



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ
ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Αντωνιάδη Σύλβια

Επιβλέπων: Α. Ευστρατιάδης, ΕΔΙΠ Ε.Μ.Π.
Υπεύθυνος Καθηγητής: Ν. Μαμάσης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

« ΕΠΙΣΤΗΜΗ
ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ »

Αθήνα, Ιούλιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ – ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ
ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Μεταπτυχιακή εργασία

Αντωνιάδη Σύλβια, Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός

Τριμελής Επιτροπή:

Δ. Κουτσογιάννης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χ. Μακρόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ν. Μαμάσης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Υπεύθυνος Καθηγητής)

Αθήνα, Ιούλιος 2016

© 2016 Σ. Αντωνιάδη (Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος)

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή του παρόντος κειμένου, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτού, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Προλογικό σημείωμα

Ολοκληρώνοντας την μεταπτυχιακή μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Δρ. Πολιτικό Μηχανικό κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη για την ανάθεση του θέματος, δίνοντάς μου το έναυσμα να ασχοληθώ με ένα αντικείμενο ιδιαίτερος ενδιαφέρον. Τον ευχαριστώ θερμά για τις πολύτιμες συμβουλές του, την συνεχή καθοδήγηση και την αμέριστη υποστήριξη που μου προσέφερε καθ'όλη την διάρκεια της εκπόνησης. Θα ήθελα να ευχαριστήσω, επίσης, τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Νίκο Μαμάση για την ουσιαστική βοήθεια και το ενδιαφέρον που μου έδειξε, όντας πάντα διαθέσιμος σε οποιοδήποτε ζήτημα ανέκυπτε. Ακόμη, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Αντώνη Κουκουβίνο, η στήριξη του οποίου ήταν διαρκής και η βοήθεια του καθοριστική.

Μετά το πέρας της παρούσας εργασίας κλείνει ένας σημαντικός κύκλος σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Για όλα αυτά τα χρόνια που αφιέρωσα στην απόκτηση γνώσεων, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην μητέρα μου, που μου έδωσε την δυνατότητα να εκπληρώσω τις σπουδές μου και υπήρξε το στήριγμά μου καθ'όλη την διάρκεια. Τέλος, ευχαριστώ τη Δανάη, το Λεωνίδα και τον Παναγιώτη για την συμπαράστασή τους όλο αυτό το χρονικό διάστημα εκπόνησης της εργασίας.

Αντωνιάδη Σύλβια

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|------------|
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ | iii |
| ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ | v |
| ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ | vii |
| ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ | ix |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ | xi |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 1 |
| EXTENDED ABSTRACT | 3 |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 11 |
| 1.1. Γενική τοποθέτηση | 11 |
| 1.2. Αντικείμενο και διάρθρωση της εργασίας | 12 |
| 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ | 15 |
| 2.1. Υδρολογικός σχεδιασμός | 15 |
| 2.2. Χρόνος συγκέντρωσης | 16 |
| 2.3. Μέθοδοι εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης | 17 |
| 2.3.1. Γραφικές μέθοδοι εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης | 17 |
| 2.3.2. Εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης | 19 |
| 2.3.3. Η μέθοδος της Natural Resources Conservation Service (NRCS, 1986) | 20 |
| 2.4. Αβεβαιότητες μεθόδων εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης | 25 |
| 2.5. Αβεβαιότητες κατά την γεωμορφομετρική ανάλυση | 27 |
| 2.5.1. Γεωμορφομετρική ανάλυση | 27 |
| 2.5.2. Η έννοια της κλίμακας στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους | 28 |
| 2.5.3. Επίδραση της κλίμακας στα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά | 29 |
| 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ | 31 |
| 3.1. Θεωρητικό πλαίσιο μεθοδολογίας | 31 |
| 3.2. Περιγραφή μεθοδολογίας | 33 |
| 3.2.1. Επίγεια ροή κατά μήκος της μέγιστης διαδρομής ροής | 33 |
| 3.2.2. Ροή στο υδατόρευμα κατά μήκος της μέγιστης διαδρομής ροής | 34 |
| 3.2.3. Κριτήρια τμηματοποίησης της μέγιστης διαδρομής ροής | 34 |
| 3.2.4. Προσδιορισμός των υδραυλικών χαρακτηριστικών | 34 |
| 3.2.5. Δημιουργία τοπολογικών σχέσεων σε περιβάλλον GIS | 35 |
| 4. ΓΕΩΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ | 39 |
| 4.1. Λογισμικά εφαρμογής | 39 |
| 4.2. Συμπλήρωση βυθισμάτων (Fill Sinks) | 39 |

