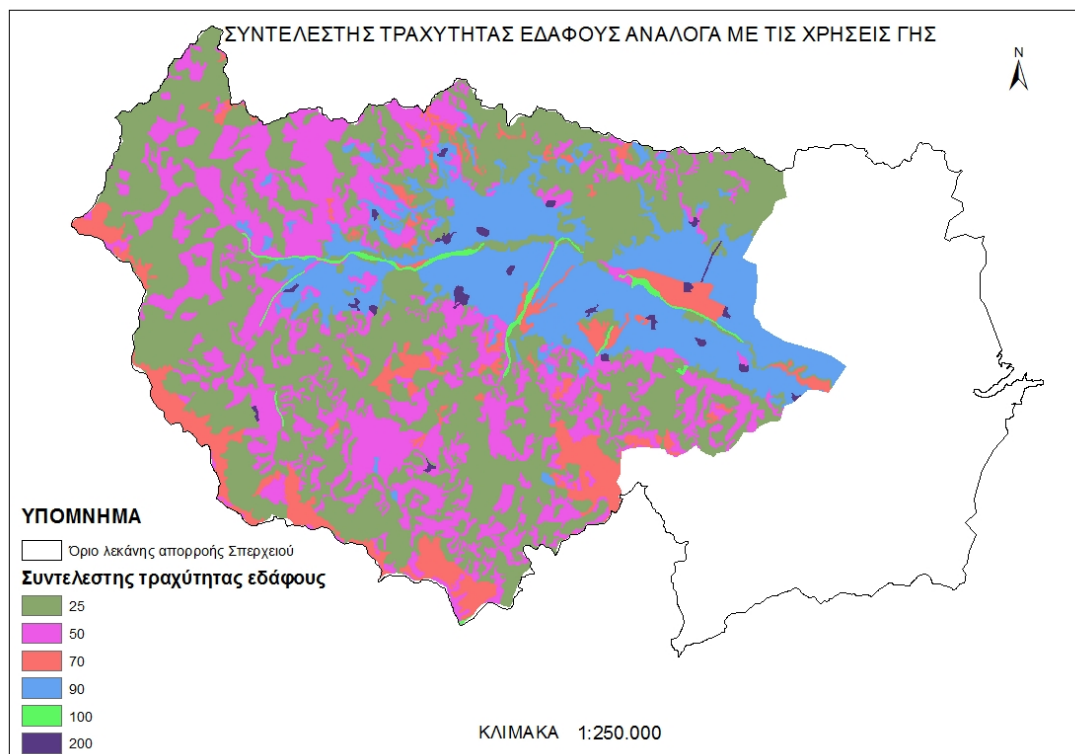
Μέγιστο Υψόμετρο λεκάνης: 2285 m

Μέσο Υψόμετρο λεκάνης: 867.7 m

Ελάχιστη κλίση: 0 %

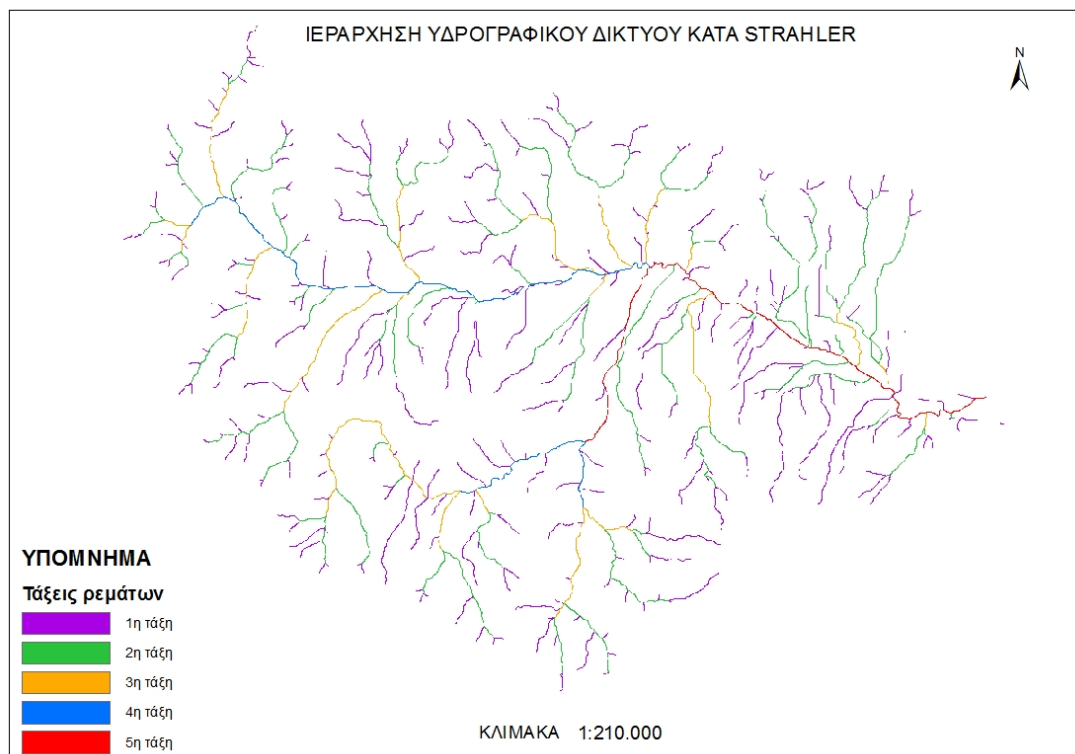
Μέγιστη κλίση: 224,8 %

Μέση κλίση: 96 %



Σχήμα 3-10: Συντελεστής τραχύτητας εδάφους περιοχής μελέτης ανάλογα με τις χρήσεις γης (πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης ταξινομήθηκε σε τάξεις με βάση την ιεράρχηση του Strahler. Κατά την ιεράρχηση αυτή προέκυψαν 5 τάξεις. Το συνολικό μήκος της κάθε τάξης και το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα. Τα ρέματα 1^{ης} τάξης είναι τα ανάντη ρέματα, δηλαδή αυτά που δεν περιέχουν καθόλου παραποτάμους. Αντίστοιχα το κύριο ρέμα είναι 4^{ης} ή 5^{ης} τάξεις ανάλογα με τον αριθμό των παραποτάμων του.



*Σχήμα 3-11: Ιεράρχηση υδρογραφικού δικτύου σε τάξεις κατά Strahler
(πηγή: Ιδία επεξεργασία)*

Τάξη ρεμάτων	Μήκος (km)	Ποσοστό (%)
1η	348	47,2
2η	228	30,9
3η	89,6	12,1
4η	40,2	5,4
5η	32	4,3
Σύνολο	737,8	100

Πίνακας 3-3: Υδρογραφικό δίκτυο ανά τάξεις

Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της υπολεκάνης αυτής (χρήσεις γης, γεωλογία και βροχομετρικά στοιχεία) παραμένουν τα ίδια όπως και στη συνολική λεκάνη του Σπερχειού, τα οποία παρουσιάστηκαν αναλυτικά παραπάνω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα δύο μοντέλα που δημιουργήθηκαν, περιγράφονται αναλυτικά οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν (από τη βαθμονόμηση των μοντέλων) και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Επίσης γίνεται διερεύνηση της επίδρασης ορισμένων παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στα αποτελέσματα και τέλος γίνεται εφαρμογή των μοντέλων σε τέσσερα πιθανά σενάρια διαφορετικής χωρικής κατανομής της βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης.

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνουν την εύρεση των ταχυτήτων ροής και του χρόνου απορροής της περιοχής μελέτης καθώς και των πλημμυρικών όγκων που δημιουργούνται στην έξοδο της λεκάνης. Με βάση τους χρόνους απορροής και τον αριθμό των εικονοστοιχείων (pixel) που απορρέουν κάθε χρονική στιγμή μπορεί να κατασκευαστεί το μοναδιαίο υδρογράφημα της περιοχής αλλά και τα αντίστοιχα πλημμυρογραφήματα. Όλοι οι χάρτες που δημιουργήθηκαν παρουσιάζονται στο παράρτημα Ι στο τέλος της εργασίας.

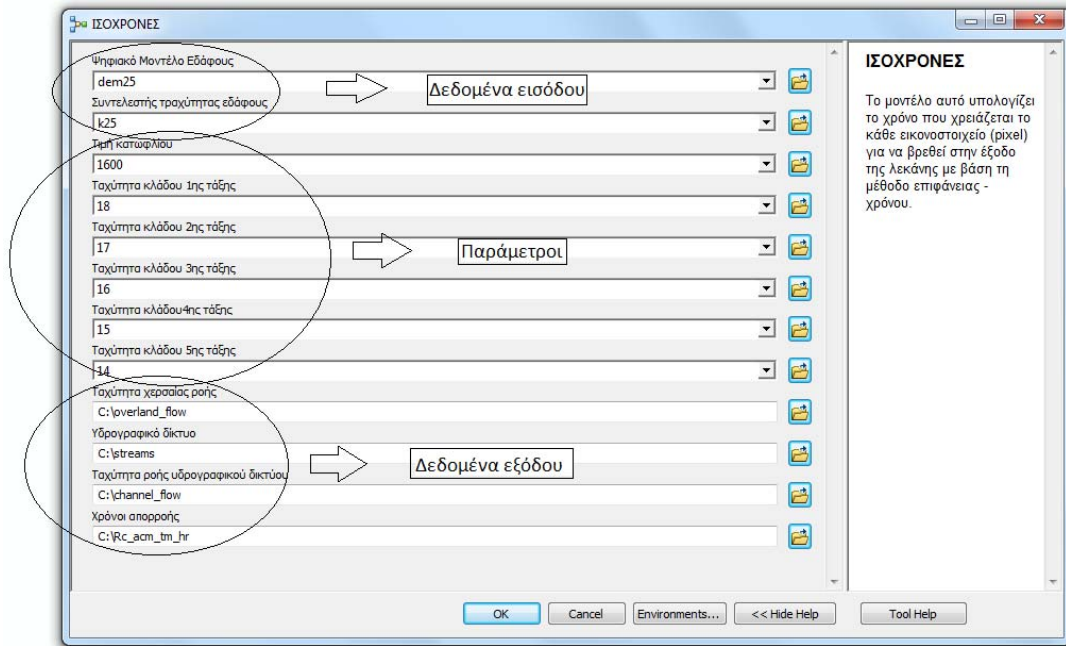
Για τον υπολογισμό των ταχυτήτων ροής και του χρόνου απορροής της περιοχής μελέτης δημιουργήθηκε το μοντέλο ΙΣΟΧΡΟΝΕΣ στο model builder του λογισμικού ARCGIS. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε το μοντέλο ΠΑΡΟΧΗ το οποίο, με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου ΙΣΟΧΡΟΝΕΣ, υπολογίζει την παροχή που εμφανίζεται στην έξοδο της λεκάνης απορροής για κάθε ώρα ξεχωριστά και με βάση διαφορετικές επιφανειακές βροχοπτώσεις. Για τη δημιουργία των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcGIS 10 (Arc Editor) αλλά και το λογισμικό ArcGIS 9.3 (Arc Info), καθώς η έκδοση 10 (Arc Editor) δεν επέτρεπε πρόσβαση σε όλες τις εντολές και εργαλεία. Επίσης μέσω του λογισμικού ArcGIS 9.3 ήταν δυνατή η κοινοποίηση των μοντέλων και σε παλιότερες εκδόσεις του λογισμικού.

Στη νεώτερη έκδοση παρατηρήθηκαν αρκετές βελτιώσεις στις εντολές αλλά και στα εργαλεία που καθιστούν την έκδοση ArcGIS 10 πιο φιλική προς το χρήστη και δίνουν μεγαλύτερες δυνατότητες επεξεργασίας. Συγκεκριμένα, η σημαντικότερη βελτίωση στην έκδοση ArcGIS 10 είναι η δυνατότητα επιλογής της χρήσης του εργαλείου Raster Calculator εντός του Model Builder, μέσω της οποίας γίνονται ευκολότερα υπολογισμοί μεταξύ των στοιχείων εντός του μοντέλου, διαδικασία που στο λογισμικό ArcGIS 9.3 ήταν πιο περίπλοκη και χρονοβόρα.

4.1 Μοντέλο χρόνου – επιφάνειας

4.1.1 Περιγραφή εκτέλεσης του μοντέλου

Το πρώτο μοντέλο που δημιουργήθηκε είναι το μοντέλο ΙΣΟΧΡΟΝΕΣ για τον υπολογισμό των συνολικών ταχυτήτων ροής της περιοχής μελέτης και κατ' επέκταση για τη δημιουργία του ιστογράμματος χρόνου – επιφάνειας. Τα στάδια και οι εντολές του μοντέλου αυτού έχουν περιγραφεί αναλυτικά και βήμα προς βήμα στην παράγραφο 2.5 του Κεφαλαίου 2. Κύριο αποτέλεσμα από την εφαρμογή του μοντέλου αυτού είναι η δημιουργία των ισοχρόνων καμπυλών, δηλαδή του γεωμετρικού τόπου των σημείων που απέχουν χρονικά ίση απόσταση από την έξοδο της λεκάνης. Με βάση τις καμπύλες αυτές ο χρήστης γνωρίζει για κάθε σημείο του κανάβου το χρόνο που αυτό χρειάζεται για να απορρεύσει από την έξοδο της λεκάνης.



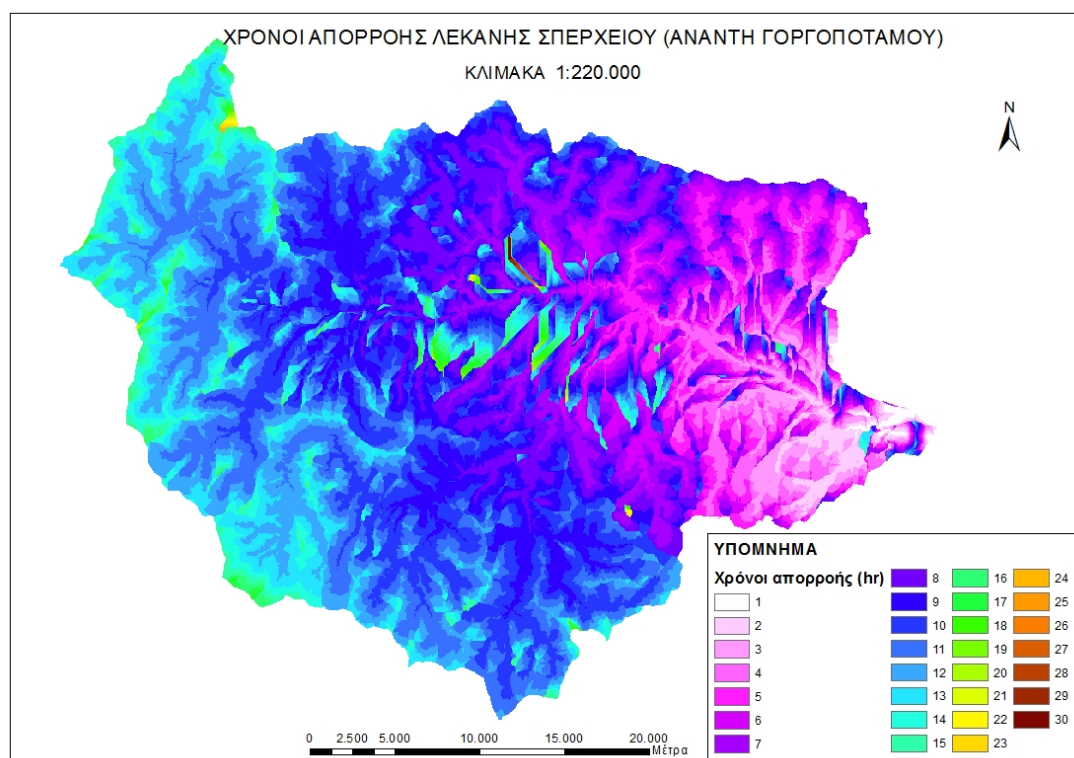
Σχήμα 4-1: Μοντέλο ISOXPONES: Εκτίμηση χρόνου απορροής.

Το μοντέλο ISOXPONES δέχεται ως δεδομένα εισαγωγής το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (raster αρχείο) και ένα ακόμη raster αρχείο που περιλαμβάνει το συντελεστή τραχύτητας του εδάφους ανάλογα με την κύρια χρήση γης της περιοχής. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο είναι η απεικόνιση του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής, η ταχύτητα χερσαίας ροής, η ταχύτητα του υδρογραφικού δικτύου και οι χρόνοι απορροής κάθε εικονοστοιχείου (pixel) της περιοχής μελέτης. Ο χρήστης μπορεί να επέμβει στο μοντέλο και να καθορίσει τα παραμετροποιημένα στοιχεία του δηλαδή της ταχύτητες των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου (για την κάθε τάξη υδρογραφικού δικτύου ξεχωριστά) αλλά και την τιμή του κατωφλίου που καθορίζει την επιφάνεια απορροής για τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου.

Για τη ρύθμιση – βαθμονόμηση του ορίστηκε ως τιμή κατωφλίου (αριθμός φατνίων απορροής για τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου) τα 1600 φατνία, έτσι ώστε η έκταση απορροής να είναι 1km^2 το οποίο προκύπτει από εμπειρική γνώση. Επίσης μέσω της διαδικασίας της ρύθμισης του μοντέλου επιλέχθηκαν οι ταχύτητες ροής ως 1.8 m/s για την 1^η τάξη υδρογραφικού δικτύου, 1.7 m/s για την 2^η τάξη, 1.6 m/s για την 3^η τάξη, 1.5 m/s για την 4^η τάξη και 1.4 m/s για την 5^η τάξη υδρογραφικού

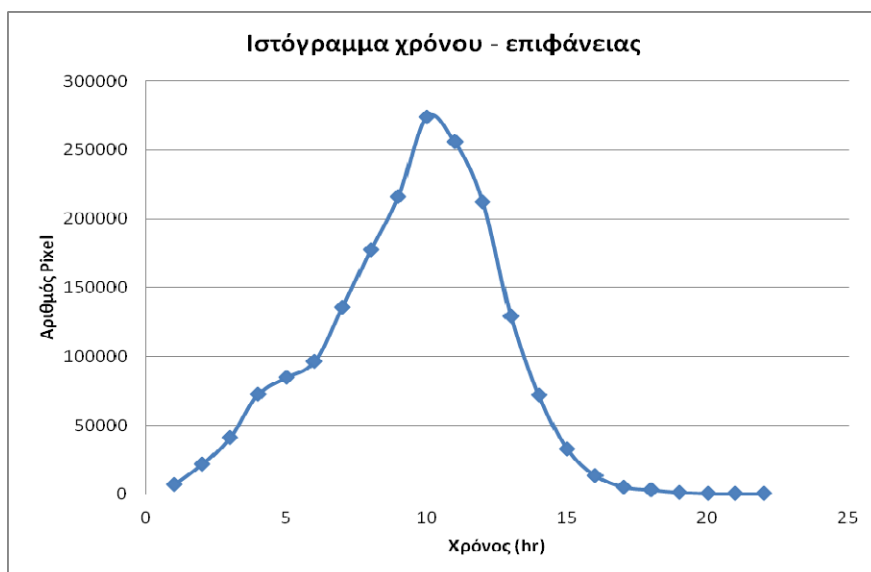
δικτύου. Οι ταχύτητες ροής αναμένονται γενικά να είναι περίπου 1 m/s (εμπειρική γνώση). Στο μοντέλο οι τιμές αυτές εισάγονται πολλαπλασιασμένες επί 10, έτσι ώστε να μην εισέρχονται δεκαδικές τιμές στους υπολογισμούς, και στη συνέχεια το αποτέλεσμα διαιρείται δια του 10 για επαναφορά των μονάδων μέτρησης.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου παρουσιάζονται στο παράρτημα I υπό μορφή γεωγραφικών υποβάθρων. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4-2) φαίνονται οι χρόνοι απορροής που προέκυψαν ύστερα από την εφαρμογή του μοντέλου στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.



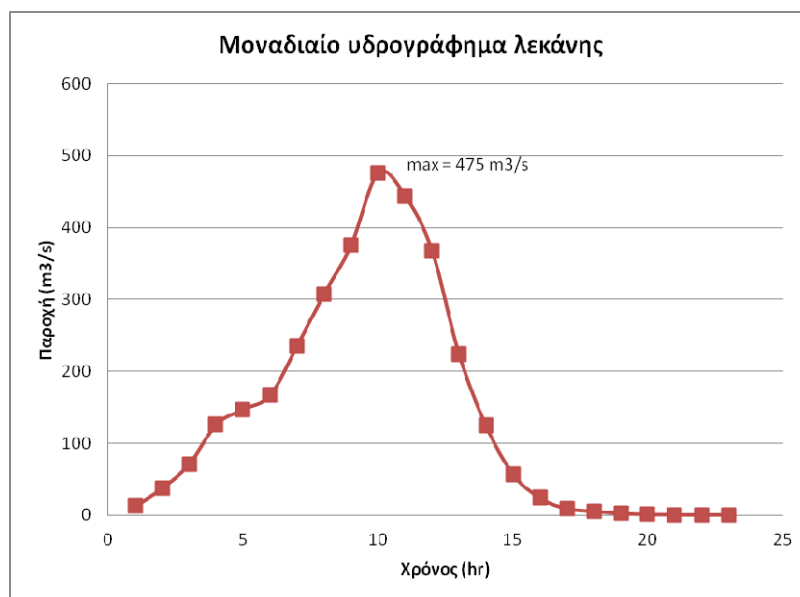
*Σχήμα 4-2: Χρόνοι απορροής των εικονοστοιχείων της λεκάνης απορροής
(πηγή: Ιδία επεξεργασία)*

Με βάση της χρόνους απορροής του κάθε εικονοστοιχείου (κάναβος χρόνου απορροής) μπορεί εύκολα να παραχθεί το ιστόγραμμα χρόνου – επιφάνειας της περιοχής μελέτης, το οποίο αντιστοιχίζει στο κάθε χρονικό βήμα (ωριαίο) τον αριθμό των εικονοστοιχείων (pixel) που απορρέουν. Το ιστόγραμμα για την περιοχή μελέτης απεικονίζεται παρακάτω.



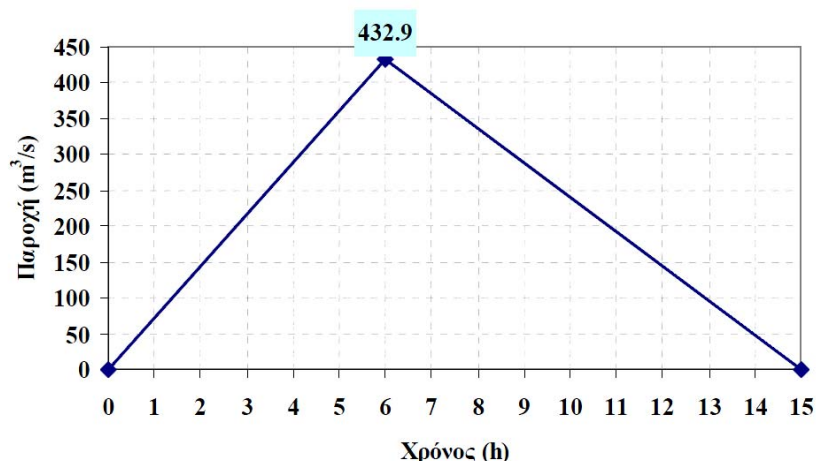
Σχήμα 4-3: Ιστόγραμμα χρόνου – επιφάνειας

Με βάση το ανωτέρω ιστόγραμμα μπορεί να παραχθεί το μοναδιαίο υδρογράφημα για την περιοχή αυτή. Το μοναδιαίο υδρογράφημα αναφέρεται εξ' ορισμού σε ύψος βροχής 10 mm. Συνεπώς, αν ο αριθμός των εικονοστοιχείων που απορρέουν πολλαπλασιαστεί με την επιφάνεια κάθε εικονοστοιχείου ανάλογα με την ανάλυση του αρχικού Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους και με το αντίστοιχο ύψος βροχής, δημιουργείται το μοναδιαίο υδρογράφημα για τη λεκάνη απορροής. Συνεπώς στη συγκεκριμένη περίπτωση πολλαπλασιάζεται ο αριθμός των εικονοστοιχείων με την επιφάνεια του καθενός που είναι 25x25 m και με το ύψος βροχής 0.01 m και προκύπτει η παροχή σε m^3/s (διαιρώντας με 3600 s). Το μοναδιαίο υδρογράφημα που προέκυψε παρουσιάζεται κατωτέρω.



*Σχήμα 4-4: Μοναδιαίο υδρογράφημα λεκάνης από δεδομένα ανάλυσης 25x25 m
(πηγή: Ιδία επεξεργασία)*

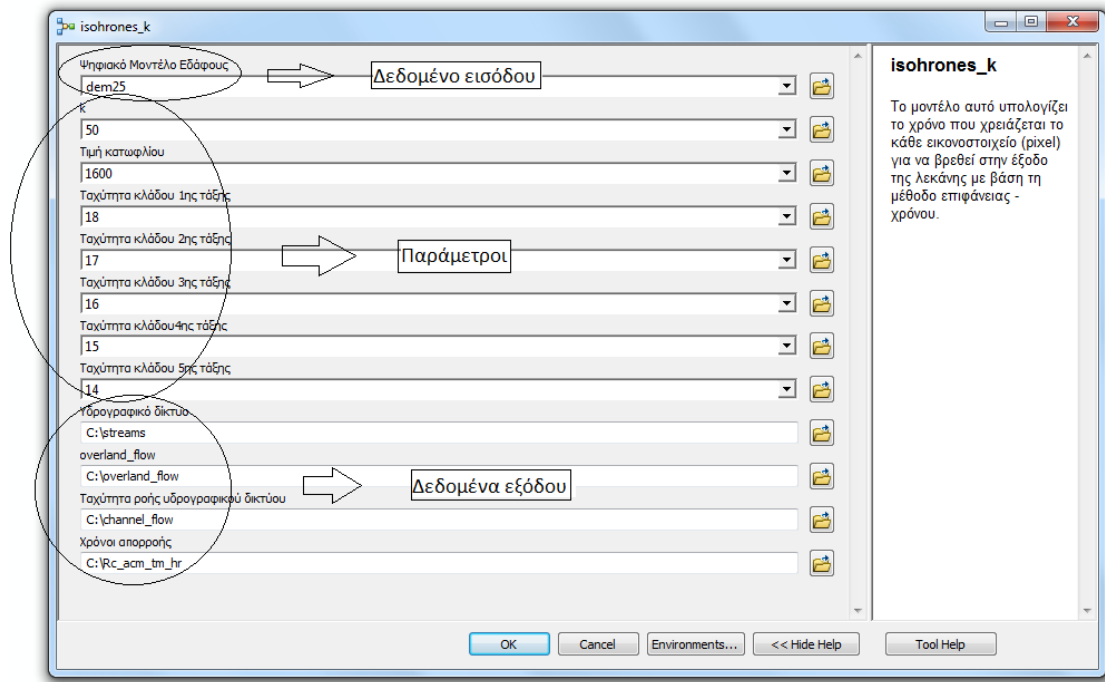
Στη μελέτη Κουτσογιάννη το μοναδιαίο υδρογράφημα υπολογίστηκε με τις μεθόδους του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας, των Snyder, Giandotti και Kirpich και το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα που προέκυψε ήταν τριγωνικής μορφής και παρουσιάζεται κατωτέρω (Σχήμα 4-5). Η παροχή αιχμής που προέκυψε με τη μέθοδο Snyder ήταν $Q=469 \text{ m}^3/\text{s}$, ενώ με τη μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας $Q= 433 \text{ m}^3/\text{s}$, δηλαδή τιμή αρκετά κοντινή με αυτή που προέκυψε από την εφαρμογή του μοντέλου που ήταν $Q=475 \text{ m}^3/\text{s}$



Σχήμα 4-5: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα Σπερχειού, ανάντη συμβολής του με Γοργοπόταμο.
(πηγή: Κουτσογιάννης κ.α., 2003)

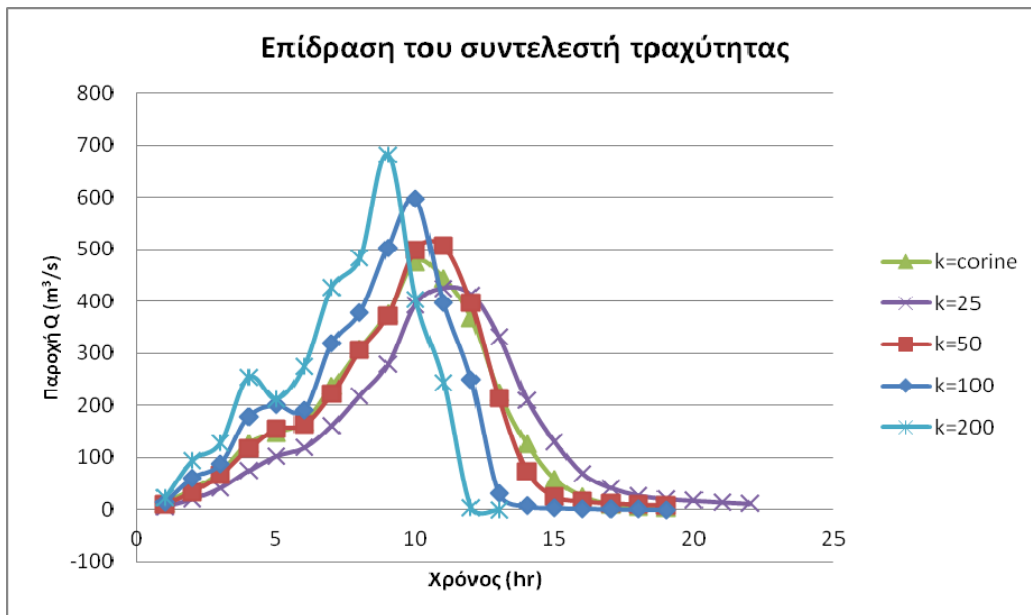
4.1.2 Επίδραση του συντελεστή τραχύτητας εδάφους στο μοναδιαίο υδρογράφημα

Στα πλαίσια της μεθόδου χρόνου – επιφάνειας μελετήθηκε η επίδραση του συντελεστή τραχύτητας του εδάφους στα αποτελέσματα. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε ένα ακόμη μοντέλο (ΙΣΟΧΡΟΝΕΣ_k) το οποίο έμοιαζε αρκετά με το μοντέλο ΙΣΟΧΡΟΝΕΣ με τη διαφορά ότι ο συντελεστής τραχύτητας δεν ήταν ένα ψηφιδωτό (raster) αρχείο, όπως προηγουμένως, αλλά ένας μονάχα αριθμός ο οποίος είχε παραμετροποιηθεί έτσι ώστε να εισάγεται εξ' αρχής από το χρήστη. Συνεπώς με τον τρόπο αυτό ο συντελεστής τραχύτητας του εδάφους δεν ήταν ένα ψηφιδωτό αρχείο με τιμές ανάλογα με τη χρήση γης της περιοχής αλλά θεωρήθηκε ότι όλη η περιοχή έχει έναν ενιαίο συντελεστή τραχύτητας εδάφους ο οποίος ορίζεται από το χρήστη.



Σχήμα 4-6: Μοντέλο ΙΣΟΧΡΟΝΕΣ_k: Εκτίμηση χρόνου απορροής.

Μέσω της διερεύνησης με το μοντέλο αυτό για τις διάφορες τιμές του συντελεστή τραχύτητας του εδάφους το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι αν τεθεί συντελεστής τραχύτητας $k=50$ τα αποτελέσματα που προκύπτουν για το μοναδιαίο υδρογράφημα είναι αρκετά όμοια με αυτά που προκύπτουν με τις διάφορες τιμές του συντελεστή τραχύτητας ανάλογα με τις χρήσεις γης. Η διερεύνηση που έγινε και τα μοναδιαία υδρογραφήματα που προέκυψαν για τους διάφορους συντελεστές τραχύτητας εδάφους φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Στο Σχήμα 4-7 φαίνεται ξεκάθαρα η μεταβολή του μοναδιαίου υδρογραφήματος υπό την επιρροή της μεταβολής του συντελεστή τραχύτητας του εδάφους.

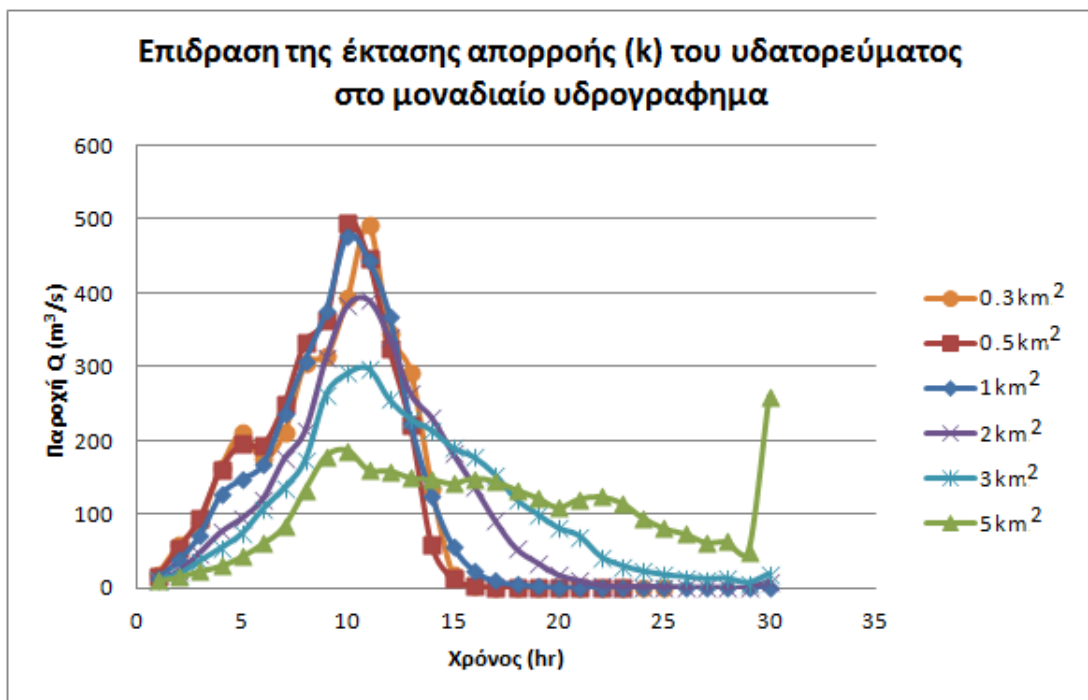


Σχήμα 4-7: Σύγκριση των μοναδιαίων υδρογραφημάτων που προκύπτουν με βάση: (α) συντελεστής τραχύτητας εδάφους όπως προκύπτει από τις χρήσεις γης του Corine, (β) συντελεστής ταχύτητας $k=25$, (γ) συντελεστής τραχύτητας $k=50$, (δ) συντελεστής τραχύτητας $k=100$, (ε) συντελεστής τραχύτητας $k=200$
(πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για συντελεστή τραχύτητας $k=50$ ήταν αρκετά ικανοποιητικά για τη δεδομένη περιοχή μελέτης και ανταποκρίνονται με επαρκή ακρίβεια στα αποτελέσματα που είχαν προκύψει σύμφωνα με τις χρήσεις γης του Corine. Η τιμή του $k=50$ είναι κοντά στη μέση τιμή των συντελεστών τραχύτητας εδάφους όπως προκύπτει από τις χρήσεις γης του Corine. Η ακριβής μέση τιμή ήταν 48.8 αλλά προτιμήθηκε να χρησιμοποιηθεί η τιμή $k=50$ για χάρη στρογγυλοποίησης. Επομένως για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης μπορεί να χρησιμοποιείται και το μοντέλο αυτό για την εύρεση των ισοχρόνων καμπυλών με συντελεστή τραχύτητας $k=50$. Το μοντέλο αυτό υπερτερεί έναντι του μοντέλου ΙΣΟΧΡΟΝΕΣ στο ότι απαιτεί δεδομένο εισόδου από το χρήστη μόνο το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής σε αντίθεση με το προηγούμενο που απαιτούσε και ένα ψηφιδωτό αρχείο με τις διάφορες τιμές του συντελεστή τραχύτητας για τις διάφορες χρήσεις γης και συνεπώς είναι πιο εύκολο εφαρμόσιμο ακόμη και χωρίς τη λεπτομερή γνώση των χρήσεων γης.

4.1.3 Επίδραση της τιμής του κατωφλίου στο μοναδιαίο υδρογράφημα

Για να υπολογιστούν με ακρίβεια τα φατνία εκείνα που αποτελούν το υδρογραφικό δίκτυο (ποτάμια) ορίζεται από το χρήστη μια τιμή (κατώφλι) στον κλίμακα συγκέντρωσης ροής (flow accumulation). Τα φατνία που έχουν τιμή μικρότερη από την τιμή αυτή διαγράφονται κι έτσι τα φατνία που μένουν αποτελούν το υδρογραφικό δίκτυο, διαχωρίζονται δηλαδή τα φατνία όπου σχηματίζεται η ροή του υδρογραφικού δικτύου από αυτά που περιέχουν τη χερσαία ροή (Σχήμα 2-10). Η τιμή του κατωφλίου ορίζεται σε ριxel τα οποία καθορίζουν την έκταση απορροής του υδρογραφικού δικτύου. Στα πλαίσια της μεθόδου χρόνου – επιφάνειας μελετήθηκε η επίδραση της τιμής του κατωφλίου στα αποτελέσματα. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.8) φαίνονται η μεταβολή του μοναδιαίου υδρογραφήματος με διαφορετικές τιμές του κατωφλίου (έκταση απορροής).



Σχήμα 4-8: Σύγκριση των μοναδιαίων υδρογραφήματων που προκύπτουν με διαφορετικές τιμές του κατωφλίου (έκταση απορροής)

(πηγή: Ιδία επεξεργασία)

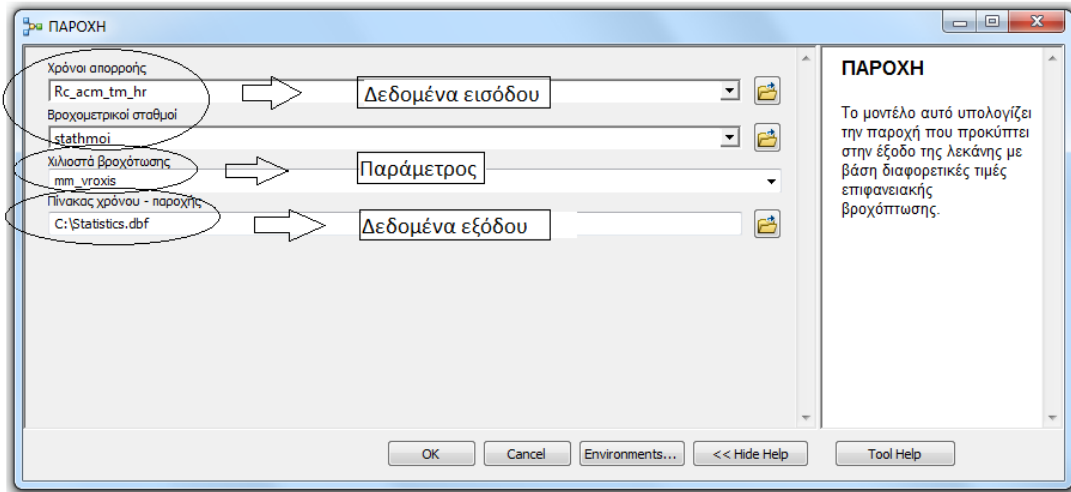
Η έκταση απορροής του υδρογραφικού δικτύου μετρίεται σε τετραγωνικά χιλιόμετρα (km^2) όμως η τιμή του κατωφλίου που μπαίνει στους υπολογισμούς του μοντέλου ΙΣΟΧΡΟΝΕΣ αναφέρεται σε rixel. Δηλαδή απαιτείται μετατροπή της έκτασης απορροής στον αντίστοιχο αριθμό εικονοστοιχείων με βάση το μέγεθος του κάθε εικονοστοιχείου (ανάλυση).

Από εμπειρική γνώση η έκταση απορροής των υδατορευμάτων είναι περίπου 1 km^2 και στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε αυτή η τιμή για κατώφλι για τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους. Η διερεύνηση της επίδρασης της τιμής του κατωφλίου στο μοναδιαίο υδρογράφημα έγινε για να διαπιστωθεί το εύρος της τιμής αυτής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς σημαντικές επιπτώσεις στο μοναδιαίο υδρογράφημα. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή του κατωφλίου επηρεάζει το μοναδιαίο υδρογράφημα καθώς όσο μικρότερη είναι η τιμή του κατωφλίου τόσο διευρύνεται το εξαγόμενο υδρογραφικό δίκτυο και συνεπώς οι χρόνοι απορροής μειώνονται. Αντίθετα για μεγάλες τιμές του κατωφλίου δημιουργούνται μεγάλες εκτάσεις χερσαίας ροής και συνεπώς είναι δυσκολότερη η απορροή της λεκάνης. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-8 για τιμές κατωφλίου μεγαλύτερες των 2 km^2 , δηλαδή των 6400 rixel, οι χρόνοι απορροής της λεκάνης αυξάνονται αισθητά και παρατηρούνται σαφώς μικρότερες παροχές αιχμής στο μοναδιαίο υδρογράφημα.

4.2 Μοντέλο εκτίμησης παροχής

4.2.1 Περιγραφή εκτέλεσης του μοντέλου

Το επόμενο μοντέλο που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αυτής είναι το μοντέλο ΠΑΡΟΧΗ, το οποίο υπολογίζει την παραγόμενη παροχή του ποταμού στην έξοδο της λεκάνης με βάση διαφορετικές επιφανειακές βροχοπτώσεις. Τα στάδια του μοντέλου αυτού και οι εντολές που αυτό χρησιμοποιεί έχουν περιγραφεί αναλυτικά και βήμα προς βήμα στην παράγραφο 2.6 του Κεφαλαίου 2.



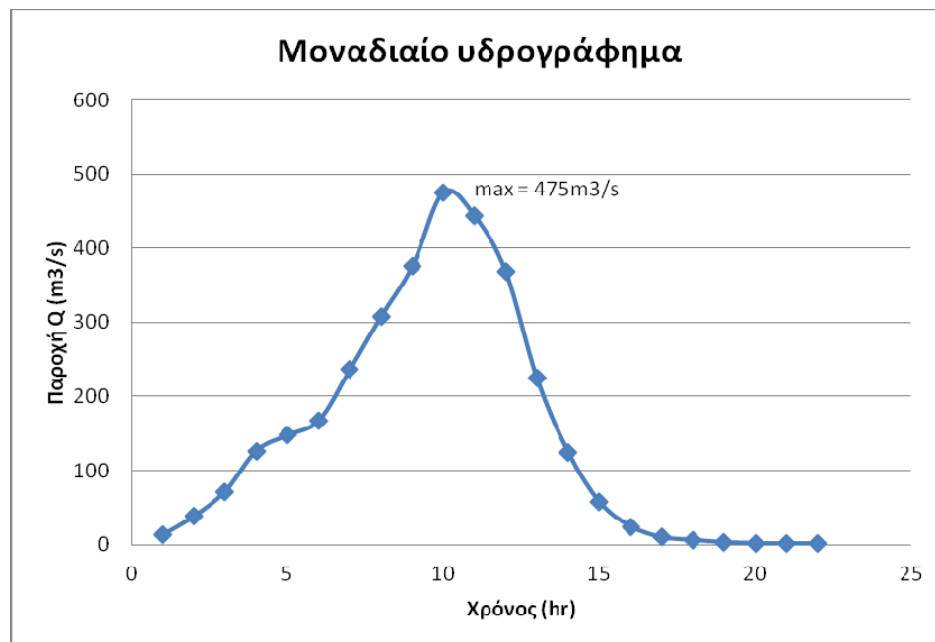
Σχήμα 4-9: Μοντέλο εκτίμησης παροχής από διαφορετικές επιφανειακές βροχοπτώσεις.

Το μοντέλο αυτό δέχεται ως δεδομένα εισόδου το αρχείο με τους χρόνους απορροής του κάθε εικονοστοιχείου το οποίο προκύπτει από την εφαρμογή του μοντέλου ΙΣΟΧΡΟΝΕΣ καθώς και το αρχείο που περιέχει τους βροχομετρικούς σταθμούς με τις μετρούμενες τιμές ωριαίας βροχόπτωσης. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από το μοντέλο αυτό είναι ένας πίνακας ο οποίος αντιστοιχίζει σε κάθε ωριαίο χρονικό βήμα την παροχή που προκύπτει στην έξοδο της λεκάνης για τη συγκεκριμένη βροχόπτωση. Επίσης προκύπτουν και τα αρχεία τα οποία απεικονίζουν τα εικονοστοιχεία που απορρέουν σε κάθε χρονική στιγμή αλλά και τη βροχόπτωση που αυτά δέχονται αναλυτικά. Στο μοντέλο αυτό ο χρήστης μπορεί να επέμβει μόνο στην επιλογή των αρχικών δεδομένων εισόδου από τα οποία παράγονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Το μοντέλο αυτό δημιουργεί επιφάνεια βροχόπτωσης μέσω της παρεμβολής της σταθμισμένης αντίστροφης απόστασης (Inverse distance weighted) από τις μετρημένες τιμές βροχόπτωσης των σταθμών και στη συνέχεια υπολογίζει την παραγόμενη παροχή για κάθε χρονική στιγμή συναρτήσει του αριθμού των εικονοστοιχείων που απορρέουν.

Αρχικά για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του μοντέλου αυτού, ορίστηκε ως δεδομένο εισόδου ο κánaβος με τους χρόνους απορροής που προέκυψε από το προηγούμενο μοντέλο (ΙΣΟΧΡΟΝΕΣ) και όλοι οι σταθμοί επιλέχθηκε να έχουν μετρημένη

βροχόπτωση 10mm. Δηλαδή εφαρμόστηκαν στο μοντέλο αυτό οι απαιτούμενες παράμετροι έτσι ώστε να παραχθεί το μοναδιαίο υδρογράφημα της περιοχής μελέτης. Με τα δεδομένα αυτά προέκυψε, όπως ήταν αναμενόμενο, το ίδιο μοναδιαίο υδρογράφημα που είχε προκύψει και από το μοντέλο ΙΣΟΧΡΟΝΕΣ.



Σχήμα 4-10: Μοναδιαίο υδρογράφημα από δεδομένα ανάλυσης 25x25 m μέσω μοντέλου ΠΑΡΟΧΗ (πηγή: Ιδία επεξεργασία)

4.3 Σενάρια μελέτης

Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν στα μοντέλα διαφορετικές κατανομές επιφανειακής βροχόπτωσης έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση της χωρικής κατανομής της βροχόπτωσης στο αντίστοιχο πλημμυρογράφημα της περιοχής αλλά και η διαφοροποίηση της από το αντίστοιχο μοναδιαίο υδρογράφημα.

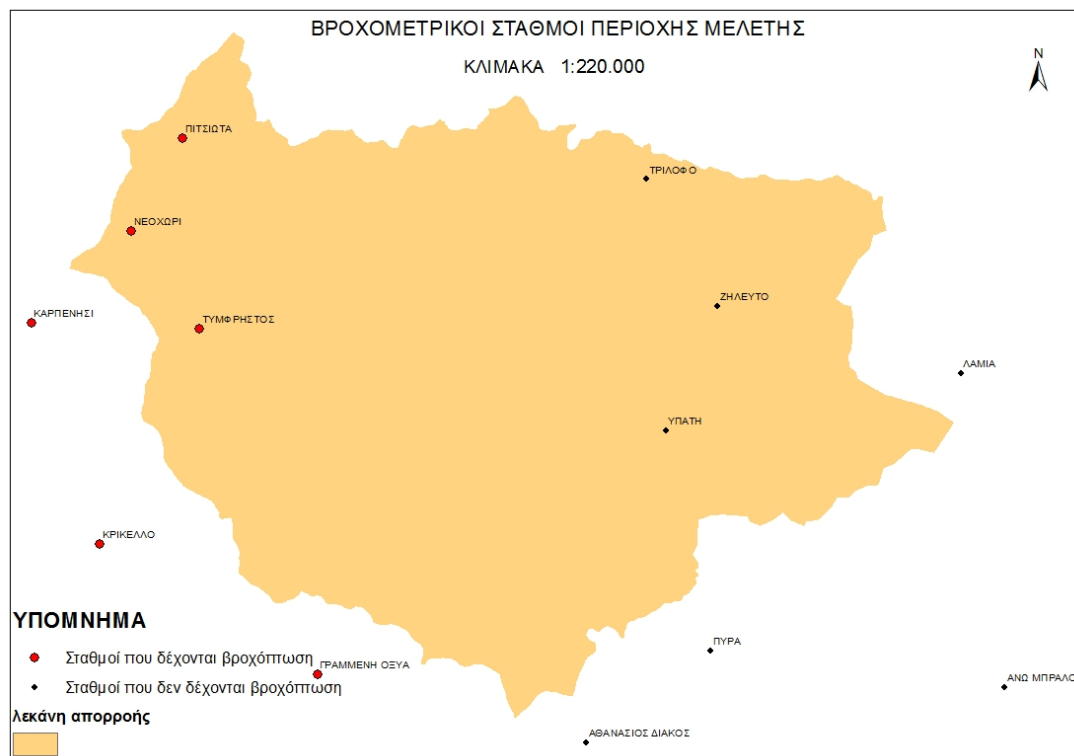
Επιλέχθηκαν 4 πιθανά σενάρια βροχόπτωσης προς μελέτη. Στο πρώτο σενάριο θεωρήθηκε ότι όλη η βροχόπτωση πέφτει στα δυτικά της περιοχής μελέτης και στα ανατολικά η βροχόπτωση είναι μηδενική. Στο δεύτερο σενάριο γίνεται ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή όλη η βροχόπτωση πέφτει στα ανατολικά της περιοχής μελέτης ενώ στα δυτικά είναι μηδενική. Στο τρίτο σενάριο όλη η βροχόπτωση πέφτει στα βόρεια

της περιοχής μελέτης ενώ στα νότια η βροχόπτωση είναι μηδενική και στο τέταρτο και τελευταίο σενάριο γίνεται το ακριβώς αντίθετο από το τρίτο.

Οι βροχοπτώσεις που εφαρμόστηκαν και στα τέσσερα σενάρια επιλέχθηκε να έχουν μέση τιμή τα 10mm, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι άμεσα συγκρίσιμα με το μοναδιαίο υδρογράφημα. Οι βροχοπτώσεις που εφαρμόστηκαν ήταν ωριαίες και η επιφανειακή κατανομή τους καθοριζόταν από την μετρημένη τιμή των χιλιοστών βροχόπτωσης στον κάθε βροχομετρικό σταθμό με χρήση της παρεμβολής σταθμισμένης αντίστροφης απόστασης (IDW).

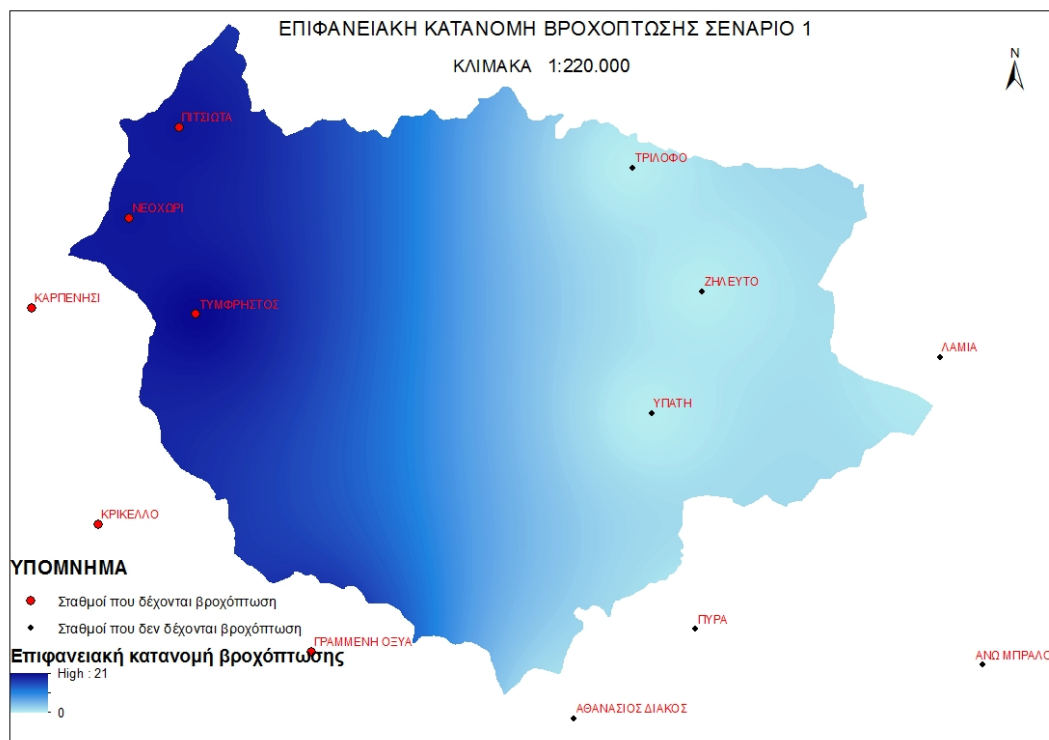
4.3.1 Σενάριο 1

Το πρώτο σενάριο προς εξέταση αφορούσε τη χωρική κατανομή της βροχόπτωσης μόνο στα δυτικά της περιοχής μελέτης. Επιλέχθηκαν δηλαδή οι βροχομετρικοί σταθμοί που βρίσκονται στα δυτικά της περιοχής μελέτης και η μετρημένη τιμή της βροχόπτωσης ορίστηκε σε αυτούς ως 20 mm. Αντίστοιχα οι υπόλοιποι βροχομετρικοί σταθμοί ορίστηκε να έχουν μηδενική μετρημένη τιμή βροχόπτωσης. Ο διαχωρισμός των σταθμών φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



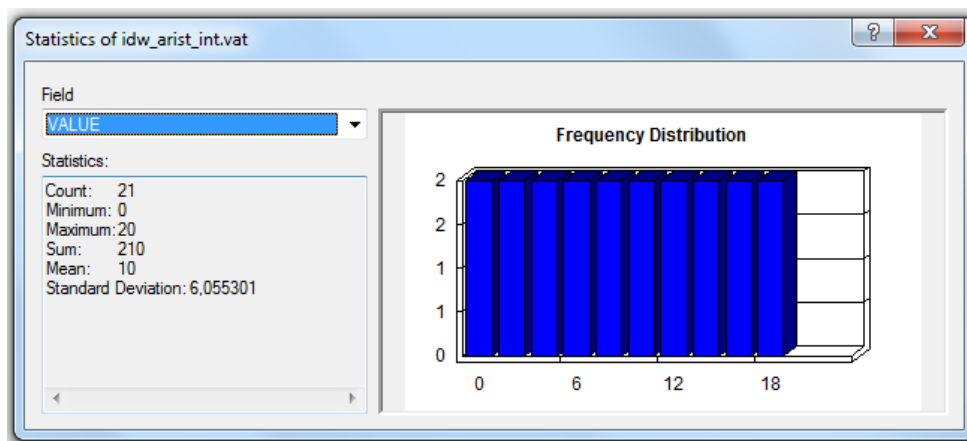
*Σχήμα 4-11: Βροχομετρικοί σταθμοί περιοχής μελέτης Σενάριο 1
(πηγή: Ιδία επεξεργασία)*

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η παρεμβολή IDW στα δεδομένα αυτά και κατασκευάστηκε η επιφανειακή κατανομή βροχόπτωσης για τη λεκάνη απορροής. Ελέγχθηκε ότι η μέση τιμή της επιφανειακά κατανεμημένης βροχόπτωσης ήταν 10 mm, ώστε να είναι άμεσα συγκρίσιμα τα αποτελέσματα με το μοναδιαίο υδρογράφημα. Επειδή με τα δεδομένα αυτά η μέση τιμή προέκυπτε μικρότερη από τα 10 mm, ο βροχομετρικός σταθμός ΤΥΜΦΡΗΣΤΟΣ ορίστηκε να δέχεται 21 mm και έτσι ο μέσος όρος ταυτίστηκε με τα 10 mm. Το αποτέλεσμα για την επιφανειακή βροχόπτωση φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



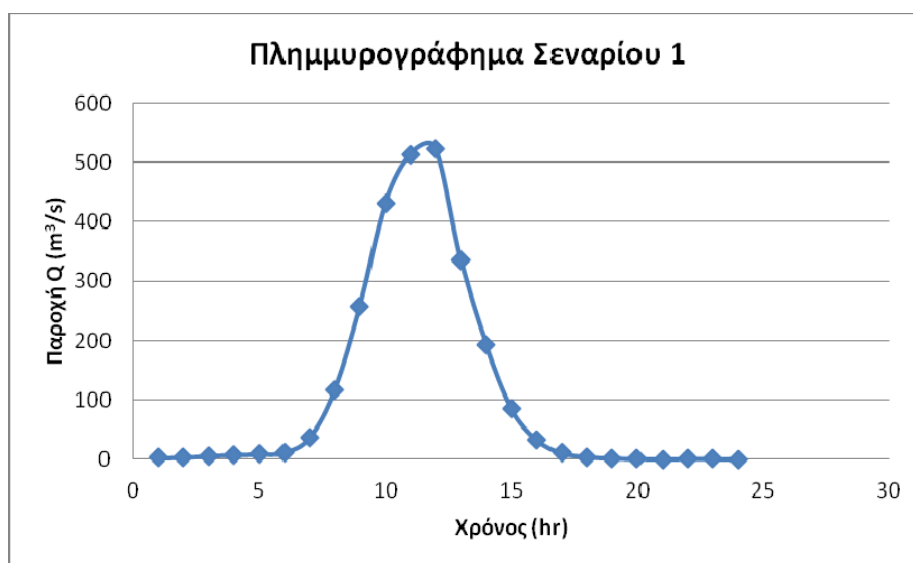
Σχήμα 4-12: Επιφανειακή κατανομή βροχόπτωσης για το Σενάριο 1
(πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται και ο πίνακας των στατιστικών αποτελεσμάτων απ’ όπου φαίνεται ότι οι τιμές της βροχόπτωσης κυμαίνονται από 0 mm έως 20 mm και ο μέσος όρος της κατανεμημένης βροχόπτωσης είναι 10 mm. Η τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων είναι 6.05 mm.

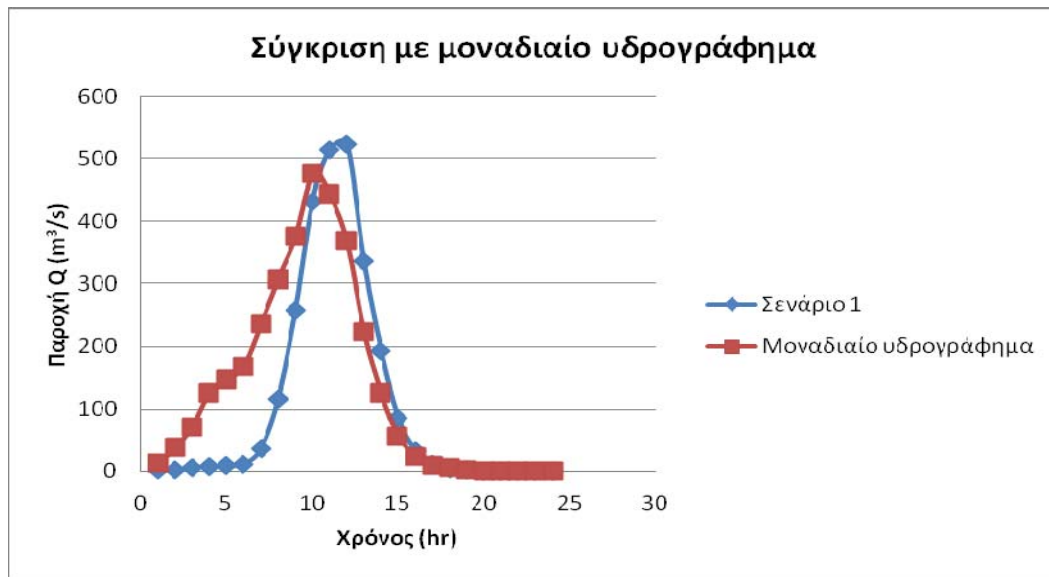


Σχήμα 4-13: Στατιστικά αποτελέσματα της κατανεμημένης βροχόπτωσης με την παρεμβολή IDW.

Για να παραχθεί το πλημμυρογράφημα για την δεδομένη βροχόπτωση εφαρμόστηκε το μοντέλο ΠΑΡΟΧΗ με το οποίο μέσω του χρόνου απορροής του κάθε εικονοστοιχείου υπολογίστηκε η παροχή που προκύπτει στην έξοδο της λεκάνης απορροής σε τακτά ωριαία διαστήματα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο αυτό απεικονίστηκαν σε ένα γράφημα το οποίο αποτελεί το πλημμυρογράφημα της περιοχής για τη δεδομένη βροχόπτωση και παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 4-14: Πλημμυρογράφημα για βροχόπτωση εξ' ολοκλήρου στα δυτικά της περιοχής μελέτης



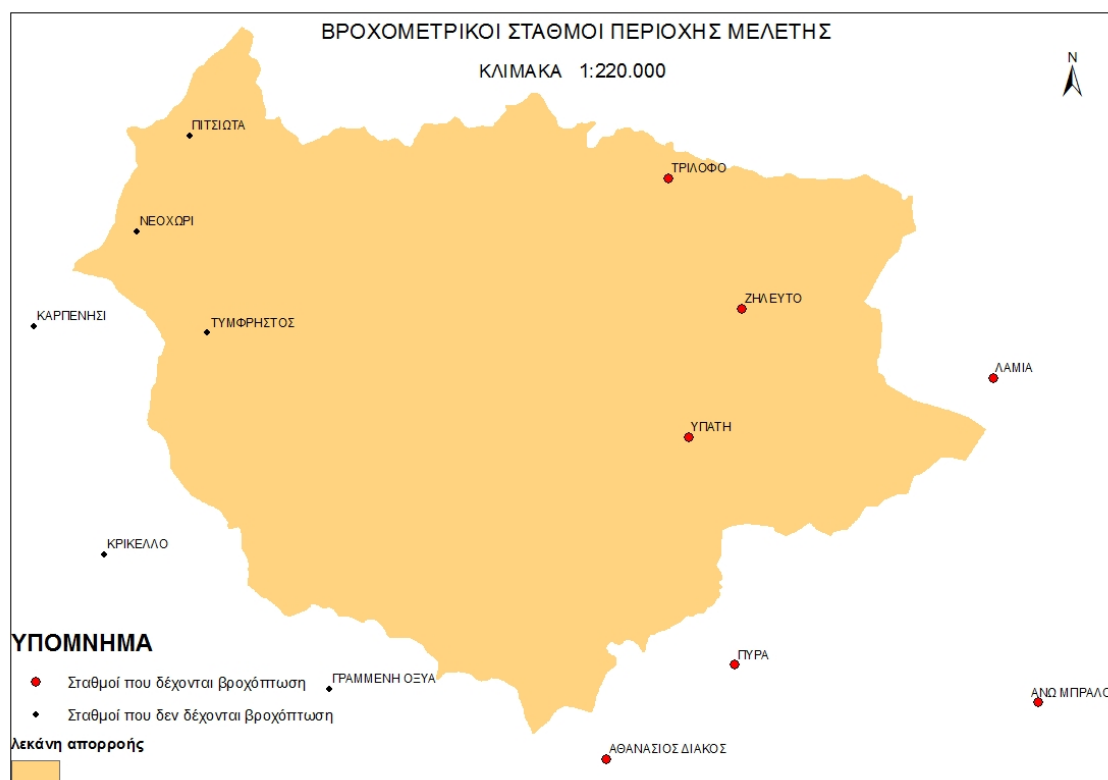
Σχήμα 4-15: Σύγκριση του πλημμυρογραφήματος του σεναρίου 1 με το μοναδιαίο υδρογράφημα

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια σύγκριση των δύο πλημμυρογραφημάτων (του σεναρίου 1 και του μοναδιαίου) για να εντοπιστεί η επίδραση της χωρικής κατανομής της βροχόπτωσης στο παραγόμενο πλημμυρογράφημα. Όπως φαίνεται εμφανώς από τη σύγκριση των δύο γραφημάτων, το πλημμυρογράφημα του σεναρίου 1 είναι ελαφρώς μετατοπισμένο προς τα δεξιά κατά το ξεκίνημα γεγονός που δικαιολογείται επειδή όλη η βροχή έχει πέσει στα πιο απομακρυσμένα χωρικά και χρονικά σημεία από την έξοδο της λεκάνης και συνεπώς υπάρχει μια καθυστέρηση κατά την εμφάνιση της στην έξοδο. Αντίστοιχα στα σημεία που έχουν μικρό χρόνο απορροής και εμφανίζονται τις πρώτες ώρες στην έξοδο της λεκάνης δεν έχει πέσει βροχόπτωση και συνεπώς δεν υπάρχει αύξηση της παροχής του ποταμού από τα σημεία αυτά. Η πρώτη εμφάνιση παροχής στο ποτάμι λόγω της βροχόπτωσης εμφανίζεται κατά την 6^η ώρα όπου φτάνουν στην έξοδο της λεκάνης τα πρώτα εικονοστοιχεία που δέχθηκαν βροχόπτωση. Η αιχμή του πλημμυρογραφήματος του σεναρίου 1 φαίνεται να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή του μοναδιαίου υδρογραφήματος και λίγο μετατοπισμένη προς τα δεξιά στον άξονα των χρόνων. Αυτό συμβαίνει καθώς στην περίπτωση του σεναρίου αυτού τα εικονοστοιχεία που φτάνουν στην έξοδο της λεκάνης μετά τις 10 ώρες έχουν δεχθεί βροχόπτωση μεγαλύτερη από τα αντίστοιχα που είχαν δεχθεί τη μοναδιαία βροχόπτωση (10 mm). Λόγω του γεγονότος ότι και στις δύο περιπτώσεις η μέση τιμή της βροχόπτωσης είναι

10mm, και τα δύο πλημμυρογραφήματα επανέρχονται στην αρχική κατάσταση κατά την ίδια περίπου χρονική στιγμή.

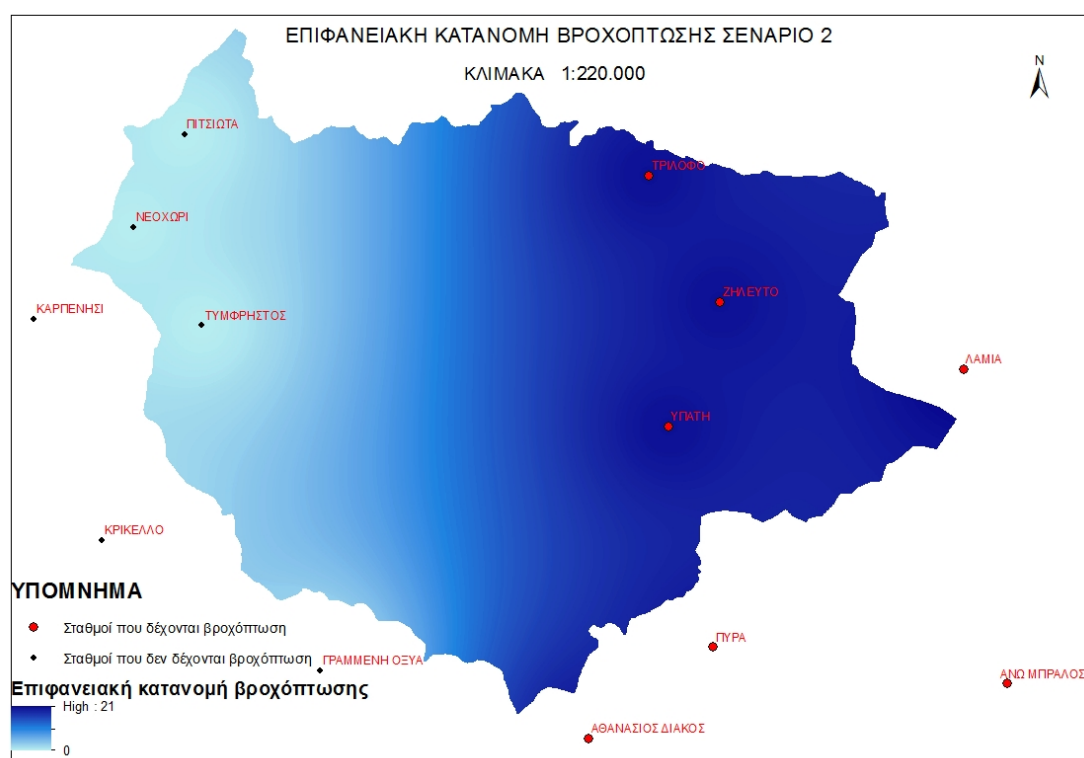
4.3.2 Σενάριο 2

Στο δεύτερο σενάριο προς εξέταση θεωρήθηκε ότι όλη η βροχόπτωση πέφτει στα ανατολικά της περιοχής μελέτης, δηλαδή κοντά στην έξοδο της λεκάνης. Επιλέχθηκαν οι βροχομετρικοί σταθμοί που βρίσκονται ανατολικά και ορίστηκε σε αυτούς μετρημένη ωριαία βροχόπτωση 20 mm. Αντίστοιχα στους υπόλοιπους βροχομετρικούς σταθμούς η μετρημένη βροχόπτωση ορίστηκε να είναι ίση με το μηδέν. Οι επιλεγμένοι σταθμοί που δέχονται βροχόπτωση στο σενάριο αυτό φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



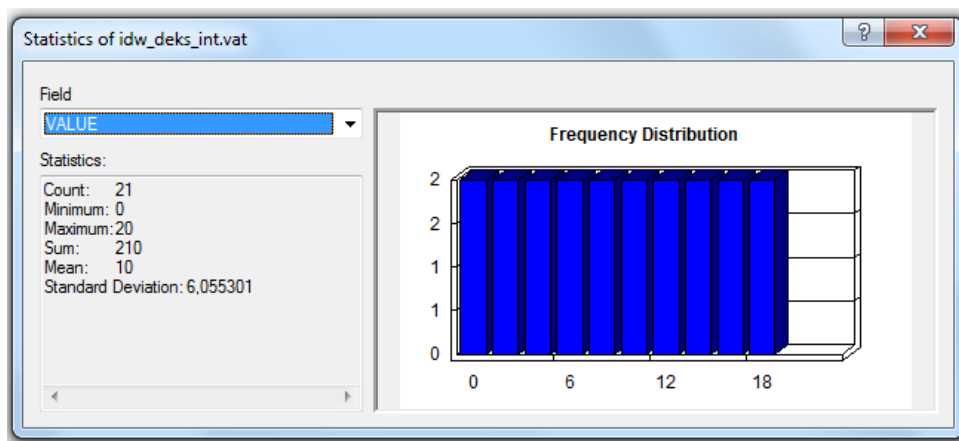
Σχήμα 4-16: Βροχομετρικοί σταθμοί περιοχής μελέτης Σενάριο 2
(πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η παρεμβολή IDW στα δεδομένα αυτά και κατασκευάστηκε η επιφανειακή κατανομή βροχόπτωσης για τη λεκάνη απορροής. Ελέγχθηκε ότι η μέση τιμή της επιφανειακά κατανεμημένης βροχόπτωσης ήταν 10mm για να είναι άμεσα συγκρίσιμα τα αποτελέσματα με το μοναδιαίο υδρογράφημα. Επειδή με τα δεδομένα αυτά η μέση τιμή προέκυπτε μικρότερη από τα 10 mm ο βροχομετρικός σταθμός ΛΑΜΙΑ ορίστηκε να δέχεται 21 mm και έτσι ο μέσος όρος ταυτίστηκε με τα 10 mm. Το αποτέλεσμα για την επιφανειακή βροχόπτωση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



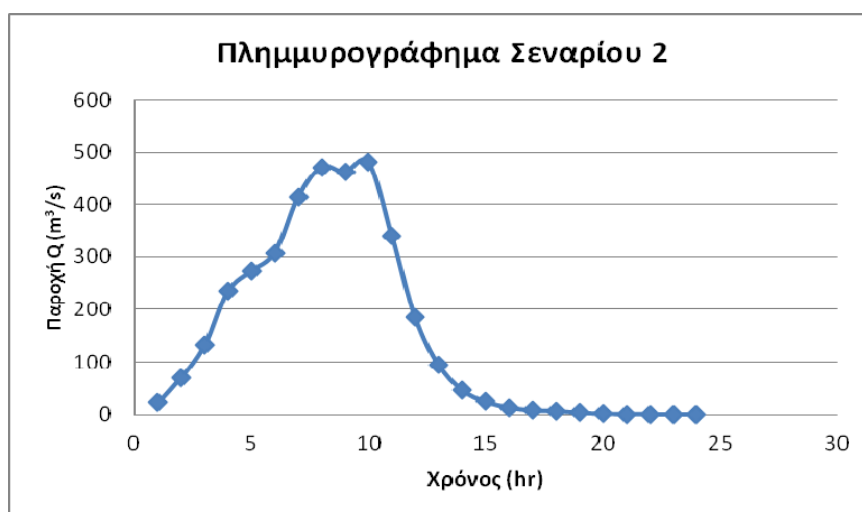
Σχήμα 4-17: Επιφανειακή κατανομή βροχόπτωσης για το Σενάριο 2
(πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται και ο πίνακας των στατιστικών αποτελεσμάτων απ' όπου φαίνεται ότι οι τιμές της βροχόπτωσης κυμαίνονται από 0 mm έως 20 mm και ο μέσος όρος της κατανεμημένης βροχόπτωσης είναι 10 mm. Η τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων είναι 6.05 mm

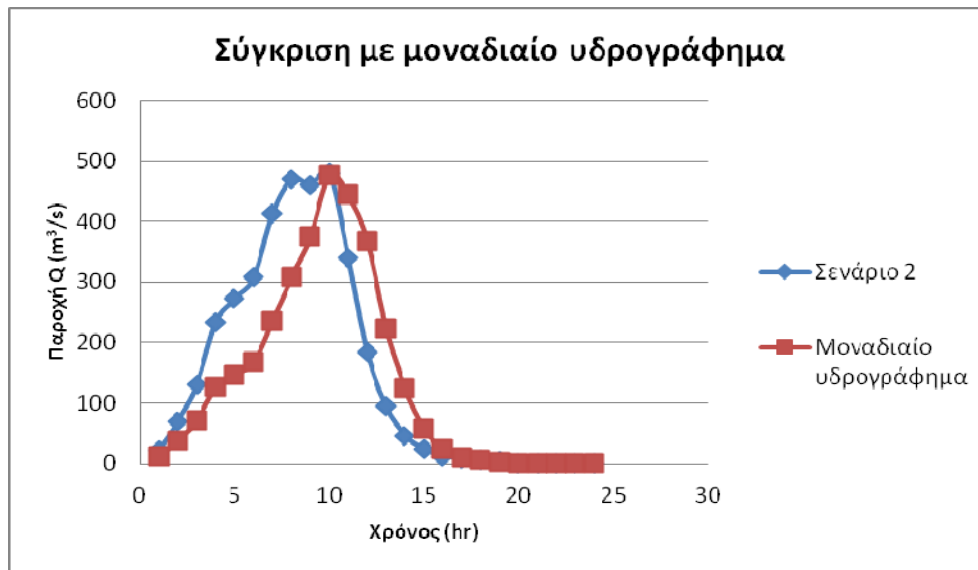


Σχήμα 4-18 Στατιστικά αποτελέσματα της κατανεμημένης βροχόπτωσης με την παρεμβολή IDW.

Για να παραχθεί το πλημμυρογράφημα για την δεδομένη βροχόπτωση εφαρμόστηκε το μοντέλο ΠΑΡΟΧΗ, με το οποίο μέσω του χρόνου απορροής του κάθε εικονοστοιχείου υπολογίστηκε η παροχή που προκύπτει στην έξοδο της λεκάνης απορροής σε τακτά ωριαία διαστήματα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο αυτό απεικονίστηκαν σε ένα γράφημα το οποίο αποτελεί το πλημμυρογράφημα της περιοχής για τη δεδομένη βροχόπτωση και στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 4-19: Πλημμυρογράφημα για βροχόπτωση εξ' ολοκλήρου στα ανατολικά της λεκάνης



Σχήμα 4-20: Σύγκριση του πλημμυρογραφήματος του σεναρίου 2 με το μοναδιαίο υδρογράφημα.

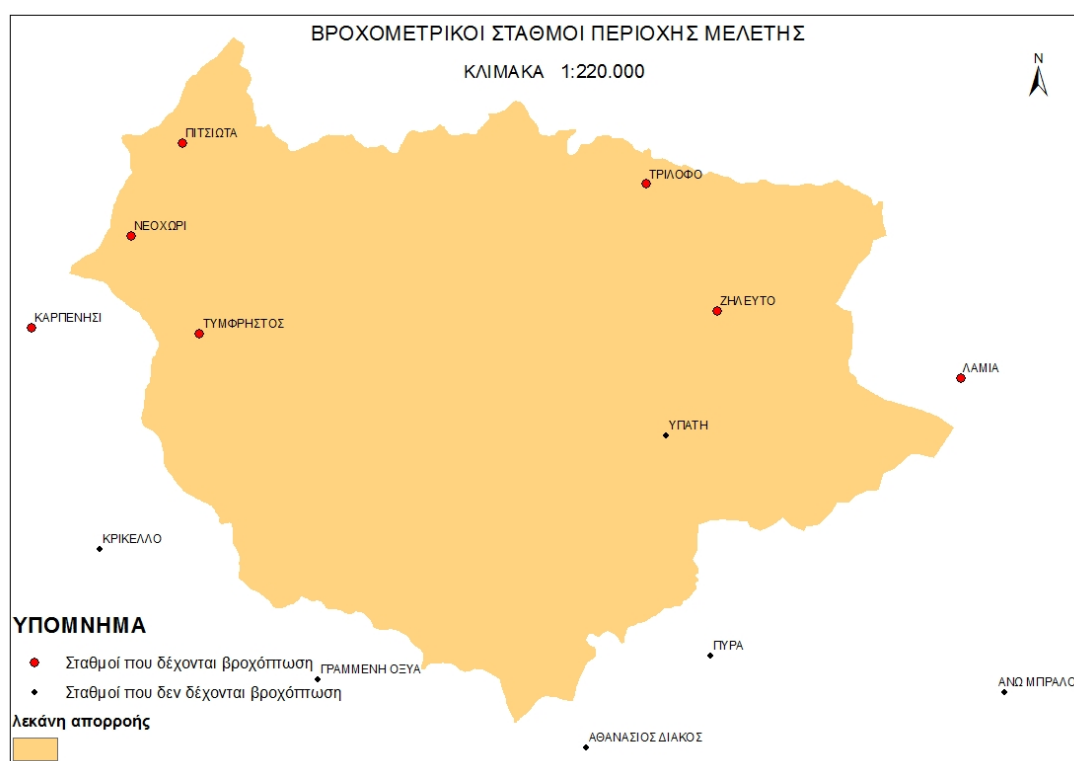
Κατά τη σύγκριση των δύο γραφημάτων παρατηρείται πως το πλημμυρογράφημα του σεναρίου 2 έχει μια πιο απότομη τάση ανόδου στην αρχή γεγονός που δικαιολογείται επειδή τα εικονοστοιχεία που φτάνουν στην έξοδο της λεκάνης της πρώτες ώρες έχουν δεχθεί μεγαλύτερη ποσότητα βροχής (20 mm) από τα αντίστοιχα που δέχθηκαν τη μοναδιαία βροχή (10 mm). Συνεπώς το πλημμυρογράφημα έχει μια πιο απότομη τάση καθώς στους ίδιους χρόνους η παροχή που παρατηρείται είναι μεγαλύτερη. Αντίστοιχα το πλημμυρογράφημα αυτό έχει και πιο σύντομα από το μοναδιαίο την καθοδική του τάση αφού τα αντίστοιχα εικονοστοιχεία που φτάνουν στην έξοδο της λεκάνης μετά τη 10^η ώρα έχουν λάβει μικρότερη ποσότητα βροχής από αυτά που δέχθηκαν τη μοναδιαία βροχή. Το ότι και τα δύο γραφήματα αφορούν μέσο όρο βροχόπτωσης (10 mm) φαίνεται καθώς τα γραφήματα αυτά κυμαίνονται στην ίδια χρονική περίοδο και επανέρχονται στην αρχική κατάσταση την ίδια περίπου χρονική στιγμή.

Επομένως, η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης φαίνεται πως έχει επίδραση στο παραγόμενο υδρογράφημα. Όταν η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης βρίσκεται μακριά από την έξοδο της λεκάνης το αντίστοιχο πλημμυρογράφημα αργεί να εμφανιστεί δηλαδή είναι ελαφρώς μετατοπισμένο προς τα δεξιά. Αντίστοιχα όταν η κατανομή της βροχόπτωσης βρίσκεται κοντά στην έξοδο της λεκάνης το πλημμυρογράφημα είναι ελαφρώς μετατοπισμένο προς τα αριστερά αφού τα

εικονοστοιχεία που δέχονται βροχόπτωση είναι χρονικά πιο κοντά στην έξοδο της λεκάνης.

4.3.3 Σενάριο 3

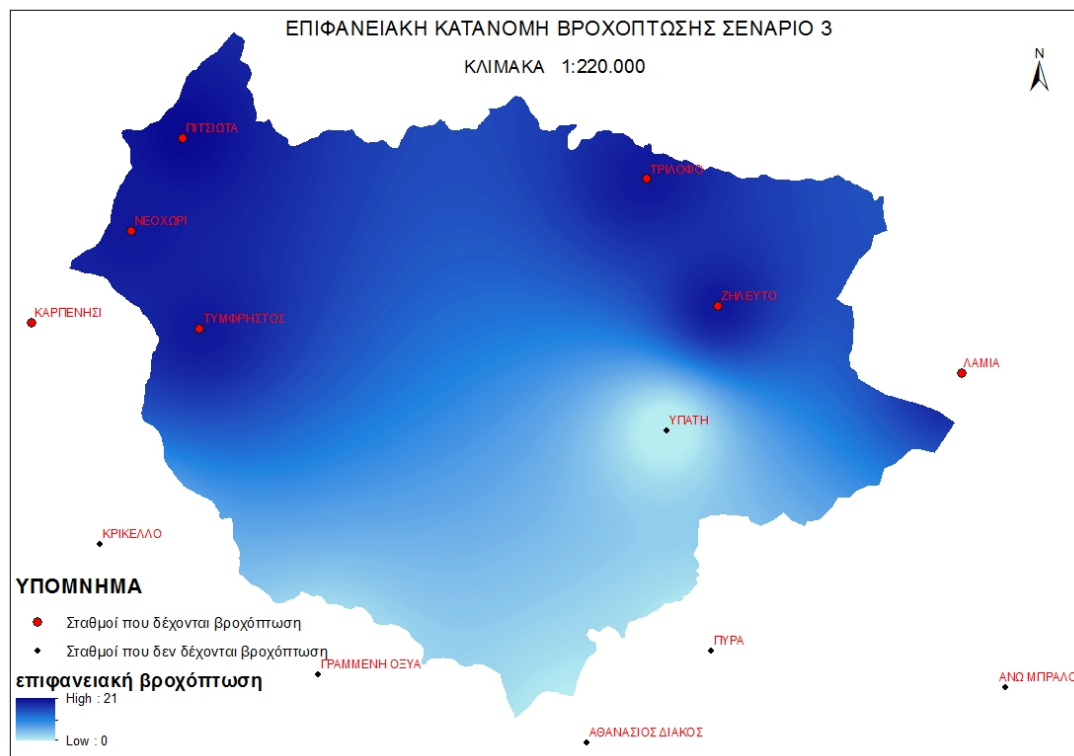
Το τρίτο σενάριο αφορούσε τη συσσώρευση της βροχόπτωσης στα βόρεια της περιοχής μελέτης. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν οι βροχομετρικοί σταθμοί που βρίσκονται στα βόρεια της λεκάνης απορροής και σε αυτούς ορίστηκε μετρημένη τιμή βροχόπτωσης ίση με 20 mm. Οι υπόλοιποι βροχομετρικοί σταθμοί ορίστηκε να έχουν μηδενική τιμή μετρημένης βροχόπτωσης. Οι επιλεγμένοι σταθμοί που δέχονται βροχόπτωση στο σενάριο αυτό φαίνονται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 4-21: Βροχομετρικοί σταθμοί περιοχής μελέτης Σενάριο 3

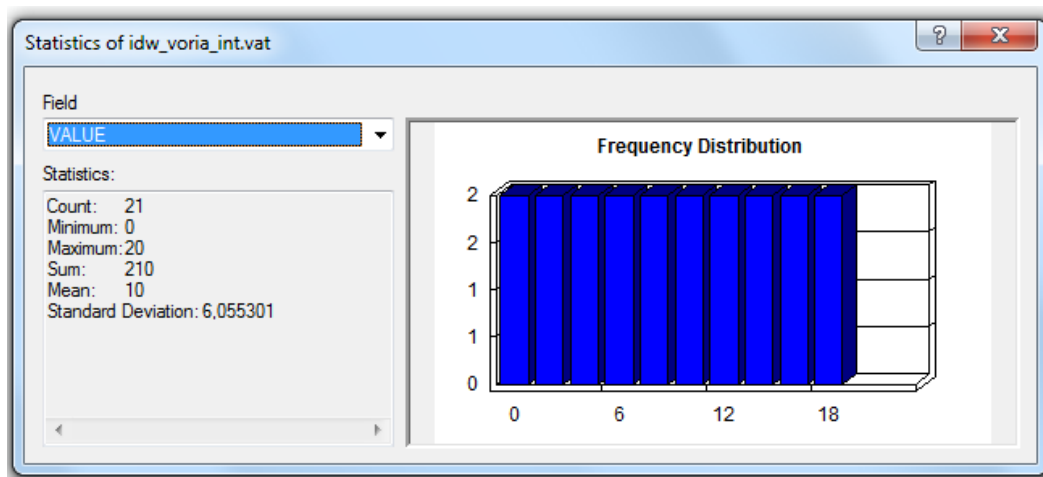
Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η παρεμβολή IDW στα δεδομένα αυτά και κατασκευάστηκε η επιφανειακή κατανομή βροχόπτωσης για τη λεκάνη απορροής και κατόπιν ελέγχθηκε ότι η μέση τιμή της επιφανειακά κατανεμημένης βροχόπτωσης

ήταν 10mm για να είναι άμεσα συγκρίσιμα τα αποτελέσματα με το μοναδιαίο υδρογράφημα. Επειδή η μέση τιμή με τα δεδομένα αυτά προέκυπτε μικρότερη από 10 mm ο βροχομετρικός σταθμός ΠΙΤΣΙΩΤΑ ορίστηκε να δέχεται 21 mm και έτσι ο μέσος όρος ταυτίστηκε με τα 10 mm. Το αποτέλεσμα για την επιφανειακή βροχόπτωση φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



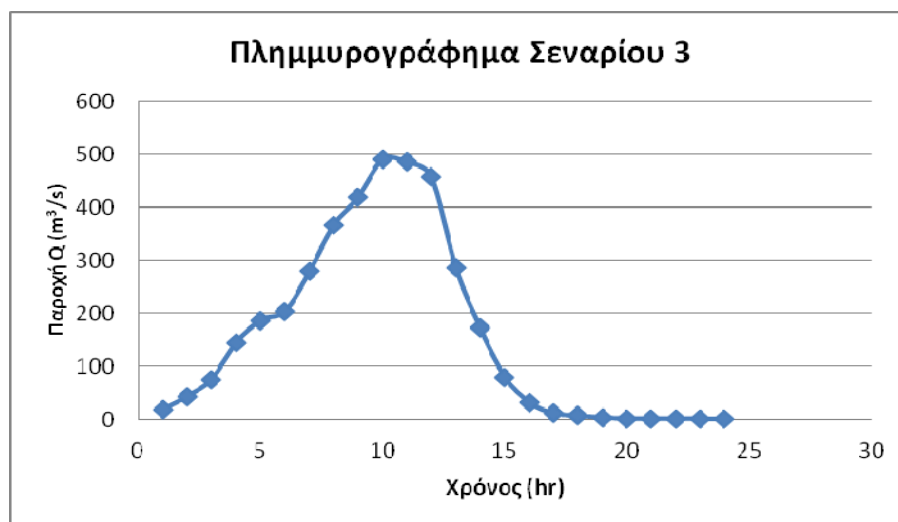
Σχήμα 4-22: Επιφανειακή κατανομή βροχόπτωσης για το Σενάριο 3

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ο πίνακας των στατιστικών αποτελεσμάτων απ' όπου φαίνεται ότι οι τιμές της βροχόπτωσης κυμαίνονται από 0 mm έως 20 mm και ο μέσος όρος της κατανεμημένης βροχόπτωσης είναι 10 mm. Η τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων είναι 6.05 mm

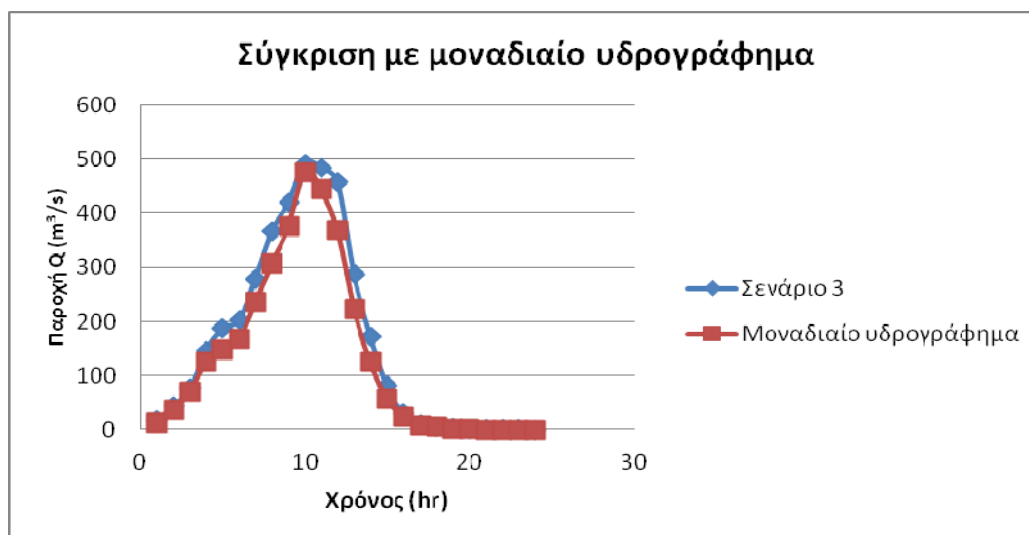


Σχήμα 4-23: Στατιστικά αποτελέσματα της κατανομής βροχόπτωσης με την παρεμβολή IDW.

Για να παραχθεί το πλημμυρογράφημα για την δεδομένη βροχόπτωση εφαρμόστηκε στα υπάρχοντα δεδομένα βροχόπτωσης το μοντέλο ΠΑΡΟΧΗ με το οποίο μέσω του χρόνου απορροής του κάθε εικονοστοιχείου υπολογίστηκε η παροχή που προκύπτει στην έξοδο της λεκάνης απορροής σε τακτά ωριαία διαστήματα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο αυτό απεικονίστηκαν σε ένα γράφημα το οποίο αποτελεί το πλημμυρογράφημα της περιοχής για τη δεδομένη βροχόπτωση και το οποίο παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 4-24: Πλημμυρογράφημα για βροχόπτωση εξ' ολοκλήρου στα βόρεια της περιοχής μελέτης.

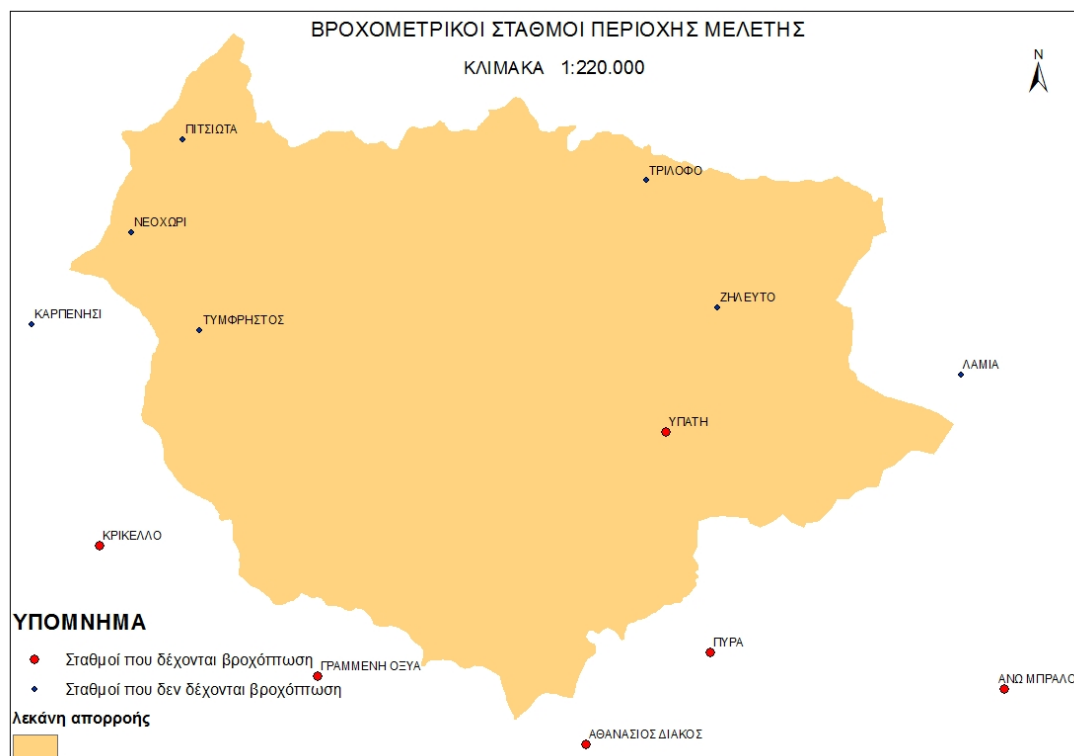


Σχήμα 4-25: Σύγκριση του πλημμυρογραφήματος του σεναρίου 3 με το μοναδιαίο υδρογράφημα.

Κατά τη σύγκριση με το μοναδιαίο υδρογράφημα δεν παρατηρείται σημαντική απόκλιση μεταξύ των δύο γραφημάτων, γεγονός που σημαίνει ότι η συγκεκριμένη χωρική κατανομή της βροχόπτωσης δεν έχει άμεσες επιπτώσεις στο πλημμυρογράφημα της περιοχής. Δηλαδή αν όλη η βροχόπτωση πέσει στα βόρεια της περιοχής μελέτης και το νότιο τμήμα της δεν δεχθεί καθόλου βροχόπτωση, το πλημμυρογράφημα της περιοχής δεν θα επηρεαστεί σημαντικά και δεν θα έχει μεγάλες διαφοροποιήσεις από το πλημμυρογράφημα που δημιουργείται από τη μοναδιαία βροχόπτωση. Αυτό δικαιολογείται καθώς όταν όλη η βροχή πέφτει στα βόρεια της περιοχής μελέτης, όλα τα κατά μήκος εικονοστοιχεία που βρίσκονται εντός του τμήματος αυτού δέχονται ποσότητα βροχόπτωσης. Συνεπώς λαμβάνουν βροχόπτωση και τα εικονοστοιχεία που έχουν μικρό χρόνο απορροής αλλά και τα απομακρυσμένα εικονοστοιχεία. Επομένως το πλημμυρογράφημα που δημιουργείται αφορά όλους τους χρόνους απορροής, όπως και το μοναδιαίο, αλλά ταυτόχρονα ενώ τα εικονοστοιχεία που δέχονται βροχόπτωση είναι λιγότερα δέχονται διπλάσια ποσότητα βροχής, συνεπώς η παροχή που δημιουργείται στην έξοδο είναι παρόμοια με αυτή της μοναδιαίας βροχόπτωσης.

4.3.4 Σενάριο 4

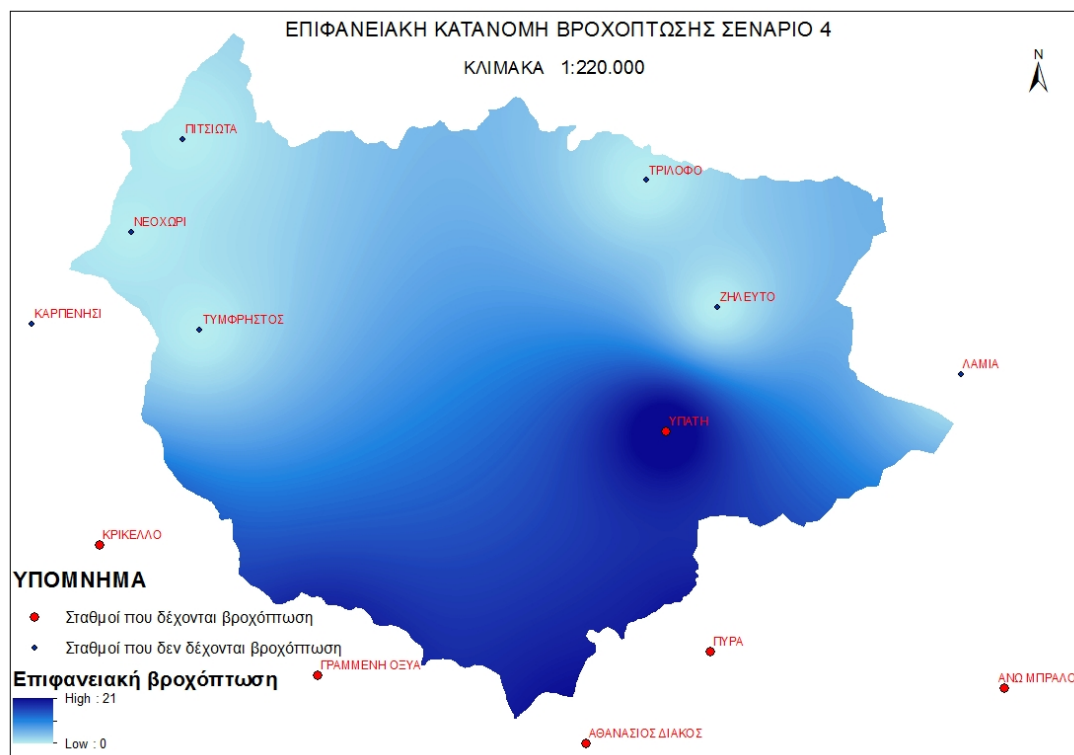
Το τέταρτο σενάριο προς εξέταση αφορούσε την χωρική κατανομή της βροχόπτωσης μόνο στα νότια της περιοχής μελέτης. Επιλέχθηκαν δηλαδή οι βροχομετρικοί σταθμοί που βρίσκονται στα νότια της περιοχής μελέτης και σε αυτούς η μετρημένη τιμή της βροχόπτωσης ορίστηκε ως 20 mm. Αντίστοιχα οι υπόλοιποι βροχομετρικοί σταθμοί ορίστηκε να έχουν μηδενική μετρημένη τιμή βροχόπτωσης. Ο διαχωρισμός τους φαίνεται ξεκάθαρα στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 4-26: Βροχομετρικοί σταθμοί περιοχής μελέτης Σενάριο 4

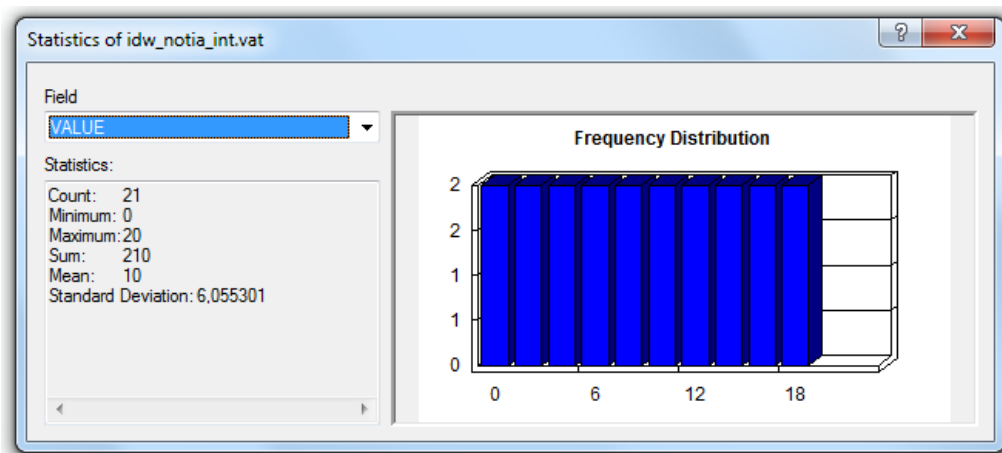
Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η παρεμβολή IDW στα δεδομένα αυτά και κατασκευάστηκε η επιφανειακή κατανομή βροχόπτωσης για τη λεκάνη απορροής. Κατόπιν, ελέγχθηκε ότι η μέση τιμή της επιφανειακά κατανεμημένης βροχόπτωσης ήταν 10 mm για να είναι άμεσα συγκρίσιμα τα αποτελέσματα με το μοναδιαίο υδρογράφημα. Επειδή η μέση τιμή με τα δεδομένα αυτά προέκυπτε μικρότερη από τα 10 mm ο βροχομετρικός σταθμός ΥΠΑΤΗ ορίστηκε να δέχεται 21 mm και έτσι ο

μέσος όρος ταυτίστηκε με τα 10 mm. Το αποτέλεσμα για την επιφανειακή βροχόπτωση φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



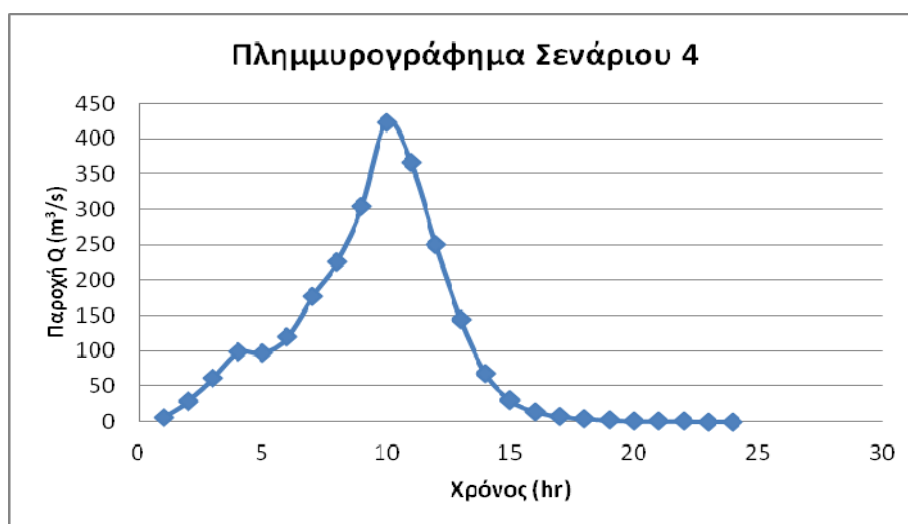
Σχήμα 4-27: Επιφανειακή κατανομή βροχόπτωσης για το Σενάριο 4

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται και ο πίνακας των στατιστικών αποτελεσμάτων απ' όπου φαίνεται ότι οι τιμές της βροχόπτωσης κυμαίνονται από 0 mm έως 20 mm και ο μέσος όρος της κατανεμημένης βροχόπτωσης είναι 10 mm. Η τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων είναι 6.05 mm.

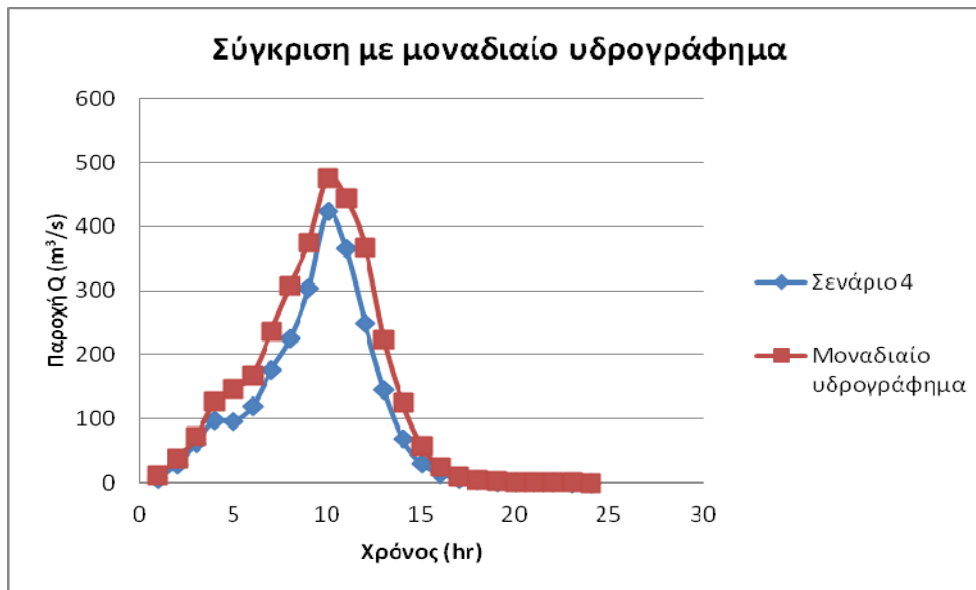


Σχήμα 4-28: Στατιστικά αποτελέσματα της κατανομής βροχόπτωσης με την παρεμβολή IDW.

Για να παραχθεί το πλημμυρογράφημα για την δεδομένη βροχόπτωση εφαρμόστηκε υπάρχοντα δεδομένα βροχόπτωσης το μοντέλο ΠΑΡΟΧΗ το οποίο υπολόγισε μέσω του χρόνου απορροής του κάθε εικονοστοιχείου την παροχή που προκύπτει στην έξοδο της λεκάνης απορροής σε τακτά ωριαία διαστήματα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο αυτό απεικονίστηκαν σε ένα γράφημα το οποίο είναι και το πλημμυρογράφημα της περιοχής για τη δεδομένη βροχόπτωση. Το γράφημα αυτό παρουσιάζεται στη συνέχεια.



Σχήμα 4-29: Πλημμυρογράφημα για βροχόπτωση εξ' ολοκλήρου στα νότια της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 4-30: Σύγκριση του πλημμυρογραφήματος του σεναρίου 4 με το μοναδιαίο υδρογράφημα.

Παρατηρείται ότι κατά τη σύγκριση των δύο γραφημάτων δεν παρουσιάζονται σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ τους. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται είναι στην παροχή αιχμής όπου στο πλημμυρογράφημα του σεναρίου 4 είναι ελαφρώς μικρότερη. Όπως ήταν αναμενόμενο τα γραφήματα αυτά δεν διαφέρουν ιδιαίτερα καθώς στο σενάριο 4 η βροχόπτωση πέφτει μόνο στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης αλλά με μεγαλύτερη ένταση από τη μοναδιαία βροχόπτωση καθώς οι σταθμοί δέχονται διπλάσια χιλιοστά βροχόπτωσης. Στο σενάριο αυτό η επιφανειακή βροχόπτωση είναι κατανεμημένη στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης όπου υπάρχουν εικονοστοιχεία που απορρέουν σε όλους τους πιθανούς χρόνους απορροής. Συνεπώς στην έξοδο της λεκάνης φτάνουν εικονοστοιχεία που μεταφέρουν ποσότητα βροχής σε κάθε χρονική στιγμή και γι' αυτό το γράφημα αυτό μοιάζει τόσο με το μοναδιαίο υδρογράφημα. Η διαφορά στην παροχή αιχμής μπορεί να δικαιολογηθεί καθώς τα εικονοστοιχεία που δέχονται βροχόπτωση στο σενάριο αυτό δεν είναι ισομοιρασμένα με αυτά που δεν δέχονται και συνεπώς η παροχή στην έξοδο της λεκάνης είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτήν που δημιουργείται από τη μοναδιαία βροχόπτωση.

4.4 Εκτίμηση βροχοπτώσεων σχεδιασμού

4.4.1 Μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ

Η βασικότερη παραδοχή στην κατάρτιση της καταιγίδας σχεδιασμού στις λεκάνες αφορά στη χρονική κατανομή του συνολικού ύψους βροχής. Από τις απλοποιημένες μεθόδους, ως πλέον δόκιμη θεωρείται αυτή της δυσμενέστερης διάταξης του υετογραφήματος σχεδιασμού (ή worst profile· US Department of the Interior, 1977; Koutsoyiannis, 1994) και η παραλλαγή αυτής, γνωστή ως μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ (alternating block method· Sutcliffe, 1978; Chow et al., 1988).

Η εκτίμηση της βροχόπτωσης σχεδιασμού βασίζεται στην πιθανοτική ανάλυση παρατηρημένων ακραίων υψών (h) ή εντάσεων (i) βροχής, η οποία εν τέλει οδηγεί στην κατάρτιση σχέσεων έντασης- διάρκειας (d) - περιόδου επαναφοράς (T) της βροχής, ή αλλιώς των όμβριων καμπυλών.

Η γενική συναρτησιακή σχέση όμβριων καμπυλών είναι της μορφής:

$$i = \frac{a(T)}{b(d)} \quad (4.1)$$

όπου i η μέγιστη ένταση βροχής διάρκειας d για περίοδο επαναφοράς T, και a(T) και b(d) κατάλληλες συναρτήσεις της περιόδου επαναφοράς και της διάρκειας, αντίστοιχα (Κουτσογιάννης, 1997).

Η συνάρτηση b(d) είναι της ακόλουθης, εμπειρικά διαπιστωμένης, γενικής μορφής:

$$b(d) = (d + \theta)^n \quad (4.2)$$

όπου θ και n αποτελούν παραμέτρους προς εκτίμηση, όπου $\theta \geq 0$ και $0 < n < 1$ (Κουτσογιάννης, 1997).

Η συνάρτηση a(T) προκύπτει αναλυτικά από τη συνάρτηση κατανομής που ισχύει για τη μέγιστη ένταση βροχής της υπό εξέταση περιοχής, όπως αυτή προκύπτει από την επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων, ενώ αποφεύγεται η χρήση εμπειρικών συναρτήσεων (Κουτσογιάννης, 1997).

Μια συνάρτηση κατανομής που αποδεικνύεται κατάλληλη για τη μέγιστη ένταση βροχής σε μεγάλο εύρος περιπτώσεων είναι η κατανομή Γενική Ακραίων Τιμών (ΓΑΤ· διεθνώς General Extreme Value – GEV – distribution). Αυτή η κατανομή ενσωματώνει τις κατανομές ακραίων τιμών τύπου I, II, και III και έχει την έκφραση:

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 + \kappa \left(\frac{x}{\lambda} - \psi \right) \right]^{\frac{-1}{\kappa}} \right\} \quad (4.3)$$

όπου $F(x)$ η συνάρτηση κατανομής της μεταβλητής x , και $\kappa > 0$, $\lambda > 0$ και ψ οι παράμετροι σχήματος, κλίμακας και θέσης, αντίστοιχα. Η μεταβλητή x αντιπροσωπεύει είτε την ένταση βροχής i είτε, ισοδύναμα, το γινόμενο $i b(d)$ (για δεδομένη έκφραση της $b(d)$)· στην τελευταία περίπτωση η επίλυση της (4.3) ως προς x δίνει αμέσως τη συνάρτηση $a(T)$ και, στη συνέχεια, η επίλυση ως προς i δίνει αμέσως την έκφραση της όμβριας καμπύλης χωρίς να απαιτείται καμιά πρόσθετη, εμπειρική ή όχι, παραδοχή (Koutsoyiannis, 1997· Koutsoyiannis et al., 1998).

Η αποδοχή της κατανομής ΓΑΤ σε συνδυασμό με τις (4.1) και (4.2) οδηγεί στην ακόλουθη γενικευμένη έκφραση όμβριων καμπυλών:

$$i(d, T) = \frac{\lambda' \left\{ \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]^{-\kappa} + \psi' \right\}}{(d + \theta)^n} \quad (4.4)$$

όπου για απλοποίηση έχει τεθεί $\lambda' = \lambda/\kappa$ και $\psi' = \kappa\psi - 1$ (Koutsoyiannis et al., 1998).

Η αντίστοιχη εξίσωση προκύπτει θεωρητικά ότι έχει την ακόλουθη απλούστερη έκφραση (Koutsoyiannis et al., 1998):

$$i(d, T) = \frac{\lambda' (T^\kappa + \psi')}{(d + \theta)^n} \quad (4.5)$$

Για την εκτίμηση των παραμέτρων λ , ψ (ή ισοδύναμα λ' , ψ'), κ , θ και n των παραπάνω εκφράσεων όμβριων καμπυλών έχουν διατυπωθεί από τον Koutsoyiannis, (βλ. Koutsoyiannis et al., 1998) δύο συνεπείς στατιστικές μέθοδοι, οι οποίες αποφεύγουν τη χρήση εμπειρικών τεχνικών που χρησιμοποιούνταν παλιότερα.

Οι τελικές τιμές των παραμέτρων για τους διάφορους σταθμούς φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (βλ. Κουτσογιάννης κ.α, 2003):

Σταθμός \ παραμέτρος	Τρίλοφο	Ζηλευτό	Πιτσιωτά	Υπάτη	Νεοχώρι	Τυμφρηστός	Λαμία	«Μέση»
θ	0	0	0	0	0	0	0	0
η (h)	0.57	0.60	0.55	0.60	0.55	0.55	0.60	0.58
κ	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
λ (mm)	4.01	4.06	5.44	5.02	5.85	4.23	4.86	4.63
ψ	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22
λ' (mm)	26.73	27.07	36.27	33.47	39.00	28.20	32.40	30.87
ψ'	-0.517	-0.517	-0.517	-0.517	-0.517	-0.517	-0.517	-0.517

*Πίνακας 4-1: Εκτιμημένες παράμετροι όμβριων καμπυλών
(πηγή: Κουτσογιάννης κ.α, 2003)*

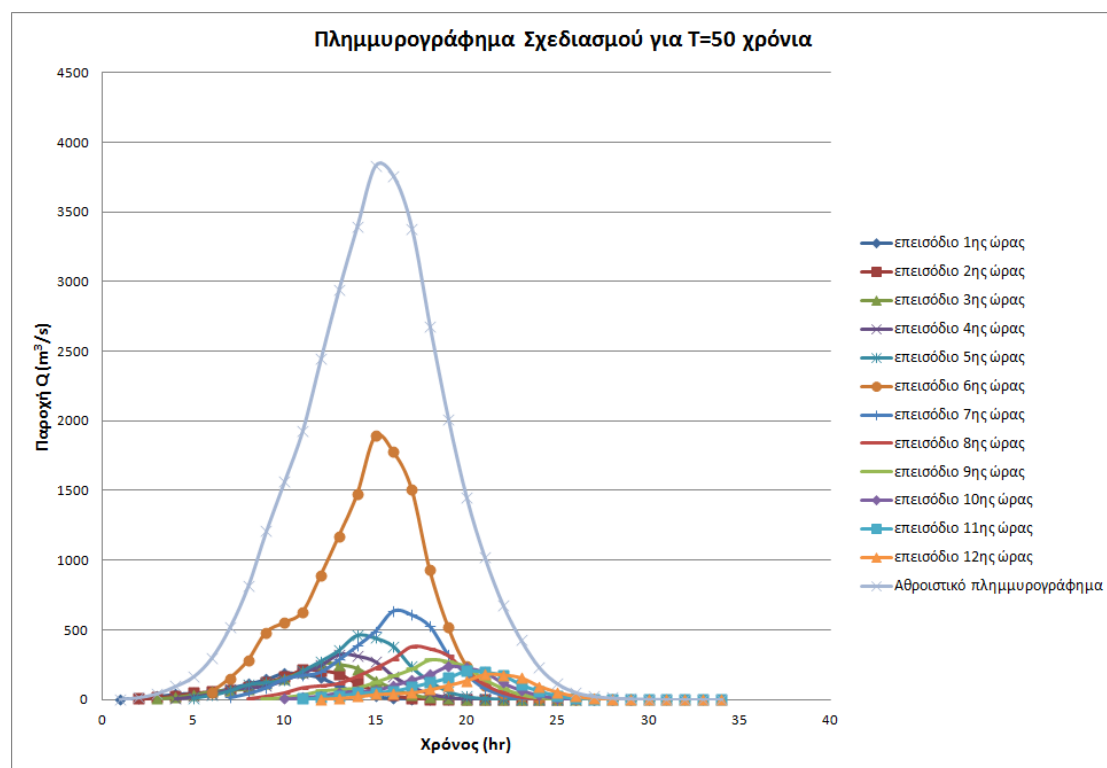
Συνεπώς η εξίσωση όμβριων καμπυλών (4.5), παίρνοντας υπόψη τις κοινές για όλους τους σταθμούς παραμέτρους, γράφεται:

$$i(d, T) = \frac{\lambda'(T^{0.15} - 0.517)}{d^n} \quad (d \text{ σε h και } i \text{ σε mm/h)} \quad (4.6)$$

Στην παραλλαγή των εναλλασσόμενων μπλοκ δεν χρησιμοποιείται το μοναδιαίο υδρογράφημα για τη χρονική διάταξη των τμηματικών υψών βροχής, αλλά αυτά διατάσσονται κατά το δυνατόν συμμετρικά και ταυτόχρονα σε φθίνουσα σειρά γύρω από την κεντρική τιμή, η οποία συμπίπτει με το μέγιστο τμηματικό ύψος βροχής. Για την παρούσα μελέτη υιοθετήθηκε ολική διάρκεια βροχής 12 ωρών και χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ για την κατάρτιση της καταιγίδας σχεδιασμού. Τα δεδομένα εξετάστηκαν για περίοδο επαναφοράς 50 έτη.

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ υπολογίστηκε για κάθε σταθμό ξεχωριστά η εξίσωση της όμβριας καμπύλης και μέσω αυτής υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα ύψη βροχής για κάθε δεδομένη χρονική στιγμή καθ' όλη τη διάρκεια της βροχής (12 ώρες). Ως τελική βροχή σχεδιασμού, από τον ορισμό της μεθόδου, αντιστοιχήθηκε το μέγιστο τμηματικό ύψος βροχής στην κεντρική τιμή (6^η ώρα) και τα υπόλοιπα ύψη βροχής διατάχθηκαν συμμετρικά ως προς αυτό για κάθε βροχομετρικό σταθμό ξεχωριστά. Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν οι ωριαίες βροχοπτώσεις (όπως προέκυψαν από τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ) στο

μοντέλο εκτίμησης παροχής και παράχθηκαν τα αντίστοιχα υδρογραφήματα. Τα υδρογραφήματα διατάχθηκαν με διαφορά μιας ώρας αφού προέρχονταν από ωριαίες βροχοπτώσεις και τελικά παράχθηκε το συνολικό αθροιστικό πλημμυρογράφημα.



Σχήμα 4-31: Πλημμυρογράφημα σχεδιασμού της λεκάνης απορροής για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη που προκύπτει με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ μέσω των όμβριων καμπυλών.

(πηγή: Ιδία επεξεργασία)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Σ.Γ.Π. και Υδρολογία

Η μεθοδολογία που εφαρμόσθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας βασίζεται στα πλεονεκτήματα που προσφέρει η τεχνολογία των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών στις μεθόδους υδρολογικής ανάλυσης που έχουν κατά καιρούς αναπτυχθεί. Η τεχνολογία των συστημάτων αυτών αυτοματοποίησε σε μεγάλο βαθμό τη διαδικασία της μεθόδου επιφάνειας – χρόνου. Τα εξειδικευμένα εργαλεία που περιλαμβάνονται στο λογισμικό βοηθούν την εφαρμογή της. Τα Σ.Γ.Π. παρέχουν τη δυνατότητα για γρήγορη και εύκολη εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων (χαρτογραφικών και βάσεων δεδομένων) και επεξεργασία αυτών. Τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται με τη χρήση Σ.Γ.Π. θα ήταν εξαιρετικά δύσκολο να επιτευχθούν με άλλες παραδοσιακές και/ή σύγχρονες, τεχνικές και μεθόδους.

Συγκεκριμένα εργαλεία όπως το flow direction, flow length και άλλα διευκολύνουν το χρήστη των εφαρμογών, καθώς παράγουν εύκολα και γρήγορα αποτελέσματα. Η χειροκίνητη επίλυση των ίδιων διαδικασιών είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα. Επίσης η εφαρμογή model builder είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς δίνει τη δυνατότητα αυτοματοποίησης της διαδικασίας της χωρικής ανάλυσης και επιτρέπει στο χρήστη την άμεση εποπτεία όλων των διεργασιών που εκτελούνται και τον πλήρη έλεγχο των δεδομένων. Σημαντικό στοιχείο της εφαρμογής αυτής είναι η δημιουργία παραμέτρων, με τις οποίες ο χρήστης μπορεί να πειραματίζεται και να έχει άμεση εποπτεία της επίδρασής τους. Μέσω της εφαρμογής αυτής δίνεται η δυνατότητα και σε μη πεπειραμένους χρήστες του λογισμικού να εφαρμόζουν τις υδρολογικές ρουτίνες και να αξιοποιούν τα αποτελέσματά τους.

Κατά την εκπόνηση της παρούσας μελέτης διαπιστώθηκε η σημαντική βοήθεια των Σ.Γ.Π. Γίνεται αντιληπτό το ευρύ πεδίο εφαρμογής των Σ.Γ.Π. λόγω των συνεχώς αναπτυσσόμενων μέσων εφαρμογών και τεχνολογικών εργαλείων. Σημαντικό πλεονέκτημα των Σ.Γ.Π. είναι ότι τα δεδομένα μπορούν να ανακτηθούν με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Το διαθέσιμο πλήθος των υπολογιστικών εργαλείων επιτρέπουν

χρήσιμους και εύχρηστους χειρισμούς, όπως μετρήσεις από χάρτη, επικαλύψεις, επιθέσεις, μετασχηματισμούς, σχεδίαση γραφικών και διαχείριση βάσεων δεδομένων. Επίσης με τη χρήση Σ.Γ.Π. μπορούν να γίνουν διαχρονικές αναλύσεις, δηλαδή να συγκριθούν ίδια χαρακτηριστικά σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και άλλες μορφές αναλύσεων οι οποίες διαφορετικά θα ήταν δύσκολες ή αδύνατες.

Συνεπώς, η χρήση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, ως εργαλείο λήψης αποφάσεων και «πλατφόρμα» υποστήριξης μοντέλων, μειώνει τον απαιτούμενο χρόνο και αυξάνει την αξιοπιστία και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων με αποτέλεσμα τη διευκόλυνση των σχετικών αποφάσεων (Wellar, 1990; Crossland et al, 1995).

5.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία δύο μοντέλων με χρήση του λογισμικού ArcGIS, τα οποία αναπαριστούν φυσικές υδρολογικές διεργασίες.

Το πρώτο καταμετρημένο εννοιολογικό μοντέλο βροχής - απορροής, προσομοιώνει μεμονωμένα υδρολογικά γεγονότα και μπορεί να παράγει υδρογραφήματα. Κύριος στόχος του μοντέλου αυτού είναι η εκτίμηση της πλημμυρικής αιχμής και κατά δεύτερο λόγο η εκτίμηση του χρόνου απορροής της λεκάνης απορροής. Αναλυτικότερα, το μοντέλο προσδιορίζει το ιστόγραμμα χρόνου – επιφάνειας της λεκάνης απορροής, από το οποίο προκύπτει ένα συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης.

Το δεύτερο υδρολογικό μοντέλο που δημιουργήθηκε, υπολογίζει την παραγόμενη παροχή του ποταμού στην έξοδο της λεκάνης για διαφορετικές επιφανειακές βροχοπτώσεις. Κύριοι στόχοι του μοντέλου είναι η δημιουργία του τελικού πλημμυρογραφήματος που προκύπτει από μια συγκεκριμένη βροχόπτωση στη λεκάνη απορροής και η διερεύνηση της επίδρασης της χωρικής μεταβλητότητας της βροχόπτωσης στο παραγόμενο πλημμυρογράφημα.

Για την εφαρμογή και τη σωστή λειτουργία των μοντέλων στη δεδομένη περιοχή μελέτης έγιναν ορισμένες παραδοχές και παραμετροποιήθηκαν ορισμένα στοιχεία

της ανάλυσης μέσω της διαδικασίας της ρύθμισης. Η διαδικασία της ρύθμισης βασίστηκε σε αποτελέσματα που είχαν προκύψει από προγενέστερη μελέτη «Υδρολογική μελέτη λεκάνης Σπερχειού» (Κουτσογιάννης κ.α., 2003). Με βάση τη μελέτη αυτή ορίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων (ταχύτητες ροής υδρογραφικού δικτύου, έκταση απορροής υδρογραφικού δικτύου, χρόνος απορροής) για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.

Από την εφαρμογή της μεθόδου χρόνου – επιφάνειας, προέκυψαν ικανοποιητικά αποτελέσματα και συμπεράσματα. Ο χρόνος απορροής που προέκυψε (περίπου 15hr) είναι αναμενόμενος για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης και συμπίπτει με τα ελληνικά δεδομένα απορροής. Επίσης, η παροχή αιχμής είναι παρόμοια με αυτές που είχαν προκύψει για τη δεδομένη περιοχή από παλιότερες μελέτες με διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού και συνεπώς επαληθεύεται. Στο μοναδιαίο υδρογράφημα που προέκυψε με τη μέθοδο χρόνου - επιφάνειας προέκυψαν κάποια εικονοστοιχεία (pixel) με μεγάλους χρόνους απορροής (>20hr) τα οποία θεωρούνται εσφαλμένα λόγω ατελειών της ανάλυσης του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους και δεν λαμβάνονται υπόψη. Τα εικονοστοιχεία αυτά αποτελούν το 0.18% των συνολικών, αριθμός μη υπολογίσιμος για τα τελικά αποτελέσματα.

Όσον αφορά στη μέθοδο εκτίμησης της παροχής παρατηρείται ότι το μοντέλο παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα καθώς το μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης ήταν το ίδιο είτε αυτό παράχθηκε εμμέσως από τη μέθοδο επιφάνειας - χρόνου είτε από το μοντέλο ΠΑΡΟΧΗ. Το πλεονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι ότι μπορεί να υπολογίσει την παραγόμενη παροχή στην έξοδο της λεκάνης για οποιαδήποτε ένταση και χωρική κατανομή της βροχόπτωσης.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διερεύνηση της επίδρασης της χωρικής κατανομής της βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης ήταν ικανοποιητικά και αναμενόμενα. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης κατά μήκος της λεκάνης απορροής (Ανατολή – Δύση) έχει σημαντική επίδραση στο τελικό υδρογράφημα καθώς επηρεάζει την παραγόμενη παροχή στην έξοδο της λεκάνης. Αντίθετα η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης κατά πλάτος της λεκάνης απορροής (βορράς – νότος) δεν συνεισφέρει στην επίδραση της μεταβολής της παροχής αλλά τα υδρογραφήματα που παράγονται από αυτές τις βροχοπτώσεις είναι παρόμοια με το αντίστοιχο μοναδιαίο. Αυτό συμβαίνει διότι η τελική παροχή

στην έξοδο της λεκάνης εξαρτάται από το χρόνο απορροής του κάθε εικονοστοιχείου συναρτήσει της ποσότητας βροχόπτωσης που αυτό δέχεται. Συνεπώς η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης επηρεάζει το παραγόμενο υδρογράφημα όταν ο κύριος άξονας μεταβολής της συμπίπτει με τον κύριο άξονα μεταβολής της χωρικής κατανομής του χρόνου απορροής που προκύπτει από τη γεωμετρία της λεκάνης. Επομένως όσο μικρότερη γωνία σχηματίζουν οι δύο άξονες τόσο μεγαλύτερη είναι η μεταβολή του παραγόμενου υδρογραφήματος.

Τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν από την παρούσα εργασία αναπαριστούν τις διαδικασίες της υδρολογικής ανάλυσης και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υδρολογική ανάλυση και άλλων λεκανών με χρήση διαφορετικών παραμέτρων. Η συμβολή της δημιουργίας τέτοιων μοντέλων είναι σημαντική καθώς αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και από μη πεπειραμένους χρήστες του λογισμικού καθιστώντας δυνατή την εξαγωγή αποτελεσμάτων χωρίς να είναι απαραίτητη η εξειδικευμένη γνώση των υδρολογικών διαδικασιών και χωρίς να απαιτείται σημαντική προεπεξεργασία των δεδομένων. Κατά την ανάπτυξη των μοντέλων δόθηκε έμφαση στην ανάπτυξη εύχρηστων διαδικασιών, έτσι ώστε ο χρήστης να καθοδηγείται απόλυτα ως προς τα δεδομένα που πρέπει να εισάγει στο σύστημα και στην αυτόματη εξαγωγή των αποτελεσμάτων χωρίς την εμπλοκή του στις αναλυτικές πολύπλοκες διαδικασίες.

5.3 Συμπεράσματα ως προς τη μεθοδολογία ρύθμισης των παραμέτρων

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων των μεθόδων και των μοντέλων που παρουσιάστηκαν εξαρτάται από την ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων καθώς και από τη διαδικασία ρύθμισης ορισμένων παραμέτρων για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.

Σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων αποτελεί το κατώφλι, ο αριθμός δηλαδή των εικονοστοιχείων που συμμετέχουν στην απορροή, το οποίο ορίζεται από το χρήστη για τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης. Η επιφανειακή απορροή είναι φαινόμενο που μεταβάλλεται δυναμικά με το χρόνο και δεν υπάρχει αντικειμενικό κριτήριο διαχωρισμού των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου από πιθανές αυλακώσεις του εδάφους. Συνεπώς

ο ορισμός της τιμής του κατωφλίου (threshold) είναι μέγιστης σημασίας για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων καθώς αυτή καθορίζει την αξιοπιστία του εξαγόμενου υδρογραφικού δικτύου. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του κατωφλίου τόσο διευρύνεται το εξαγόμενο υδρογραφικό δίκτυο και συνεπώς μειώνονται οι χρόνοι απορροής.

Οι εκτιμήσεις των συντελεστών τραχύτητας που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της χερσαίας ροής προέκυψαν με βάση το χάρτη χρήσεων γης. Οι εκτιμήσεις αυτές επηρεάζουν άμεσα τα αποτελέσματα λόγω του σημαντικού ρόλου της χερσαίας ροής. Από τη διερεύνηση της επίδρασης του συντελεστή τραχύτητας του εδάφους στα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι μπορεί να υπολογιστεί ένας αριθμός k μέσω της διαδικασίας της ρύθμισης του μοντέλου (βαθμονόμηση), ο οποίος εξαρτάται από τις χρήσεις γης, ο οποίος μπορεί να αντικαταστήσει τον κλίμακα του συντελεστή τραχύτητας του εδάφους ώστε να παράγονται παρόμοια αποτελέσματα. Με τον τρόπο αυτό το μοντέλο γίνεται πιο φιλικό προς το χρήστη και άμεσα αξιοποιήσιμο, καθώς απαιτούνται λιγότερα δεδομένα εισόδου.

Επιπλέον, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων επηρεάζεται σημαντικά και από τις ταχύτητες ροής των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και της χερσαίας ροής. Οι ταχύτητες ροής του υδρογραφικού δικτύου εμπειρικά κυμαίνονται περίπου στο 1 m/s. Οι τιμές της ταχύτητας για κάθε κλάδο μπορούν να προκύψουν είτε με εφαρμογή μοντέλων αυτόματου υπολογισμού τα οποία έχουν αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό (Kilgore, 1997; Χριστοφίδης, 2007) είτε με χειροκίνητη εισαγωγή από το χρήστη. Στη συγκεκριμένη εργασία οι τιμές των ταχυτήτων ροής του υδρογραφικού δικτύου εισήχθησαν χειροκίνητα από το χρήστη με βάση τη διαδικασία ρύθμισης των παραμέτρων.

Για την εφαρμογή του μοντέλου επιφάνειας - χρόνου με αξιόπιστα αποτελέσματα απαιτείται ρύθμιση των παραμέτρων με βάση πραγματικές μετρήσεις απορροής. Συνεπώς, η χρησιμοποίηση του μοντέλου επιφάνειας - χρόνου σε λεκάνη απορροής για την οποία δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις απορροής είναι παρακινδυνευμένη.

5.4 Προτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν είναι ικανή να αξιοποιήσει όλες τις δυνατότητες ανάπτυξης μοντέλων που απεικονίζουν πλήρως τα φυσικά φαινόμενα όπως είναι η βροχόπτωση και η απορροή. Η ανάπτυξη ενός μοντέλου που προσομοιώνει τη φύση, χωρίς πλήρη γνώση της υφιστάμενης κατάστασης, είναι δύσκολο εγχείρημα με αμφίβολα αποτελέσματα. Κύριο αίτιο της δυσκολίας αυτής είναι ότι τα διαθέσιμα δεδομένα της υφιστάμενης κατάστασης είναι ελάχιστα έως ανεπαρκή. Για το λόγο αυτό στην παρούσα διπλωματική εργασία τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν είναι εννοιολογικά, και όχι φυσικής βάσης και επομένως η ακρίβεια των αποτελεσμάτων τους βασίζεται στην επιλογή των παραμέτρων. Ο κύριος διαχωρισμός των όρων αυτών είναι ότι στα εννοιολογικά μοντέλα γίνεται μια προσπάθεια αναπαράστασης της φυσικής πραγματικότητας, η οποία προϋποθέτει εκτίμηση παραμέτρων. Η ακρίβεια των μοντέλων στηρίζεται στην ακρίβεια της ρύθμισης των παραμέτρων και στη σωστή επιλογή των τιμών τους με βάση πραγματικές μετρήσεις ή εμπειρικές γνώσεις. Συνεπώς η φυσική συνέπεια ενός εννοιολογικού μοντέλου είναι σχετική και εξαρτάται από το βαθμό κατά τον οποίο οι παράμετροι θεωρούνται αντιπροσωπευτικές των χαρακτηριστικών της λεκάνης. Αντίθετα ένα μοντέλο φυσικής βάσης μπορεί να θεωρηθεί θεωρητικά πλήρες αλλά αναφέρεται μόνο σε πολύ μικρή χωρική κλίμακα. Το πλεονέκτημα των εννοιολογικών μοντέλων είναι η απλότητά τους, η οποία επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών με έντονη χωρική ανομοιογένεια μέσω ενός μικρού αριθμού παραμέτρων.

Μια πρόταση για περαιτέρω έρευνα στην υδρολογική ανάλυση με χρήση εννοιολογικών μοντέλων για την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών είναι η μελέτη των παραμέτρων μέσω πειραματικών πληροφοριών και δεδομένα πλημμυρών για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Αυτό στοχεύει στην καλύτερη βαθμονόμηση του μοντέλου και στην αντιπροσωπευτικότερη επιλογή των τιμών των παραμέτρων έτσι ώστε τα αποτελέσματα να συγκλίνουν ακόμη περισσότερο στην πραγματική κατάσταση των φυσικών διεργασιών.

Το μοντέλο της παρούσας εργασίας περιλαμβάνει τη χειροκίνητη εισαγωγή από το χρήστη των ταχυτήτων του υδρογραφικού δικτύου. Σημαντική εξέλιξη της εργασίας μπορεί να γίνει με τον υπολογισμό των ταχυτήτων αυτών μέσω του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους, δηλαδή με τη συσχέτιση της γεωμορφολογίας (κλίση,

ανάγλυφο) και των υδραυλικών χαρακτηριστικών (συντελεστής τραχύτητας, βρεχόμενη περίμετρος, διατομή) με τις ταχύτητες ροής εντός του υδρογραφικού δικτύου. Με τον τρόπο αυτό οι τιμές των ταχυτήτων ροής θα είναι πιο αντιπροσωπευτικές για τη συγκεκριμένη περιοχή αφού θα βασίζονται στο ανάγλυφο της περιοχής και όχι στην παραμετροποίηση τους από το χρήστη.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί να δοκιμαστεί σε λεκάνη όπου οι τιμές της τραχύτητας της χερσαίας ροής έχουν προκύψει με ακριβέστερη μέθοδο και όχι απαραίτητα βάσει του χάρτη χρήσεων γης. Επίσης, μπορεί να γίνει πρόσθετη επεξεργασία του μοντέλου με την εισαγωγή νέων εμπειρικών τύπων οι οποίοι να προσομοιώνουν καλύτερα τις υδρολογικές διαδικασίες.

Τέλος, θα ήταν χρήσιμο να γίνει προσπάθεια βελτιστοποίησης του προγραμματισμού του μοντέλου στο Model Builder του λογισμικού ArcGIS, έτσι ώστε κάποιες διεργασίες να πραγματοποιούνται με λιγότερα βήματα και επομένως η ανάλυση να γίνεται γρηγορότερα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν και τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν ικανοποίησαν σε μεγάλο βαθμό τους στόχους της διπλωματικής εργασίας, συνθέτοντας και αναλύοντας τα διαθέσιμα δεδομένα και παρέχοντας αξιόπιστα και χρήσιμα συμπεράσματα ως προς τις υδρολογικές διαδικασίες που μελετήθηκαν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

Αυγέρη Μ, «Διπλωματική εργασία: Ανάπτυξη εργαλείων υδρολογικής ανάλυσης σε περιβάλλον Σ.Γ.Π.», Μάιος 2010

Δερβός Ν., «Υπολογισμός Συνθετικών Υδρογραφημάτων με χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδατικών Πόρων, Αθήνα 2005

Ευστρατιάδης, Α., «Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων», Διδακτορική διατριβή, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2008.

Κουτσογιάννης, Δ., Μαμάσης Ν., και Ευστρατιάδης Α., «Υδρολογική μελέτη λεκάνης Σπερχειού», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιανουάριος 2003

Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, «Τεχνική Υδρολογία», Έκδοση 3, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999

Κουτσόπουλος Κ., «Ανάλυση Χώρου: Θεωρία, μεθοδολογία και τεχνικές», Τόμος 1, Εκδόσεις Διηνεκές, 2006

Κουτσόπουλος Κ., «Ανάλυση Χώρου: Θεωρία, μεθοδολογία και τεχνικές», Τόμος 2, Εκδόσεις Διηνεκές, Αθήνα 2006

Κουτσόπουλος Κ.,» Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και Ανάλυση Χώρου», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2005

Κουτσόπουλος Κ. και Ανδρουλάκης Ν., «Εφαρμογές του λογισμικού ArcGIS 9.x με απλά λόγια», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2005

Λαμπράκης Ν., «Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία», Εργαστήριο Υδρογεωλογίας, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωλογίας και Γεωφυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών,

Μαμάσης Ν., Διαφάνειες μαθήματος Προχωρημένη Υδρολογία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2010.

Μαμάσης Ν., Διαφάνειες μαθήματος Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά Έργα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2007

Μαμάσης Ν., Διαφάνειες μαθήματος Υδατικό Περιβάλλον και Ανάπτυξη, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2010

Μαμάσης Ν και Κουτσογιάννης Δ., «Γεωμορφολογία και Απορροή», Σημειώσεις μαθήματος «Προχωρημένη Υδρολογία», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδατικών Πόρων, Αθήνα 1999

Μιμίκου Μ., Φωτόπουλος Φ., «Υδατικό Περιβάλλον και Ανάπτυξη», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2004

Μπέλλος Β., «Σημειώσεις για το μάθημα Τεχνικής Υδρολογίας: Απορροές» Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τομές Υδραυλικών Έργων, 2006

Σκοπελίτη Α. & Στάμου Λ., 2006. Παρουσίαση στο μάθημα «Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ

Τσακίρης Γ., «Τεχνική Υδρολογία», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1995

Χριστοφίδης Α., «Ανάπτυξη Μοντέλου βροχής – απορροής σε σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούνιος 2008

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

ArcGIS Desktop Help. ESRI ArcGIS Desktop 9.3, ESRI, 2009

ArcGIS Desktop Help. ESRI ArcGIS Desktop 10, ESRI, 2010

Burrough P.A. and McDonell R.A., "Principles of Geographical Information Systems", Oxford University Press, New York, 1998

Chang K., "Introduction to Geographic Information Systems", International Edition, McGraw-Hill, 2003

Dingman S.L., "Physical Hydrology", Upper Saddle River, Prentice-Hall, New Jersey, 2002

Dunne T. and Leopold L., Water in Environmental Planning, 1978

ESRI, ARC-VIEW, Advanced Spatial Analysis using raster and vector data, 1996

Fairfield J. and Leymarie P., "Drainage Networks from grid digital elevation models", Water Resources Research, 1991

Gregory, J.K. and Walling, D.E, "Drainage basins form and process: A geomorphological approach" Edward Arnold, London, 1973

Horton R.E., "Erosional characteristics of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology", Bull. Geol. Soc. America, 1945

Kilgore J.L., "Development and evaluation of a GIS-based spatially distributed unit hydrograph model", MS thesis, Biological Systems Engineering Dept., Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 1997

Leopold, L. and Miller, J.P., "Ephemeral streams - hydraulic factors and their relation to the drainage net", U.S. Geol. Survey Prof. Paper, 1956

Linsley, Kohler, Paulhus, "Applied Hydrology", McGraw-Hill, 1949

Marathon Data Systems, 2002. Training manual ArcGIS, ESRI

Montgomery D.R. and Foufoula-Georgiou E., "Channel network source representation using digital elevation models", Water Res. Res., 1993

Sherman, L. K. 1932. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. Eng. News Record

Wieczorek M., Flow-Based Method for Stream Generation in a GIS, May 2010

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: Χάρτες

Χάρτης 1: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, ανάλυσης 25x25m, της περιοχής μελέτης (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Χάρτης 2: Χρήσεις Γης της περιοχής μελέτης με βάση την κωδικοποίηση Corine (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Χάρτης 3: Συντελεστής τραχύτητας εδάφους περιοχής μελέτης σε σχέση με τις χρήσεις γης (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Χάρτης 4: Υδρολιθολογικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Χάρτης 5: Υδρογραφικό δίκτυο περιοχής μελέτης από δεδομένα ανάλυσης 25x25m και για τιμή κατωφλίου 1600pixel.

Χάρτης 6: Ιεράρχηση υδρογραφικού δικτύου περιοχής μελέτης κατά Stahler

Χάρτης 7: Ταχύτητες χερσαίας ροής από δεδομένα ανάλυσης 25x25m.

Χάρτης 8: Ταχύτητες ροής υδρογραφικού δικτύου από δεδομένα ανάλυσης 25x25m.

Χάρτης 9: Συνολικές ταχύτητες ροής από δεδομένα ανάλυσης 25x25m

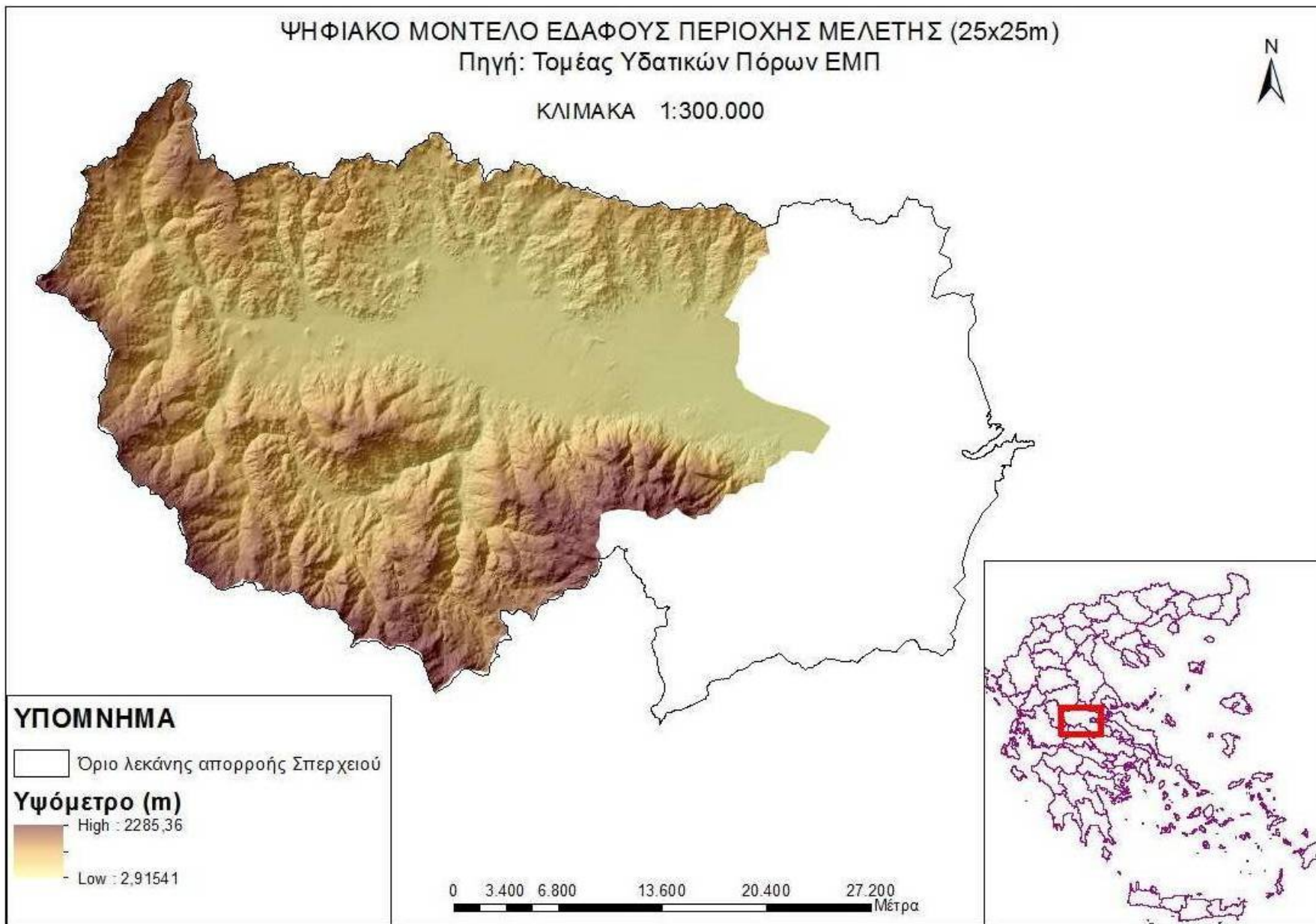
Χάρτης 10: Χρόνοι απορροής των εικονοστοιχείων της περιοχής μελέτης από δεδομένα ανάλυσης 25x25m.

Χάρτης 11: Επιφανειακή κατανομή βροχόπτωσης 20mm στα δυτικά της περιοχής μελέτης (Σενάριο 1).

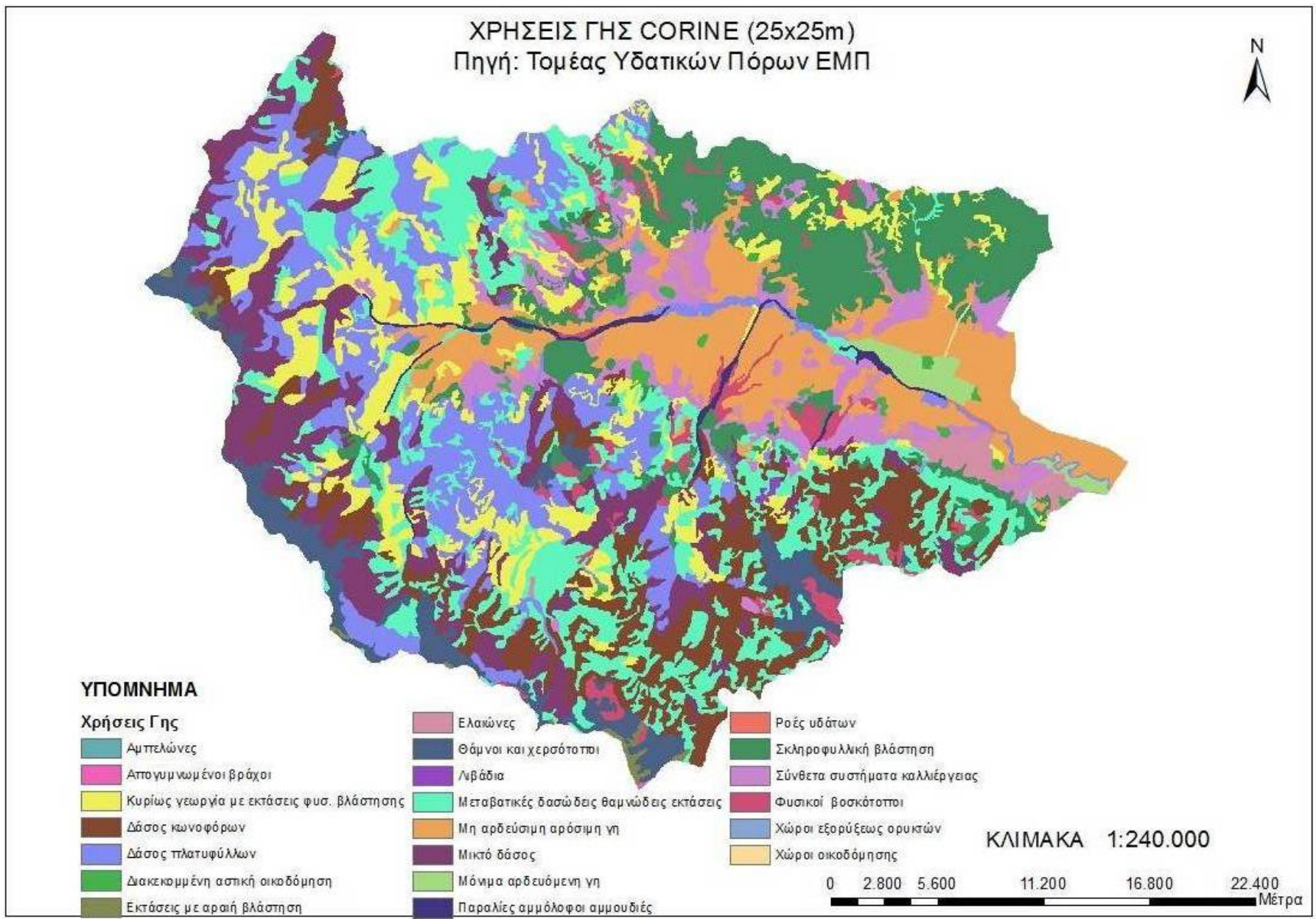
Χάρτης 12: Επιφανειακή κατανομή βροχόπτωσης 20mm στα ανατολικά της περιοχής μελέτης (Σενάριο 2).

Χάρτης 13: Επιφανειακή κατανομή βροχόπτωσης 20mm στα βόρεια της περιοχής μελέτης (Σενάριο 3).

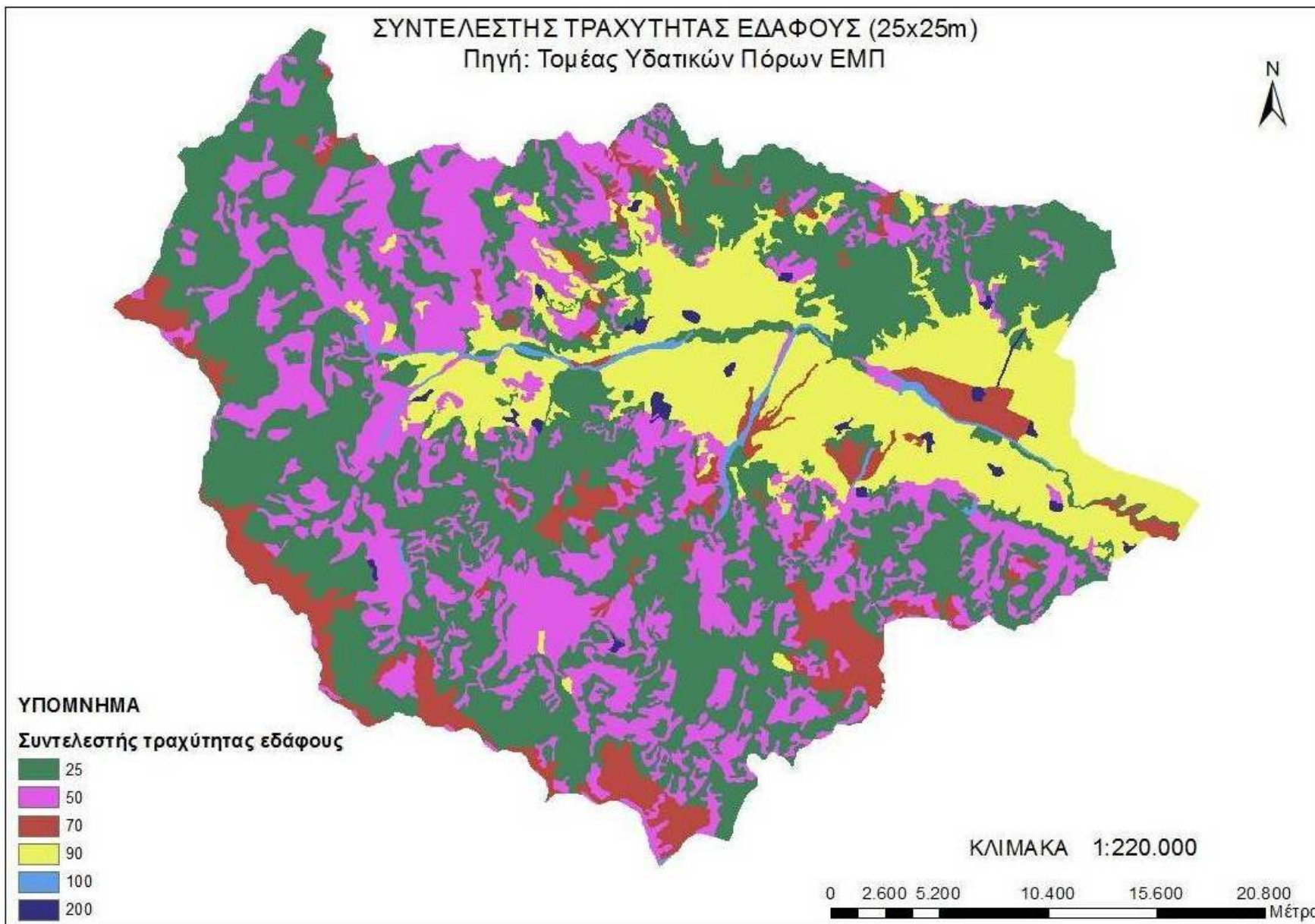
Χάρτης 14: Επιφανειακή κατανομή βροχόπτωσης 20mm στα νότια της περιοχής μελέτης (Σενάριο 4)



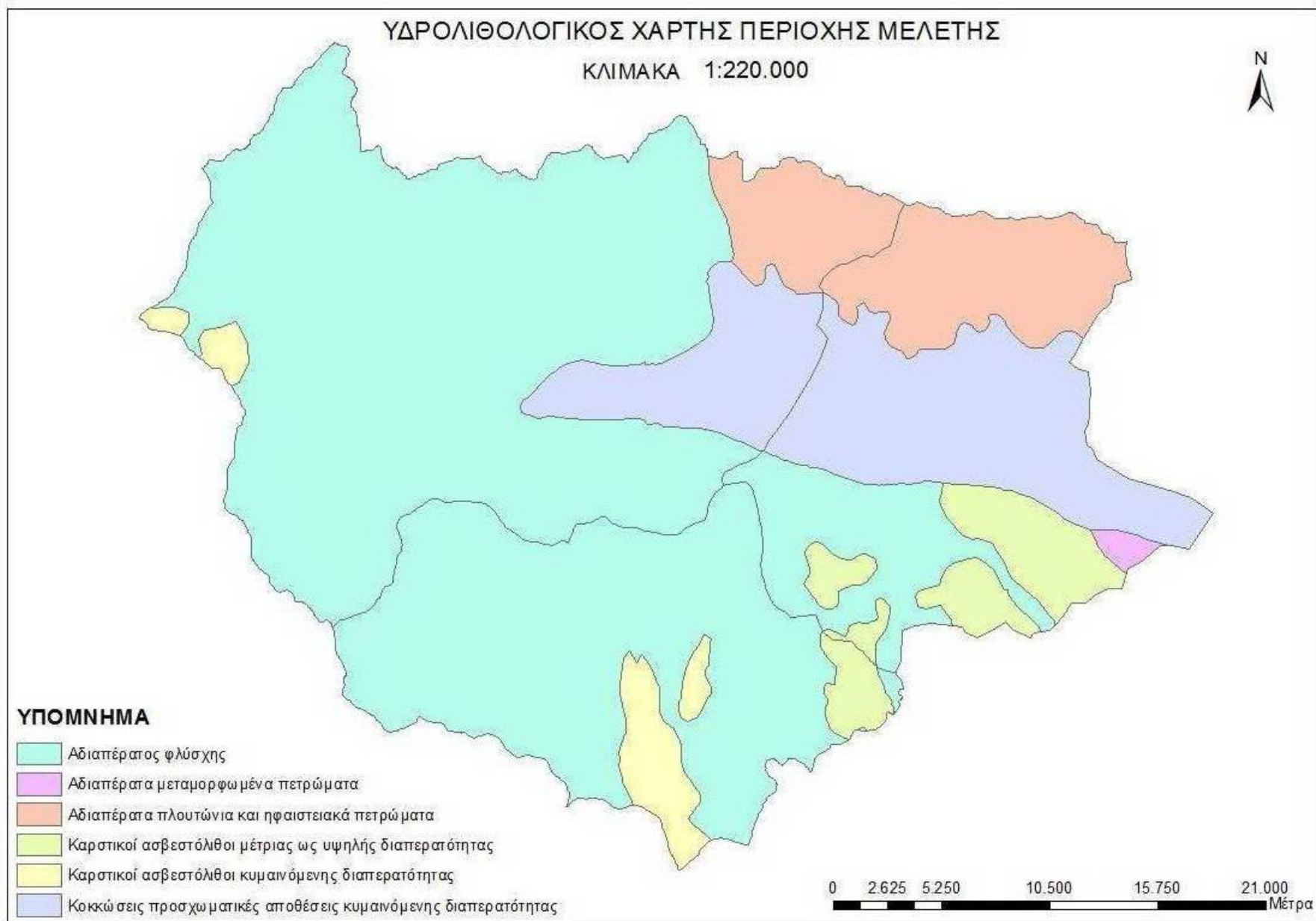
Χάρτης 1: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους ανάλυσης 25x25m



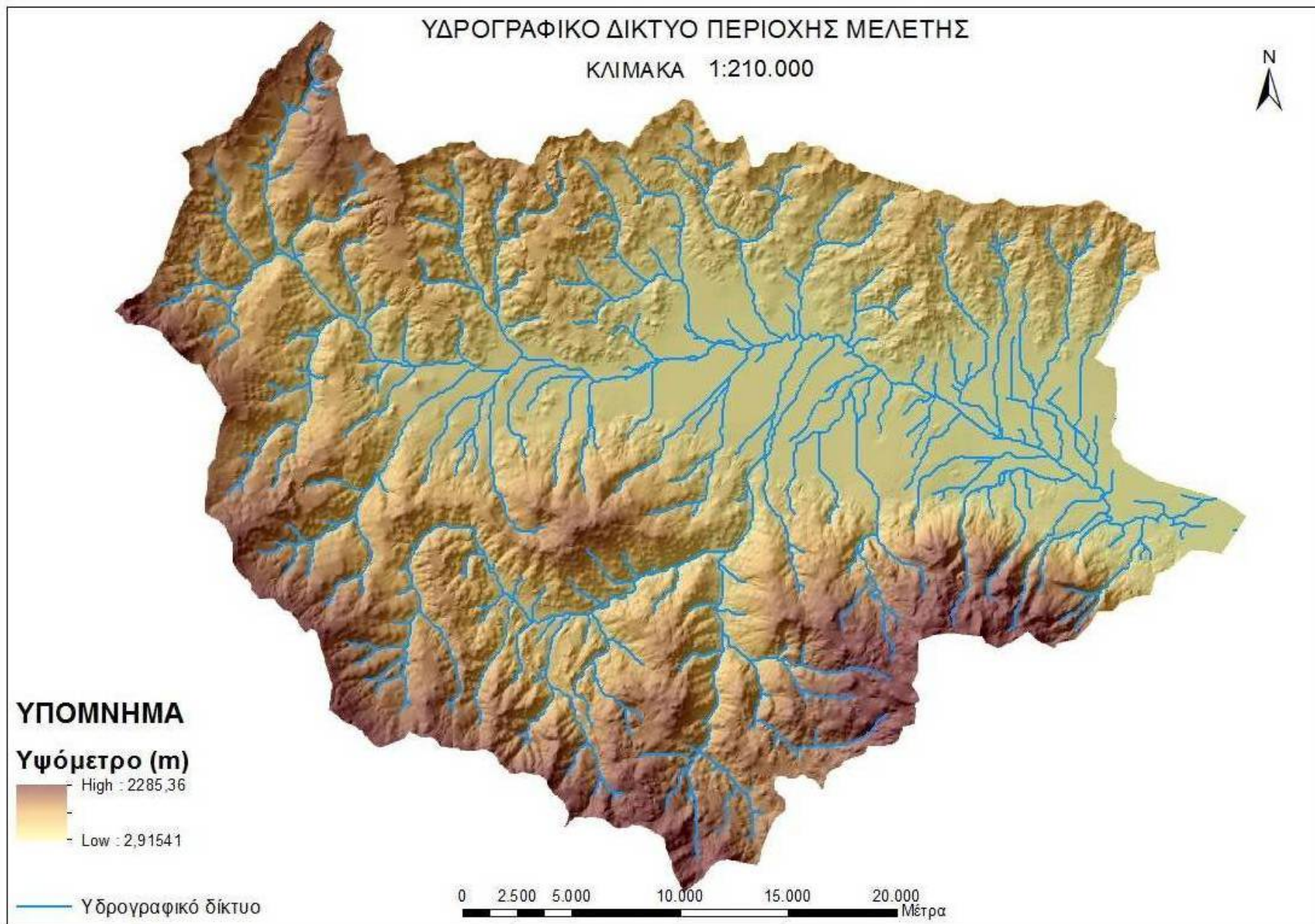
Χάρτης 2: Χρήσεις Γης της περιοχής μελέτης με βάση την κωδικοποίηση Corine



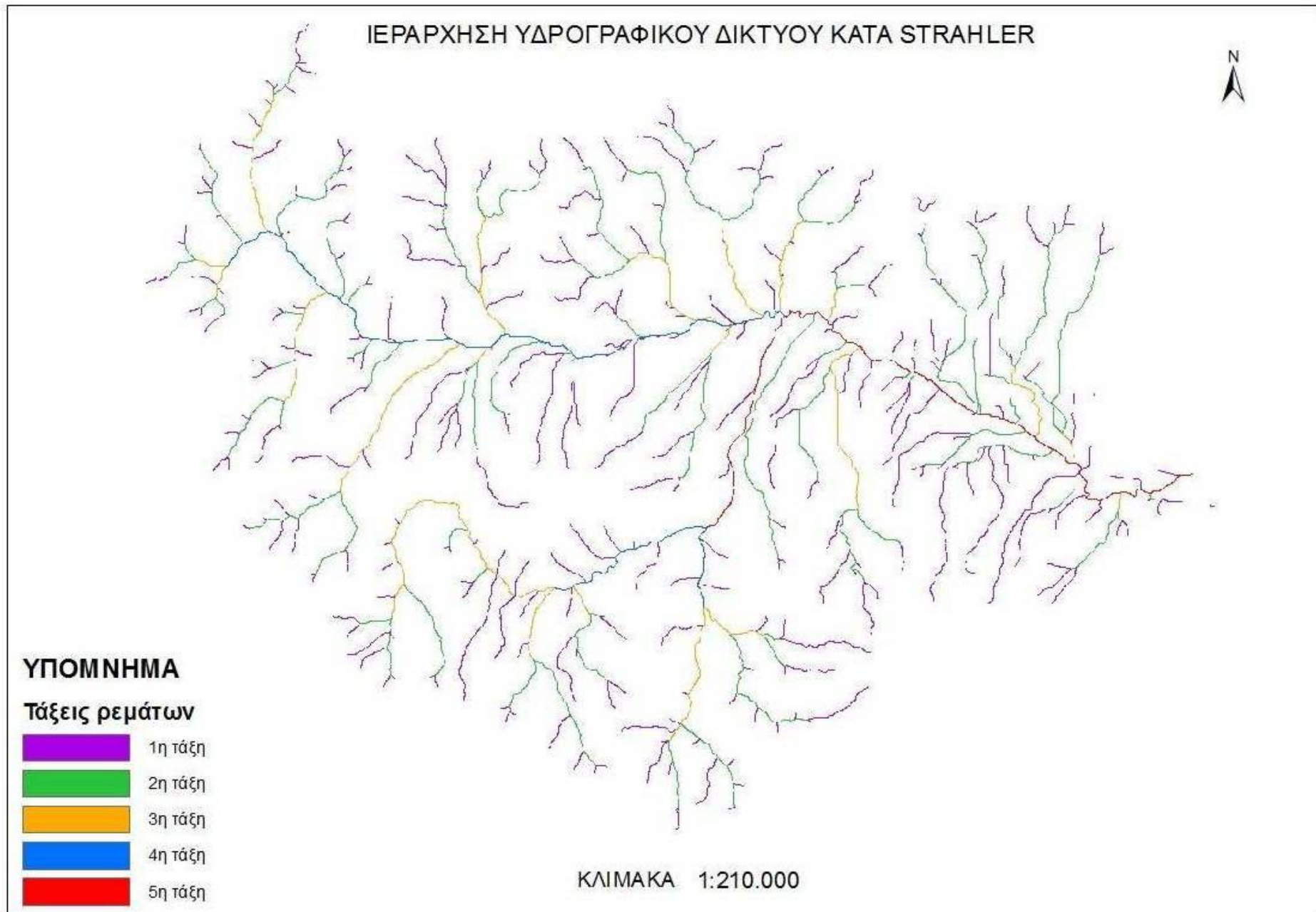
Χάρτης 3: Συντελεστής τραχύτητας εδάφους περιοχής μελέτης σε σχέση με τις χρήσεις γης



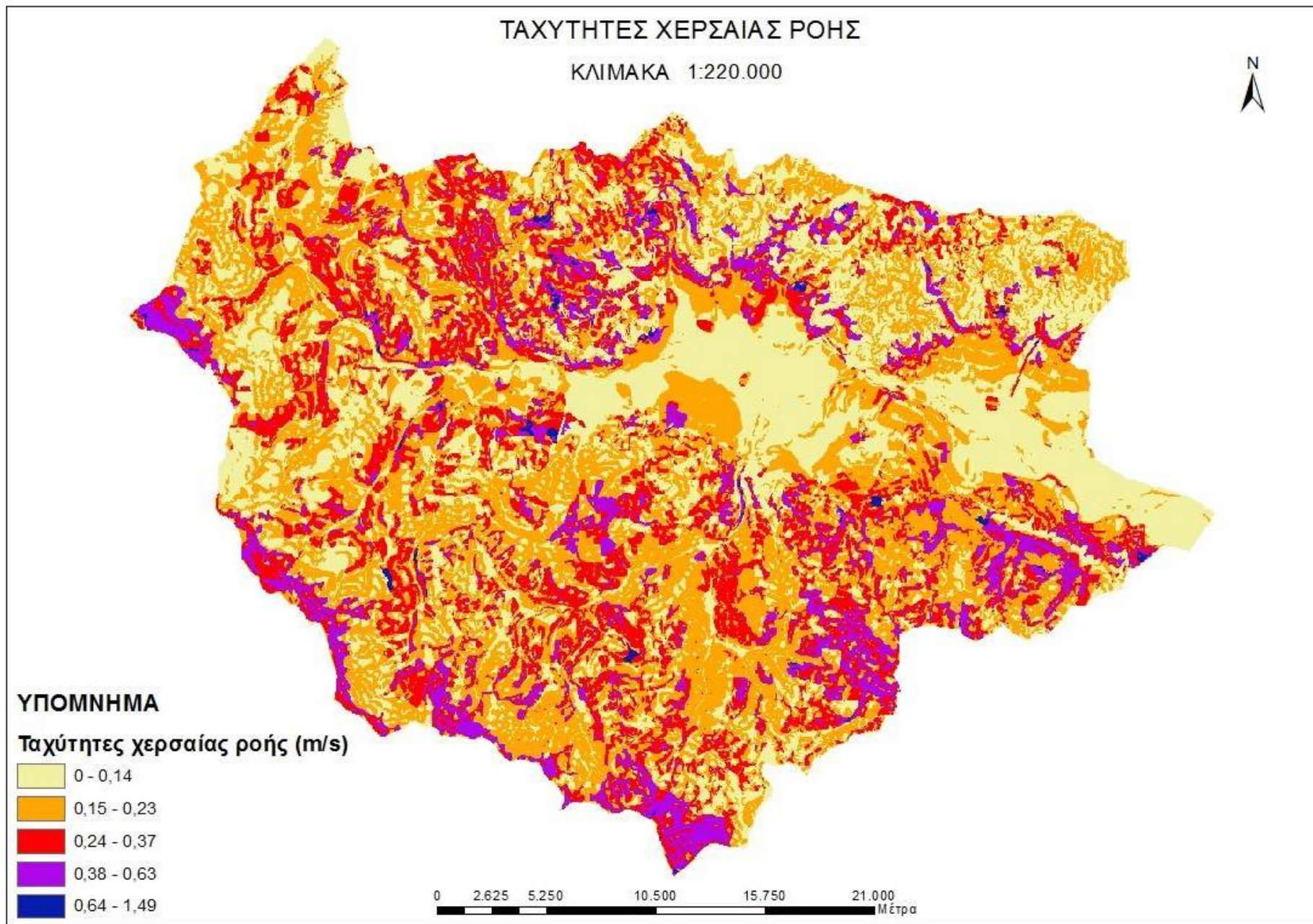
Χάρτης 4: Υδρολιθολογικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης



Χάρτης 5: Υδρογραφικό δίκτυο περιοχής μελέτης από δεδομένα ανάλυσης 25x25m και για τιμή κατωφλίου 1600pixel.



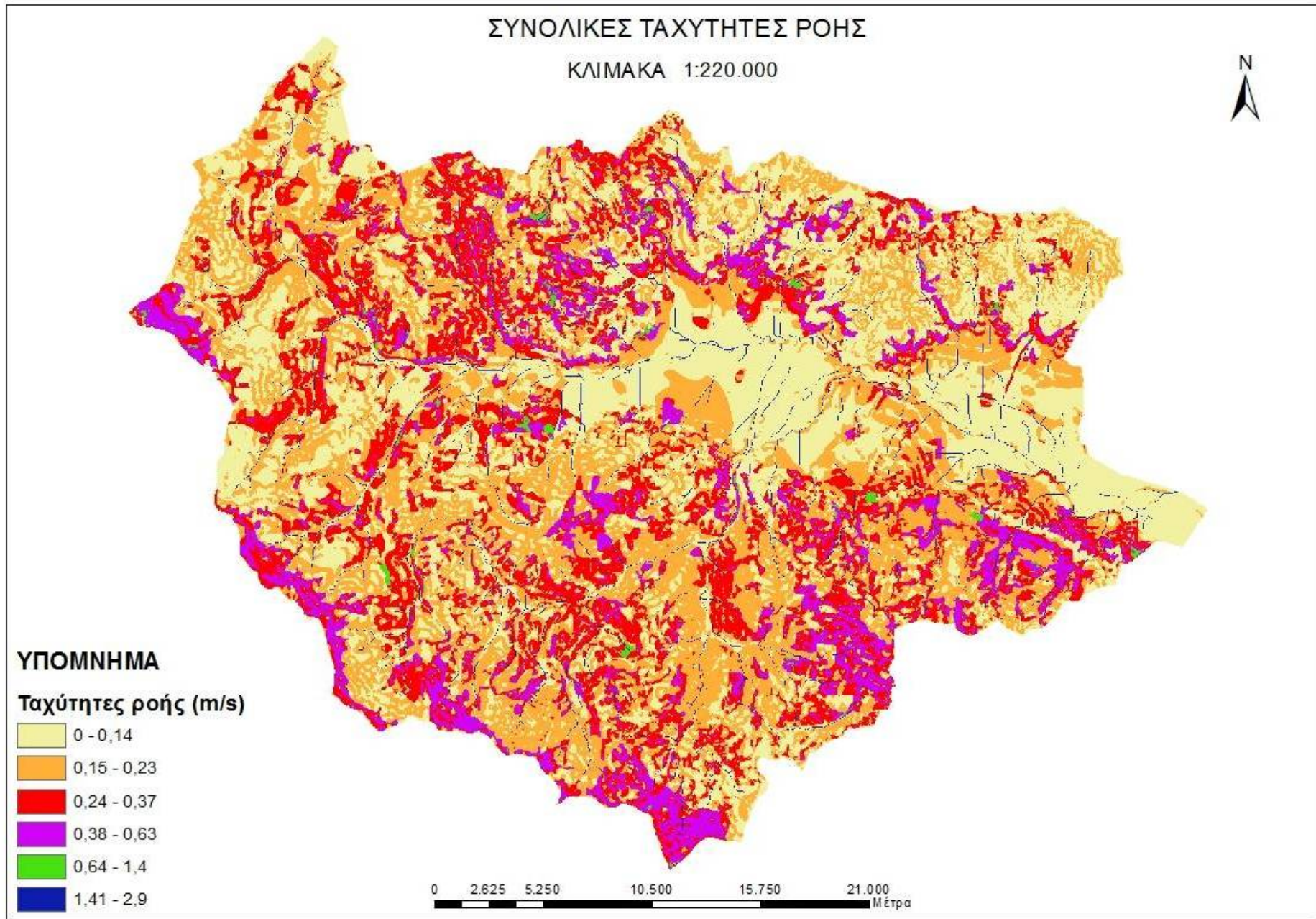
Χάρτης 6: Ιεράρχηση υδρογραφικού δικτύου περιοχής μελέτης κατά Strahler



Χάρτης 7: Ταχύτητες χερσαίας ροής από δεδομένα ανάλυσης 25x25m.



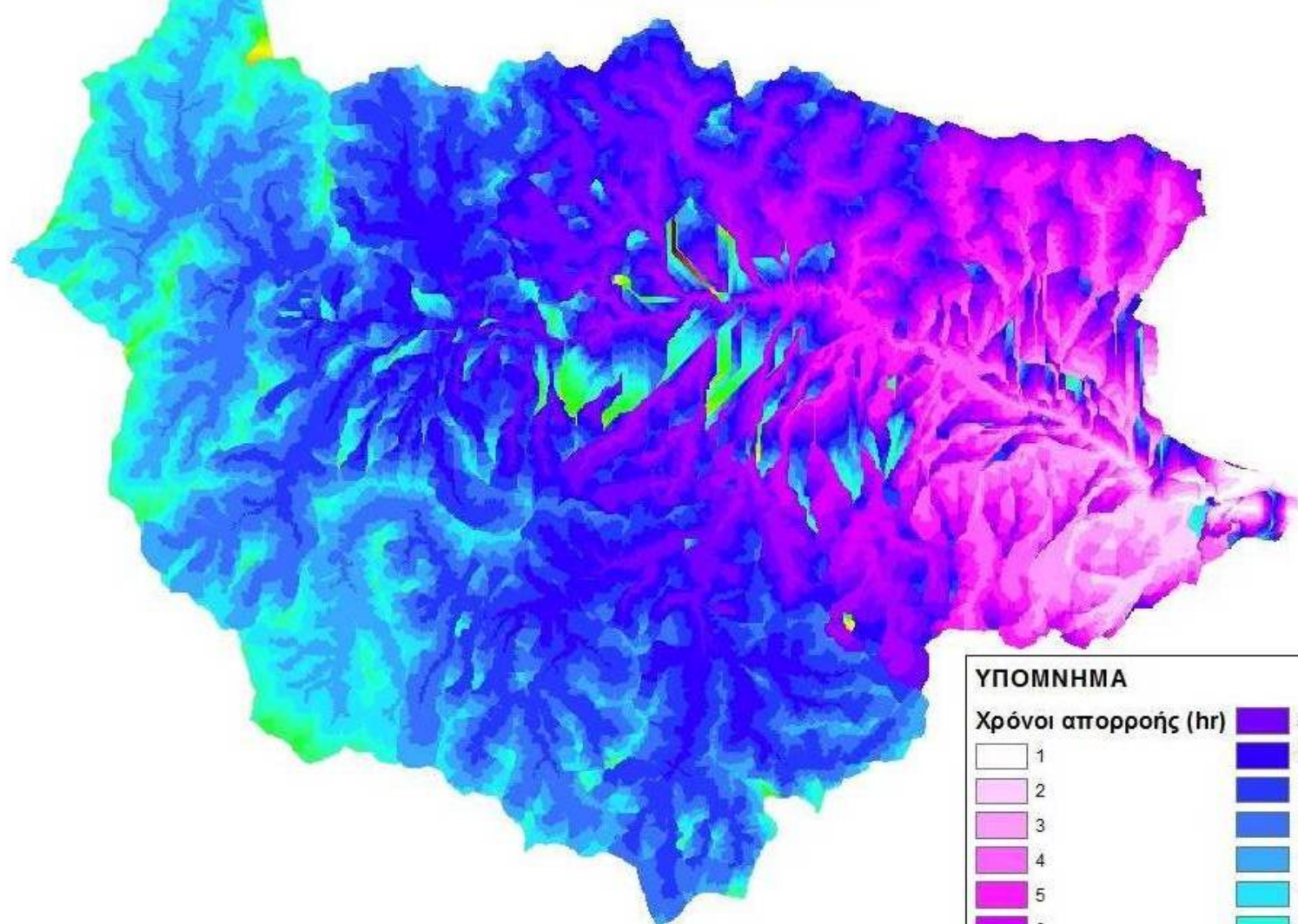
Χάρτης 8: Ταχύτητες ροής υδρογραφικού δικτύου από δεδομένα ανάλυσης 25x25m.



Χάρτης 9: Συνολικές ταχύτητες ροής από δεδομένα ανάλυσης 25x25m

ΧΡΟΝΟΙ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ (ΑΝΑΝΤΗ ΓΟΡΓΟΠΟΤΑΜΟΥ)

ΚΛΙΜΑΚΑ 1:220.000



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Χρόνοι απορροής (hr)

1	8	16	24
2	9	17	25
3	10	18	26
4	11	19	27
5	12	20	28
6	13	21	29
7	14	22	30
	15	23	

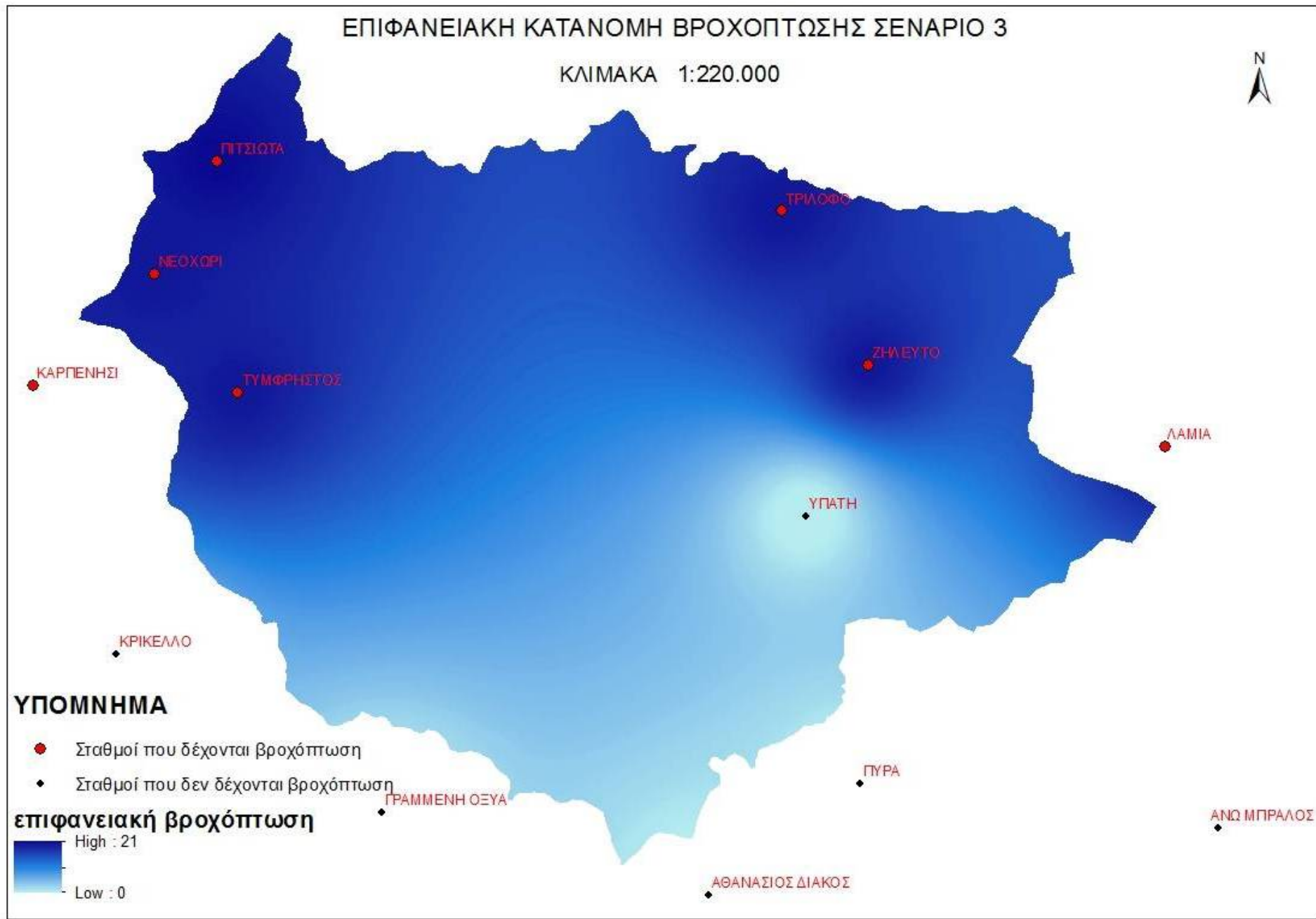
Χάρτης 10: Χρόνοι απορροής των εικονοστοιχείων της περιοχής μελέτης από δεδομένα ανάλυσης 25x25m.



Χάρτης 11: Επιφανειακή κατανομή βροχόπτωσης 20mm στα δυτικά της περιοχής μελέτης (Σενάριο 1).



Χάρτης 12: Επιφανειακή κατανομή βροχόπτωσης 20mm στα ανατολικά της περιοχής μελέτης (Σενάριο 2).



Χάρτης 13: Επιφανειακή κατανομή βροχόπτωσης 20mm στα βόρεια της περιοχής μελέτης (Σενάριο 3).



Χάρτης 14: Επιφανειακή κατανομή βροχόπτωσης 20mm στα νότια της περιοχής μελέτης (Σενάριο 4).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: Μοντέλα

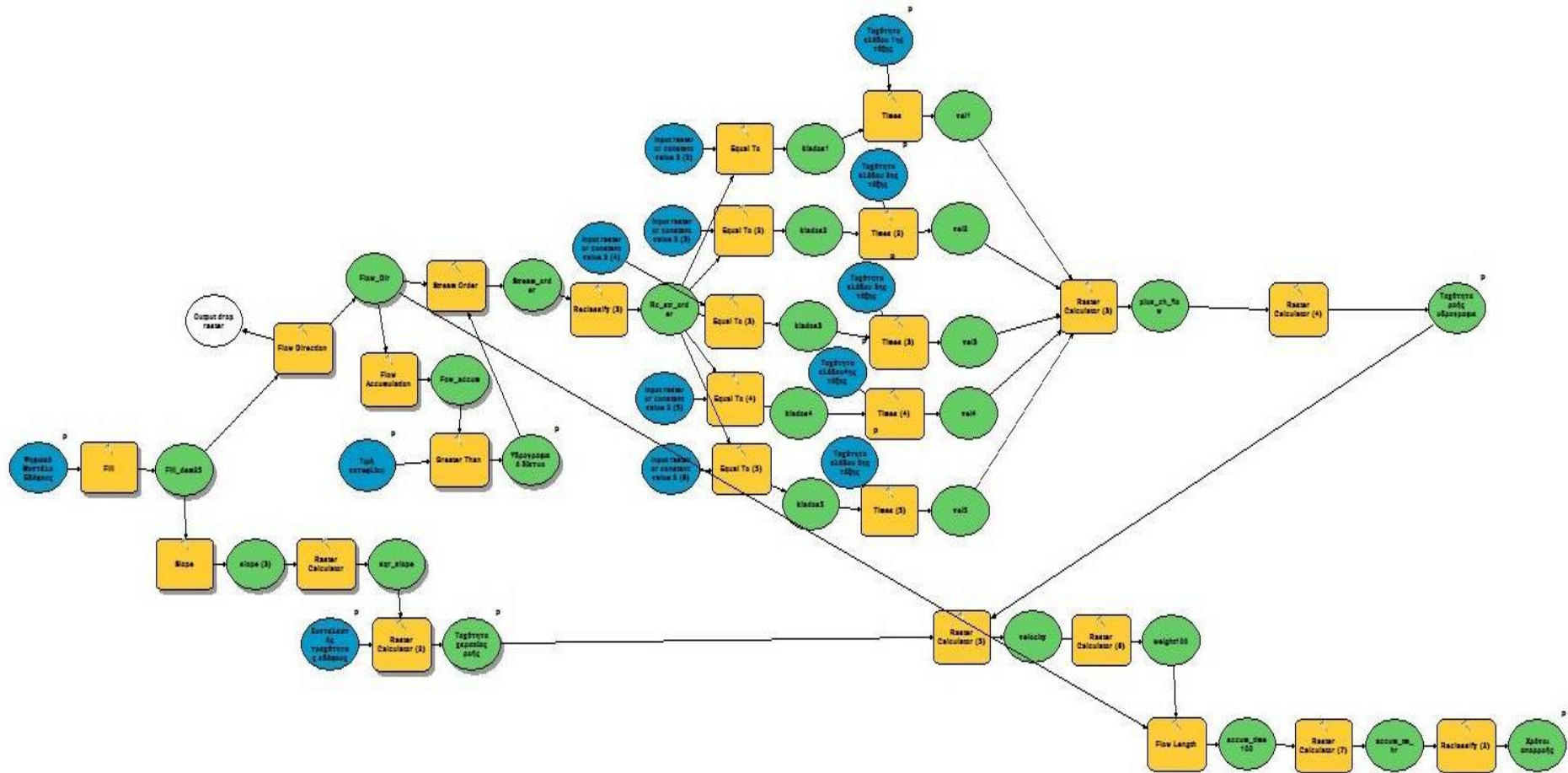
Διάγραμμα 1: Μοντέλο μεθόδου επιφάνειας – χρόνου

Διάγραμμα 2: Μοντέλο μεθόδου επιφάνειας – χρόνου (με λεπτομέρειες)

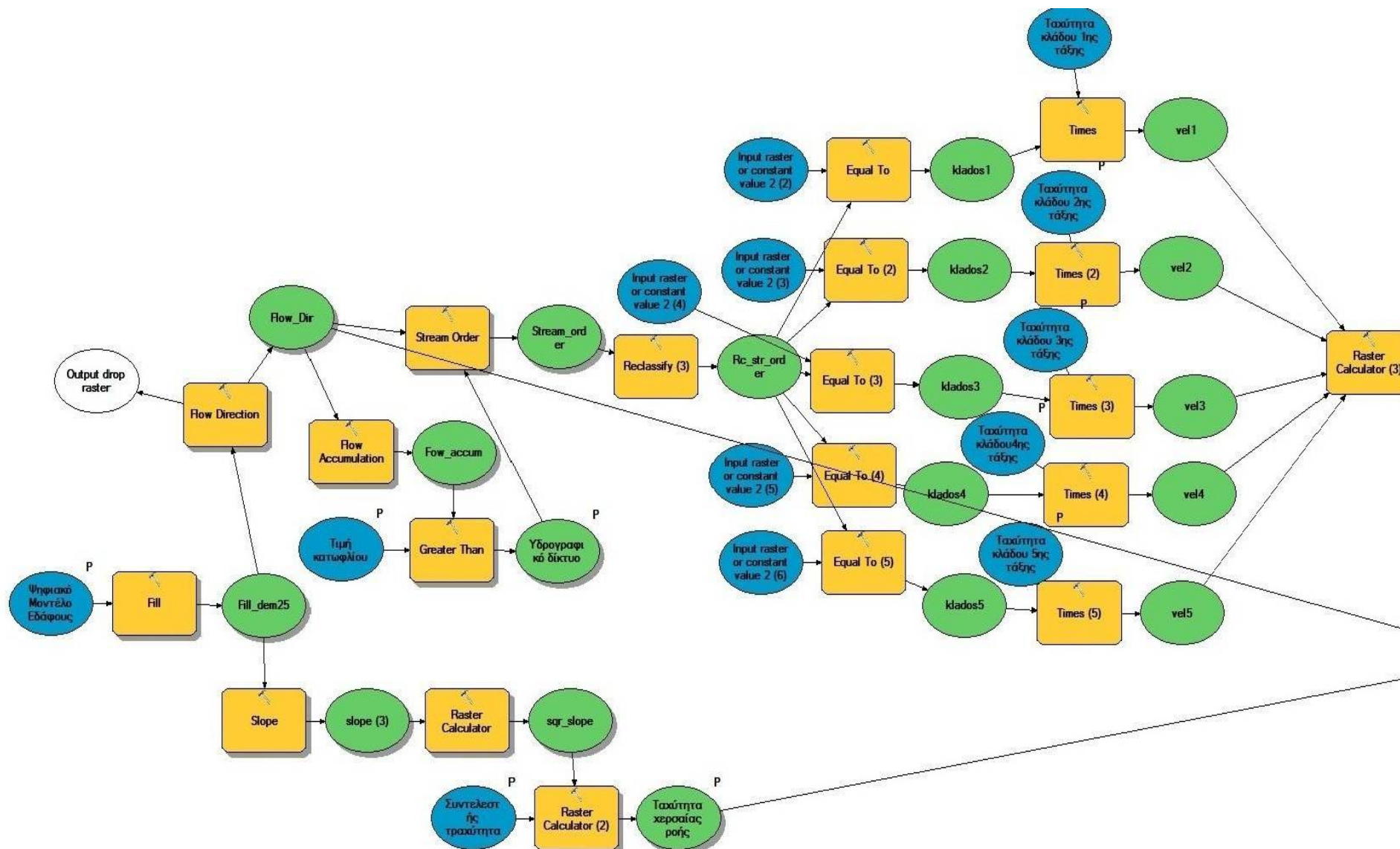
Διάγραμμα 3: Μοντέλο μεθόδου επιφάνειας – χρόνου (με λεπτομέρειες)

Διάγραμμα 4: Μοντέλο υπολογισμού παροχής στην έξοδο της λεκάνης με βάση συγκεκριμένα δεδομένα βροχόπτωσης

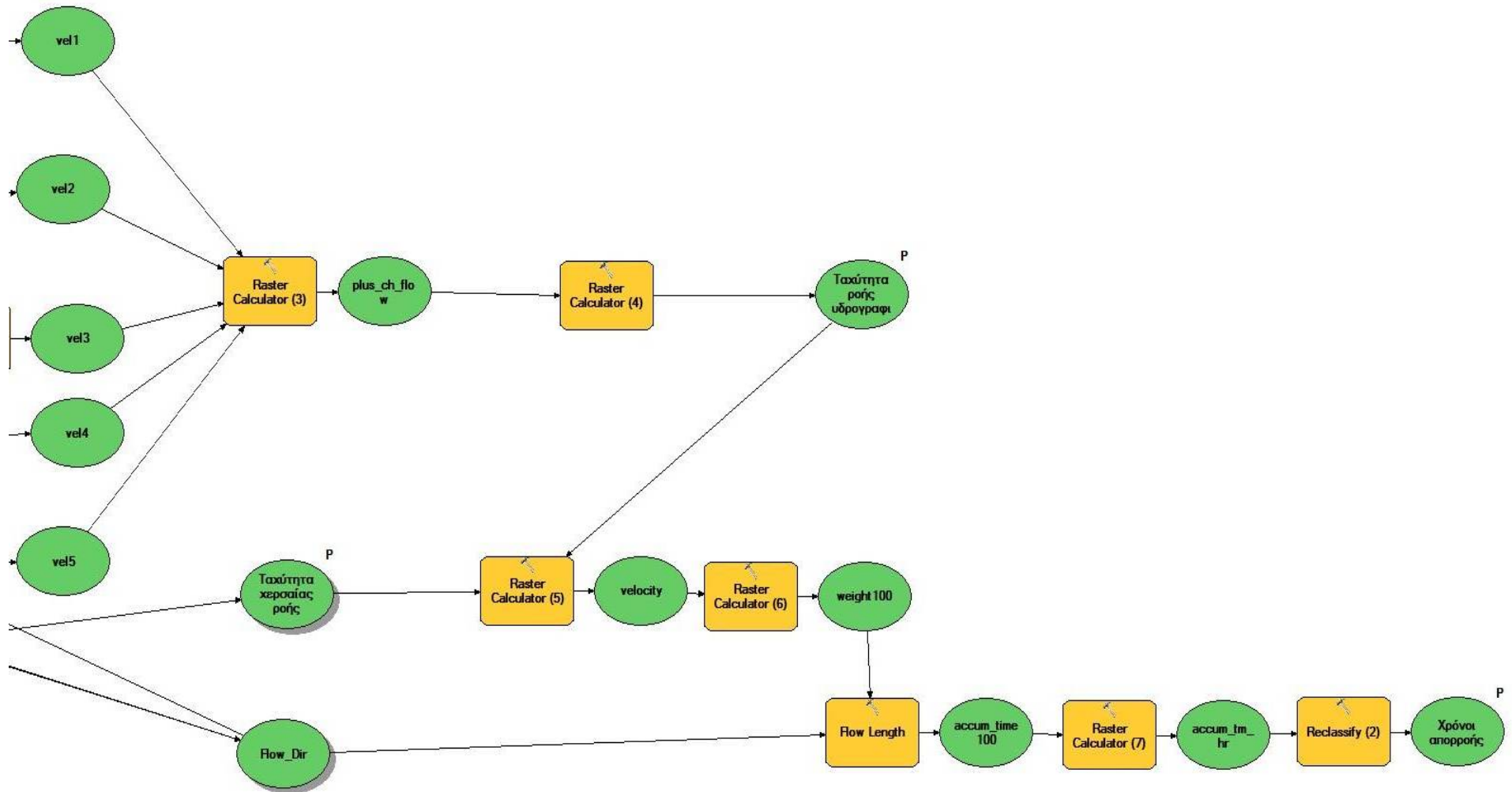
Διάγραμμα 5: Μοντέλο υπολογισμού παροχής στην έξοδο της λεκάνης με βάση συγκεκριμένα δεδομένα βροχόπτωσης (με λεπτομέρειες)



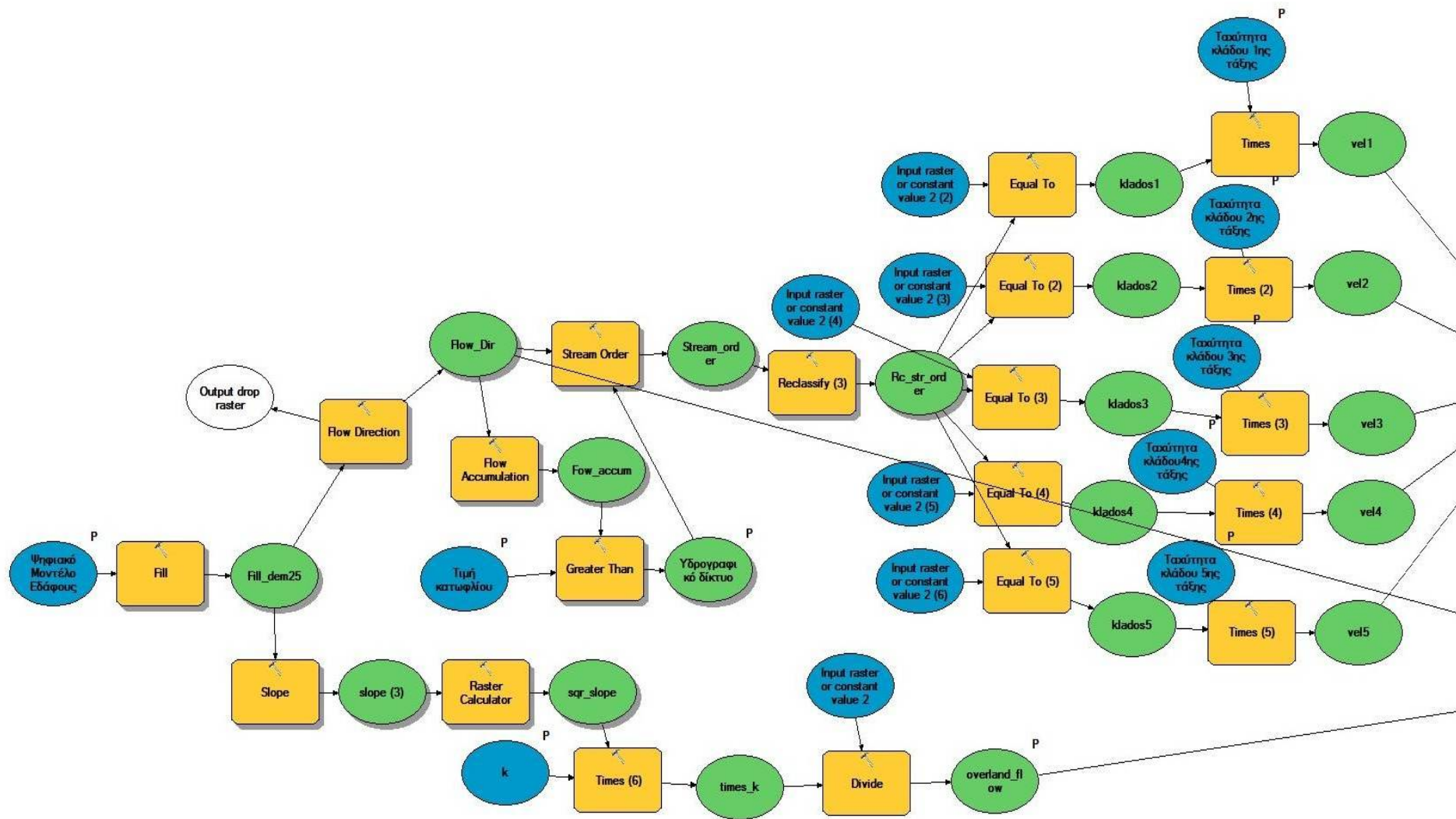
Διάγραμμα 1: Μοντέλο μεθόδου επιφάνειας – χρόνου



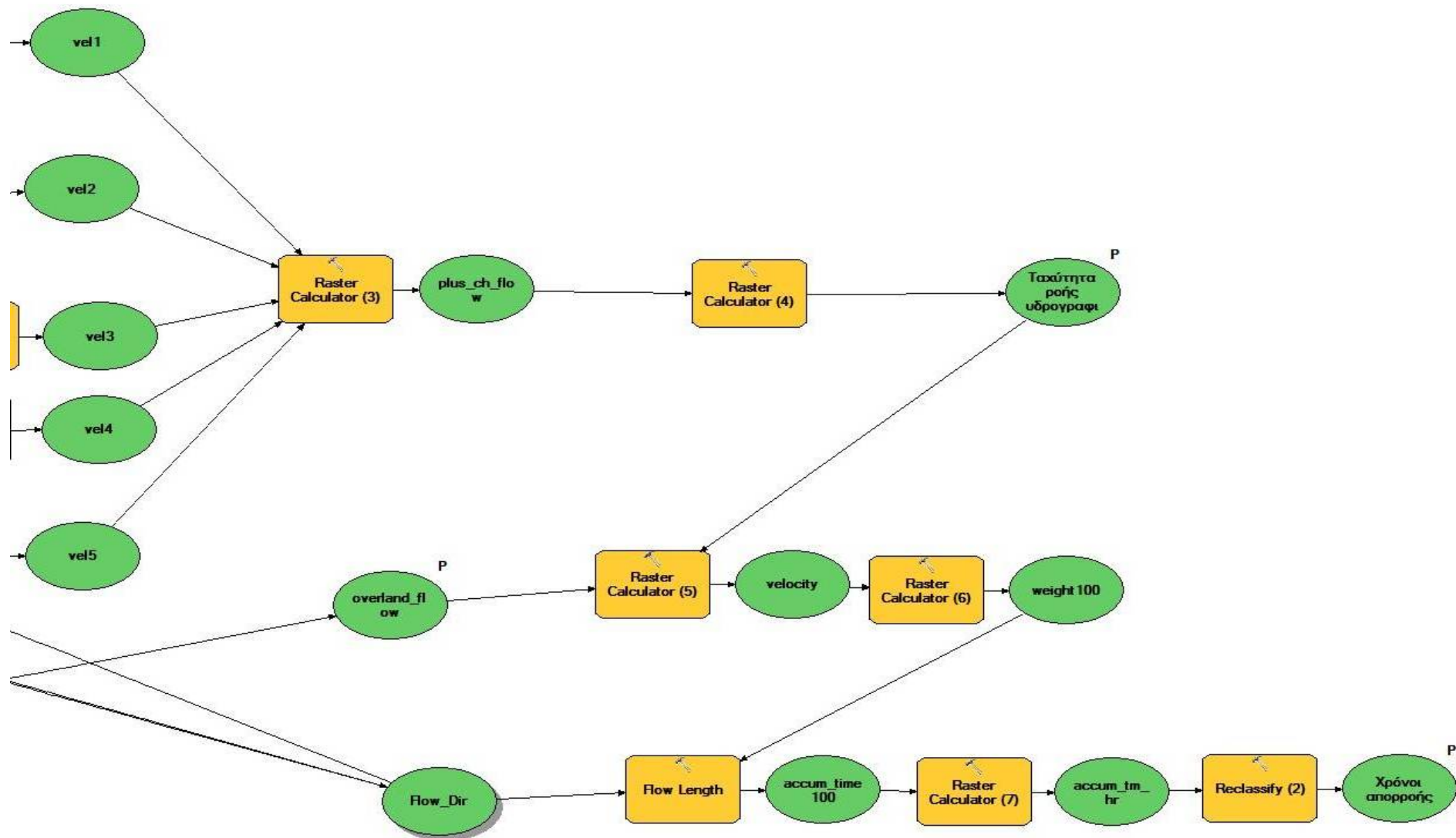
Διάγραμμα 2: Μοντέλο μεθόδου επιφάνειας – χρόνου (με λεπτομέρειες) (1/2)



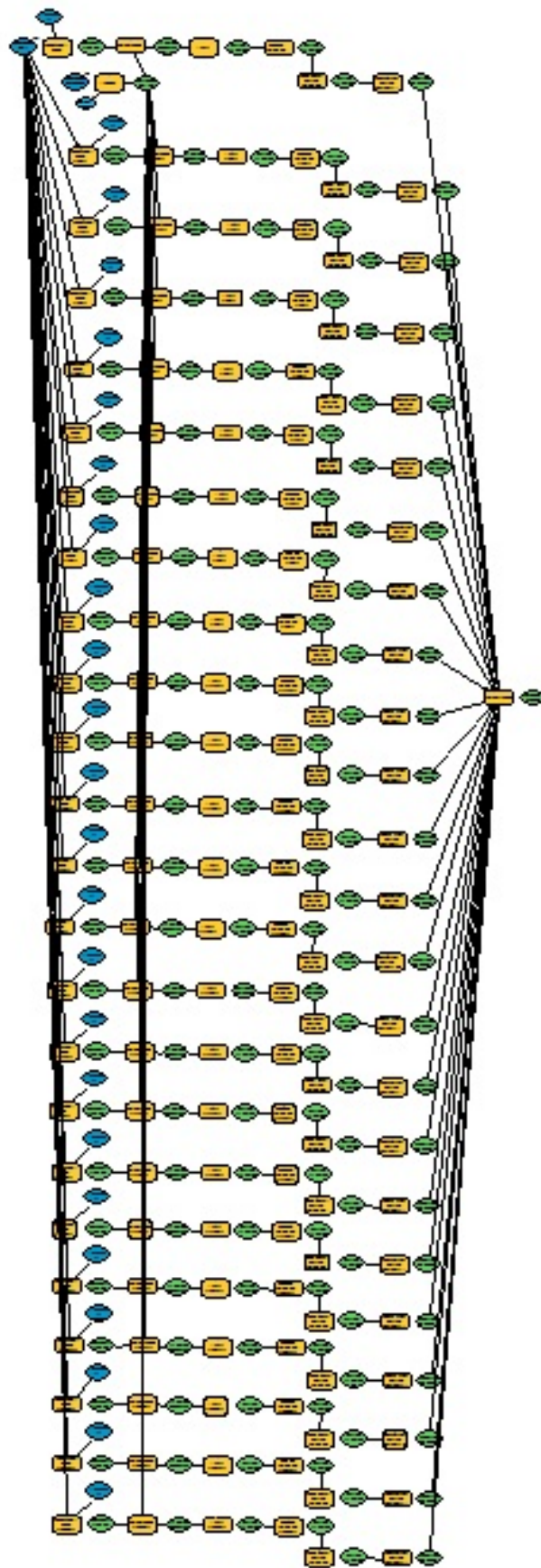
Διάγραμμα 2: Μοντέλο μεθόδου επιφάνειας – χρόνου (με λεπτομέρειες) (2/2)



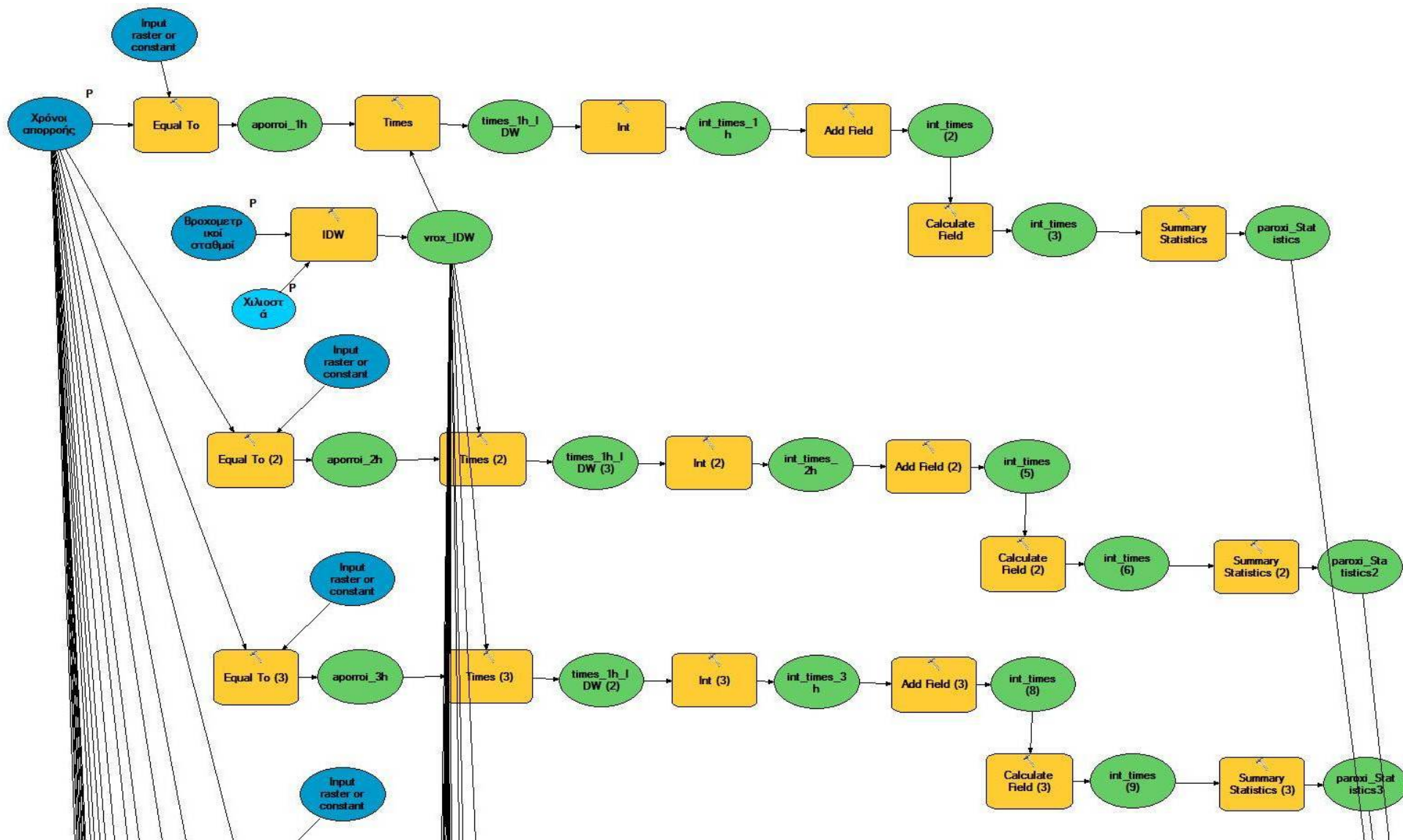
Διάγραμμα 3: Μοντέλο μεθόδου επιφάνειας – χρόνου 2 (1/2)



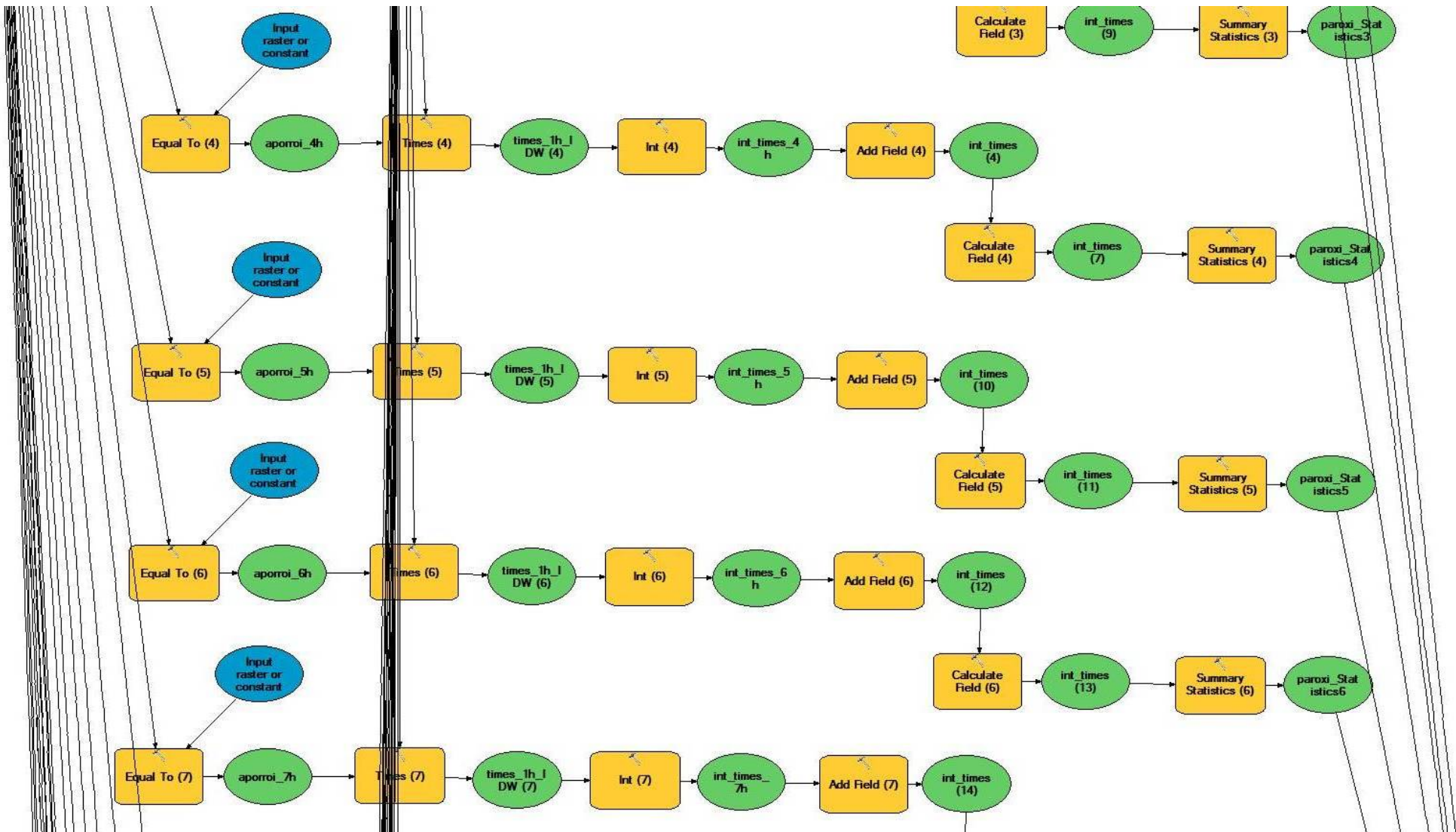
Διάγραμμα 3: Μοντέλο μεθόδου επιφάνειας – χρόνου 2 (2/2)



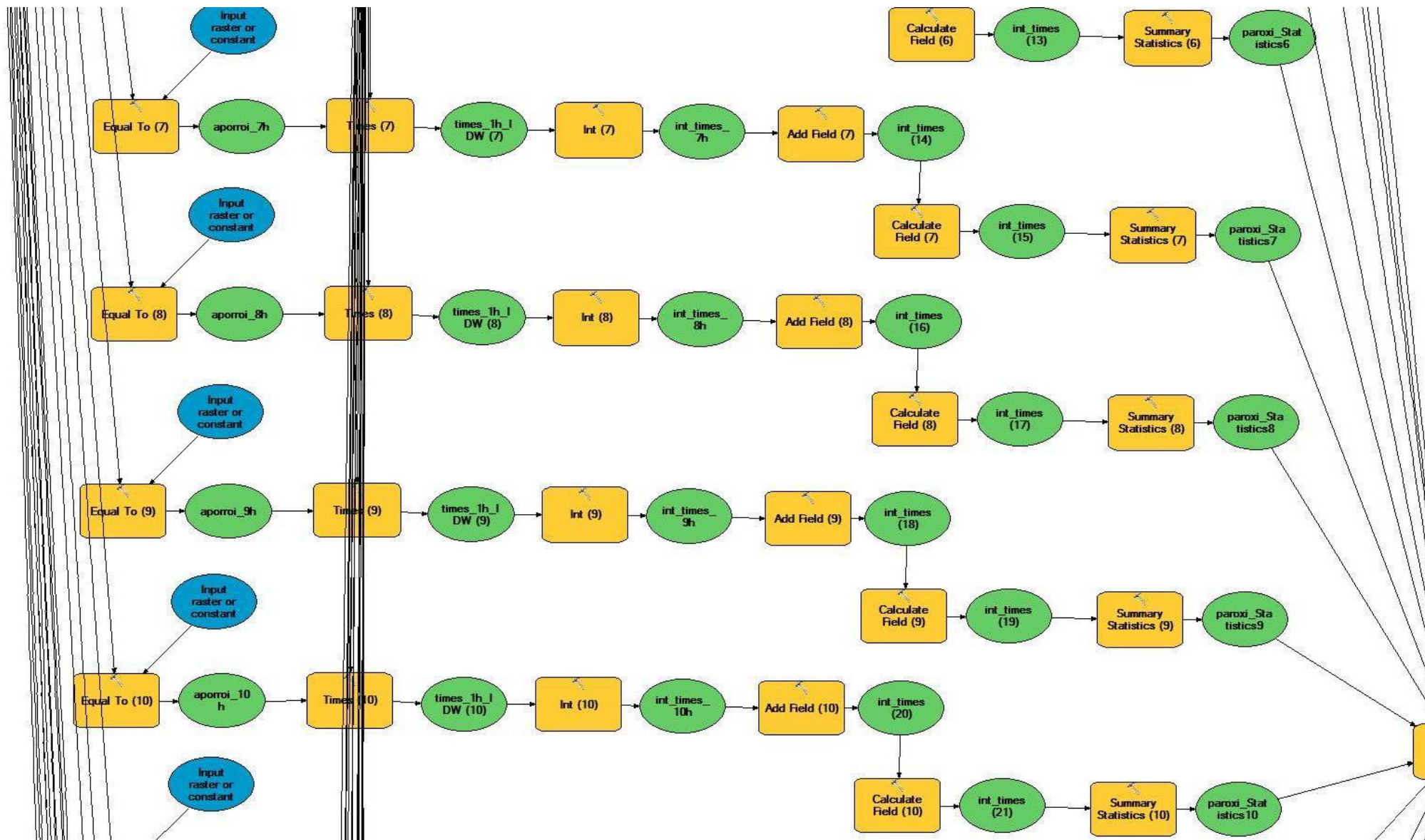
Διάγραμμα 4: Μοντέλο υπολογισμού παροχής στην έξοδο της λεκάνης με βάση συγκεκριμένα δεδομένα βροχόπτωσης



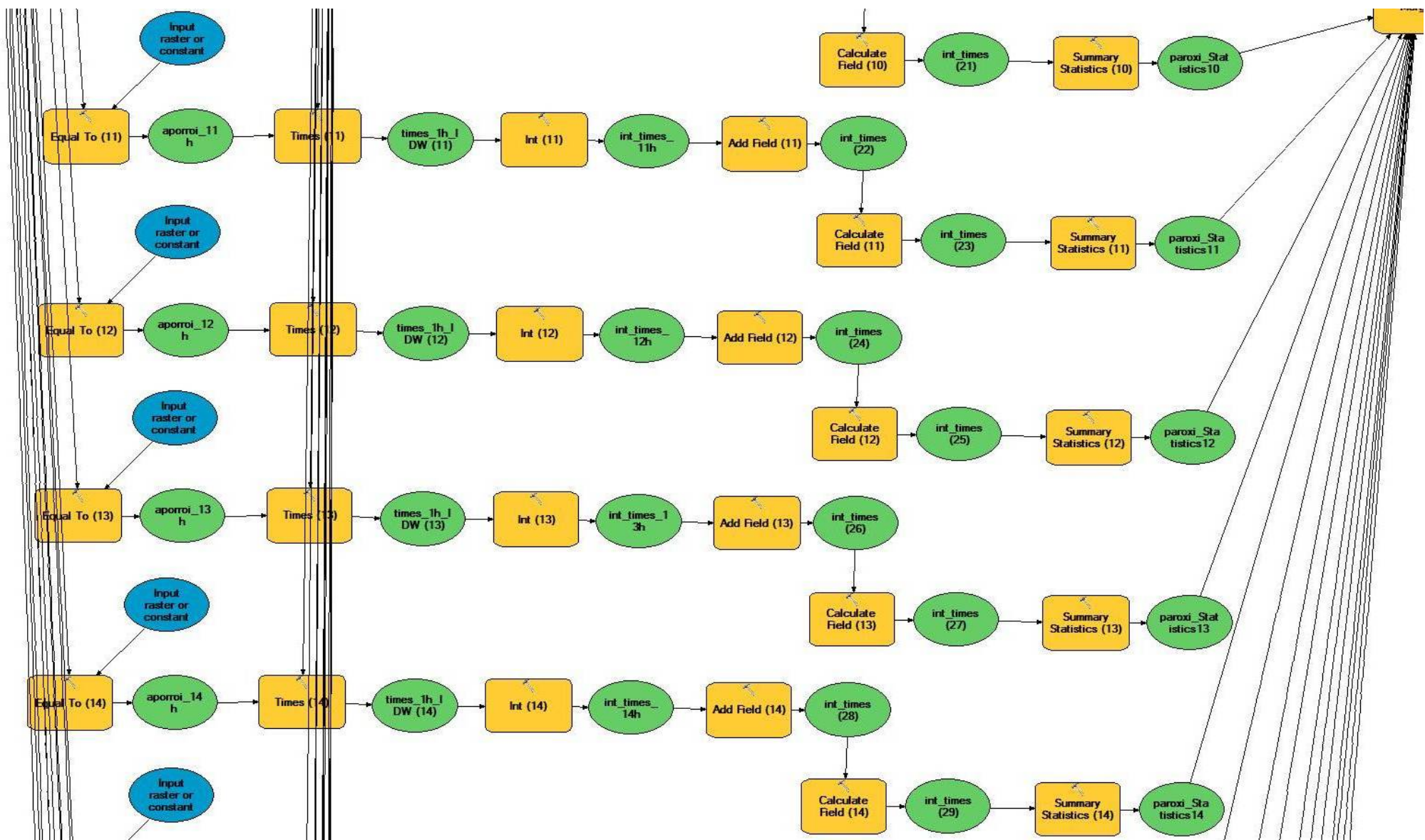
Διάγραμμα 5: Μοντέλο υπολογισμού παροχής στην έξοδο της λεκάνης με βάση συγκεκριμένα δεδομένα βροχόπτωσης (με λεπτομέρειες) (1/8)



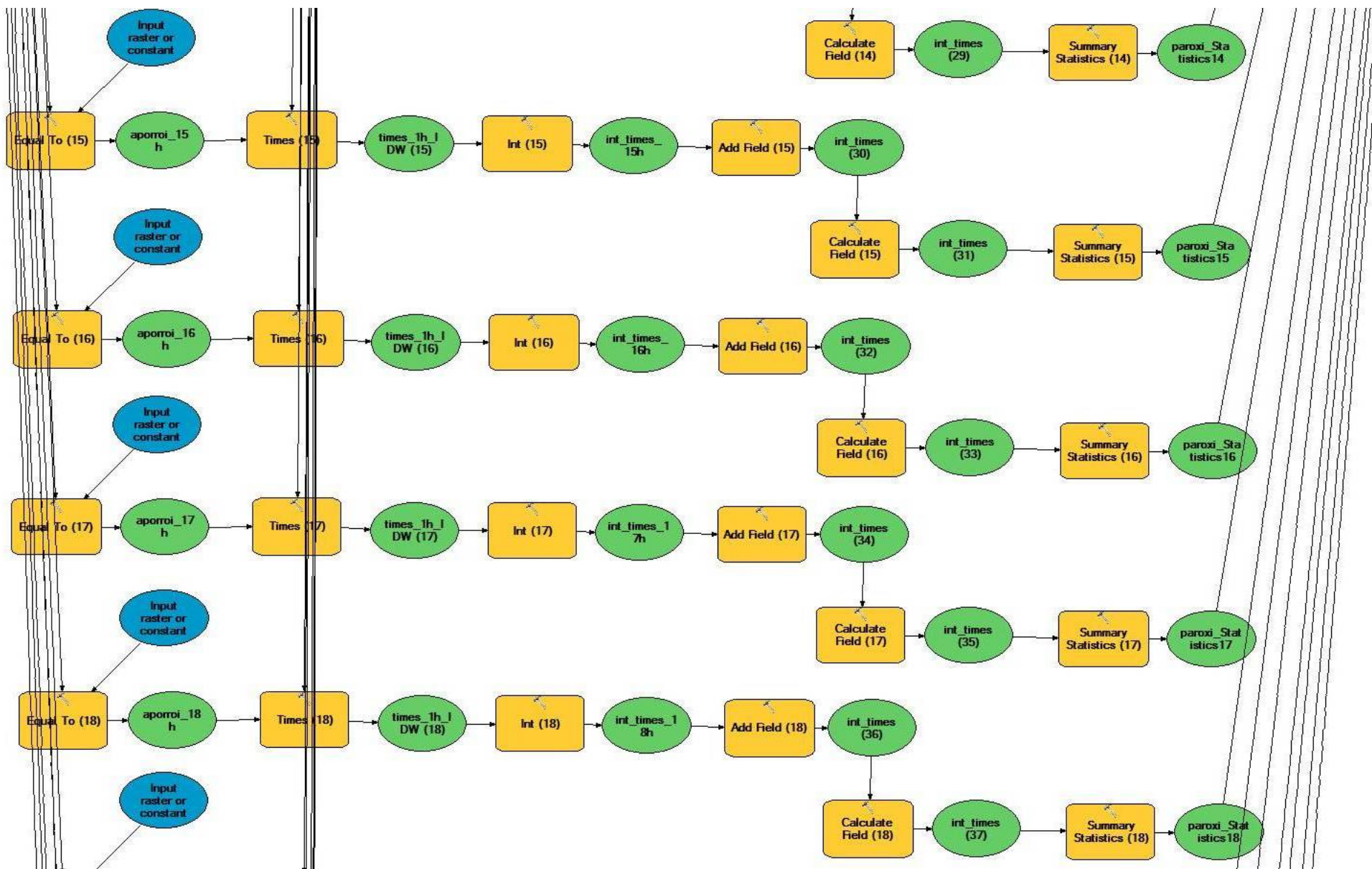
Διάγραμμα 5: Μοντέλο υπολογισμού παροχής στην έξοδο της λεκάνης με βάση συγκεκριμένα δεδομένα βροχοπτώσης (με λεπτομέρειες) (2/8)



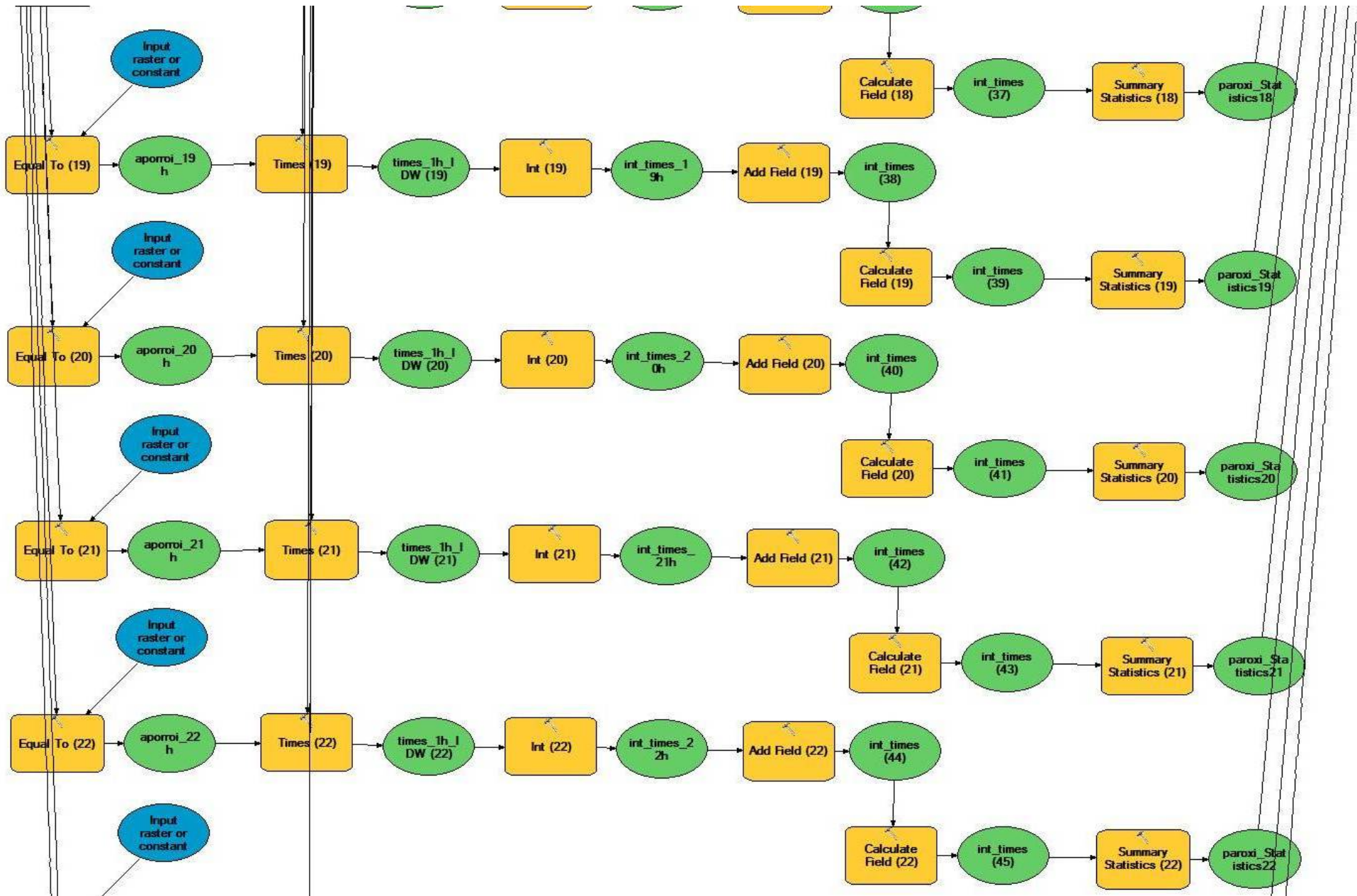
Διάγραμμα 5: Μοντέλο υπολογισμού παροχής στην έξοδο της λεκάνης με βάση συγκεκριμένα δεδομένα βροχόπτωσης (με λεπτομέρειες) (3/8)



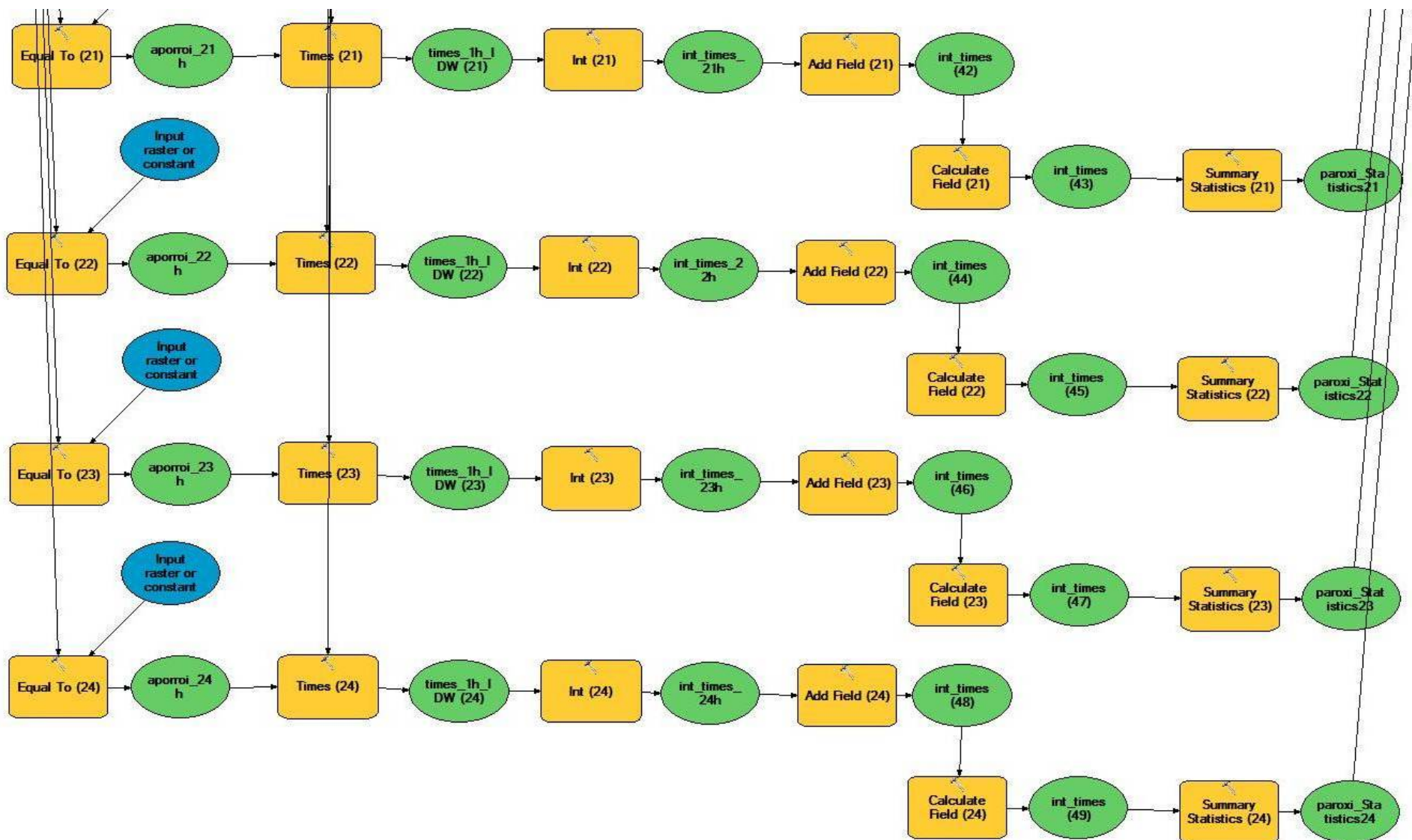
Διάγραμμα 5: Μοντέλο υπολογισμού παροχής στην έξοδο της λεκάνης με βάση συγκεκριμένα δεδομένα βροχόπτωσης (με λεπτομέρειες) (4/8)



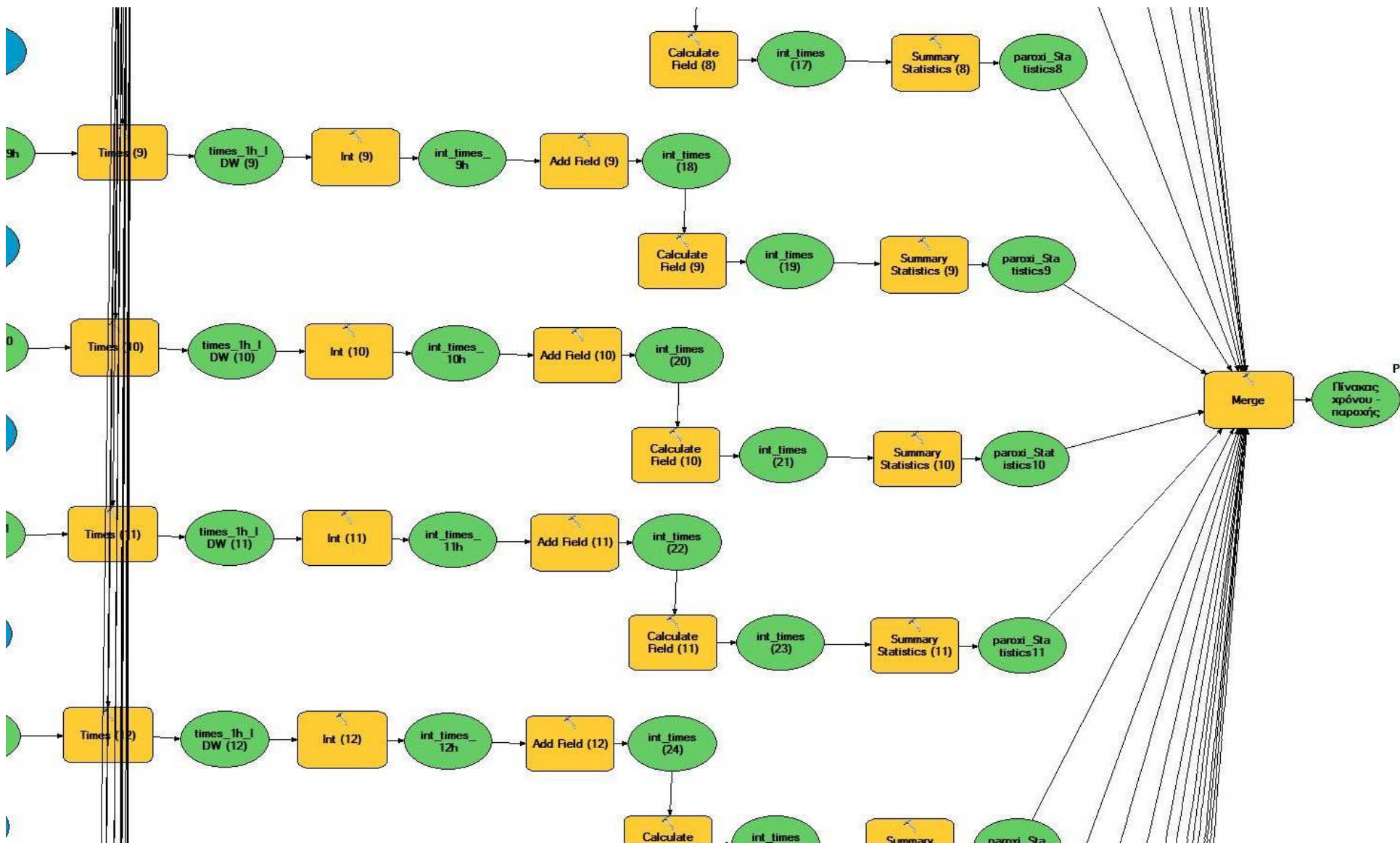
Διάγραμμα 5: Μοντέλο υπολογισμού παροχής στην έξοδο της λεκάνης με βάση συγκεκριμένα δεδομένα βροχόπτωσης (με λεπτομέρειες) (5/8)



Διάγραμμα 5: Μοντέλο υπολογισμού παροχής στην έξοδο της λεκάνης με βάση συγκεκριμένα δεδομένα βροχόπτωσης (με λεπτομέρειες) (6/8)



Διάγραμμα 5: Μοντέλο υπολογισμού παροχής στην έξοδο της λεκάνης με βάση συγκεκριμένα δεδομένα βροχόπτωσης (με λεπτομέρειες) (7/8)



Διάγραμμα 5: Μοντέλο υπολογισμού παροχής στην έξοδο της λεκάνης με βάση συγκεκριμένα δεδομένα βροχοπτώσης (με λεπτομέρειες) (8/8)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: Δημιουργία μοντέλων βήμα προς βήμα

Πίνακας 1: Μοντέλο δημιουργίας ισοχρόνων καμπυλών με τη μέθοδο χρόνου – επιφάνειας.

Πίνακας 2: Μοντέλο υπολογισμού παροχής στην έξοδο της λεκάνης.

Πίνακας 1: Μοντέλο δημιουργίας ισοχρόνων καμπυλών με τη μέθοδο χρόνου – επιφάνειας

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ARCGIS	ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Πλήρωση βυθισμάτων ΨΜΕ	Dem_25	Hydrology fill	Fill_dem25	
Δημιουργία κανάβου κλίσεων	Fill_dem25	Surface slope	slope	Παράμετρος Output measurement: PERCENT_RISE
Υπολογισμός κανάβου $(\text{slope}/100)^{0.5}$	slope	Raster Calculator $\text{Sqrt}(\text{slope}/100)$	Sqr_slope	
Υπολογισμός κανάβου χερσαίας ροής	Sqr_slope k25	Raster Calculator $(\text{sqr_slope} * \text{k}25) / 100$	Overland_flow	
Δημιουργία κανάβου διεύθυνσης ροής	Fill_dem25	Hydrology flow direction	Flow_dir	
Δημιουργία κανάβου συγκεντρωτικής ροής	Flow_dir	Hydrology flow accumulation	Flow_accum	

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ARCGIS	ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Δημιουργία κανάβου υδρογραφικού δικτύου	Flow_accum	Math Logical Greater Than	streams	Για κατώφλ: 1600 InputRaster or constant value: 1600
Δημιουργία κανάβου κατάταξης κλάδων υδρογραφικού δικτύου	Streams Flow_dir	Hydrology Stream order	Stream_order	Method of stream ordering: Strahler
Αντικατάσταση στο stream_order των τιμών «No value» με 0	stream_order	Reclass reclassify	Rc_str_order	
Δημιουργία 5 κανάβων με τάξεις υδρογραφικού δικτύου	Rc_str_order	Math Logical Equal to	Klados , klados2, klados3, klados4, klados5	Equal to: (1, 2, 3, 4, 5) ανάλογα με την τάξη του υδρογραφικού δικτύου
Δημιουργία 5 κανάβων με τις ταχύτητες ροής *10	Klados1, klados2, klados3, klados4, klados5, τιμές ταχύτητας	Math Trigonometric Times	Vel1, vel2, vel3, vel4, vel5	Times: Με την ταχύτητα επί 10
Πρόσθεση 5 ταχυτήτων	Vel1, vel2, vel3, vel4, vel5	Raster calculator Vel1+vel2+vel3+vel4+vel5	Plus_ch_flow	
Δημιουργία κανάβου ταχύτητας ροής υδρογραφικού δικτύου	Plus_ch_flow	Raster Calculator Plus_ch_flow * 0.1	Channel_flow	Ο κανάβος channel_flow εκτός του υδρογραφικού δικτύου έχει την τιμή 0

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ARCGIS	ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Δημιουργία κανάβου αθροιστικών ταχυτήτων ροής	Overland_flow Channel_flow	Raster calculator Overland_flow+channel_flow	velocity	
Δημιουργία κανάβου βαρών	velocity	Raster calculator $100 * (1 / \text{velocity})$	Weight*100	Επειδή ο κানাβος βαρών πρέπει να είναι ακέραιος πολλαπλασιάζεται με το 100
Δημιουργία κανάβου συγκεντρωτικών χρόνων ροής (100*sec)	Flow_dir Weight*100	Hydrology Flow length	Accum_time100	
Δημιουργία κανάβου συγκεντρωτικών χρόνων ροής (hr)	Accum_time100	Raster calculator $\text{Accum_time100} / (3600*100)$	Accum_time_hr	
Δημιουργία κανάβου συγκεντρωτικών χρόνων ροής ανά ώρα	Accum_time_hr	Reclass reclassify	Rc_acm_tm_hr	Παράμετροι ο αριθμός των χρονικών διαστημάτων (ωριαία)

Πίνακας 2: Μοντέλο υπολογισμού παροχής στην έξοδο της λεκάνης

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ARCGIS	ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Δημιουργία κανάβου επιφανειακής κατανομής βροχόπτωσης	Stathmoi	Special analyst tools Interpolation IDW	Vrox_IDW	z Field: πεδίο πίνακα περιγραφικών χαρακτηριστικών με χιλιοστά βροχόπτωσης
Δημιουργία κανάβου εικονοστοιχείων που απορρέουν σε 1hr	Rc_acm_tm_hr	Math Logical Equal to	Aporroi_1h	Χρησιμοποιείται ο κανάβος των χρόνων απορροής των εικονοστοιχείων. Equal to: εισάγεται ο αριθμός της ώρας η οποία μελετάται κάθε φορά
Δημιουργία κανάβου εικονοστοιχείων που απορρέουν με χιλιοστά βροχής που δέχονται	aporroi_1h vrox_IDW	Math Trigonometric Times	Times_1h_IDW	Τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία που δεν απορρέουν την χρονική στιγμή αυτή έχουν τιμή 0.
Δημιουργία κανάβου με ακέραιες τιμές βροχόπτωσης	Times_1h_IDW	Math Trigonometric Int	Int_times_1h	

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ARCGIS	ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Δημιουργία νέου πεδίου στον πίνακα περιγραφικών χαρακτηριστικών	Int_times_1h	Data management tools Fields Add Field	Int_times (2)	Name: paroxi
Υπολογισμός των τιμών του νέου πεδίου paroxi	Int_times (2)	Data management tools Fields Calculate Field $(\text{Value}/1000) * \text{Count} * 25 * 25 / 3600$	Int_times (3)	Το πεδίο αυτό θα περιλαμβάνει την παροχή που εμφανίζεται στην έξοδο της λεκάνης για κάθε τιμή βροχόπτωσης ξεχωριστά. Υπολογίζεται με βάση την αρχική ανάλυση των δεδομένων (25x25m)
Υπολογισμός συνολικής παροχής στην έξοδο της λεκάνης για τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή	Int_times (3)	Analysis Tools Statistics Summary statistics	Paroxi_statistics1	Field: paroxi Statistic Type: Sum
Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για 24h έτσι ώστε να απορρεύσουν όλα τα εικονοστοιχεία και να προκύψουν 24 τιμές παροχής για την κάθε ώρα				
Δημιουργία ενιαίου πίνακα συνολικής παροχής	paroxi_statistics1, paroxi_statistics2, paroxi_statistics3 	Data Management Tools General Merge	Merge_stat	Ενιαίος πίνακας συνολικής παροχής στην έξοδο της λεκάνης για κάθε ώρα ξεχωριστά