| | |
|--|------------|
| 4.3. Συγκέντρωση ροής (Flow Accumulation)..... | 42 |
| 4.4. Καθορισμός σημείου έναρξης υδρογραφικού δικτύου..... | 46 |
| 4.5. Μέγιστη υδραυλικά διαδρομή ροής (Longest Flow Path)..... | 48 |
| 4.6. Αυτοματοποιημένη εκτέλεση εντολών μέσω του Model Builder | 49 |
| 5. ΛΕΚΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ..... | 53 |
| 5.1. Λεκάνη απορροής Νέδοντα..... | 53 |
| 5.2. Λεκάνη απορροής Σαρανταπόταμου | 57 |
| 5.3. Λεκάνη απορροής ρέματος Ραφήνας..... | 60 |
| 5.4. Λεκάνη απορροής χειμάρρου Ξεριά..... | 64 |
| 6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ..... | 69 |
| 6.1. Λεκάνη απορροής Νέδοντα..... | 69 |
| 6.1.1. Διερεύνηση αλγορίθμων συμπλήρωσης βυθισμάτων στο ΨΜΥ..... | 69 |
| 6.1.2. Δεδομένα εξόδου από το GIS – Εφαρμογή της μεθοδολογίας..... | 73 |
| 6.2. Λεκάνη απορροής Σαρανταπόταμου | 75 |
| 6.2.1. Δεδομένα εξόδου από το GIS – Εφαρμογή της μεθοδολογίας..... | 76 |
| 6.3. Λεκάνη απορροής Ραφήνας..... | 78 |
| 6.3.1. Δεδομένα εξόδου από το GIS – Εφαρμογή της μεθοδολογίας..... | 79 |
| 6.4. Λεκάνη απορροής Ξεριά | 81 |
| 6.4.1. Δεδομένα εξόδου από το GIS – Εφαρμογή της μεθοδολογίας..... | 84 |
| 6.5. Αποτελέσματα - Σχολιασμός..... | 86 |
| 7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ..... | 91 |
| 7.1. Σκοπός και μεθοδολογία..... | 91 |
| 7.2. Ανάλυση μεταβολής πλάτους ορθογωνικής διατομής..... | 91 |
| 7.3. Ανάλυση μεταβολής συντελεστή τραχύτητας κατά Manning..... | 94 |
| 7.4. Ανάλυση μεταβολής συντελεστή παρεμπόδισης..... | 96 |
| 7.5. Συμπεράσματα ανάλυσης ευαισθησίας | 98 |
| 7.6. Διερεύνηση χωρικής ανάλυσης ΨΜΥ..... | 98 |
| 7.6.1. Αποτελέσματα σύγκρισης ΨΜΥ διαφορετικών χωρικών αναλύσεων | 100 |
| 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 105 |
| 8.1. Σύνοψη – Συμπεράσματα | 105 |
| 8.2. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα | 108 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 111 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι..... | 117 |

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

| | |
|--|----|
| <i>Διάγραμμα 6.1.</i> Γράφημα τοπικής κλίσης – έκτασης ανάντη συμβάλλουσας περιοχής αποστράγγισης στην μέγιστη υδραυλικά διαδρομή ροής, για την λεκάνη απορροής του Νέδοντα. | 71 |
| <i>Διάγραμμα 6.2.</i> Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής για την λεκάνη του Νέδοντα. | 74 |
| <i>Διάγραμμα 6.3.</i> Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσει της παροχής εξόδου για την λεκάνη του Νέδοντα. | 74 |
| <i>Διάγραμμα 6.4.</i> Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής για την λεκάνη του Σαρανταπόταμου. | 77 |
| <i>Διάγραμμα 6.5.</i> Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσει της παροχής εξόδου για την λεκάνη του Σαρανταπόταμου. | 77 |
| <i>Διάγραμμα 6.6.</i> Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής για την λεκάνη του ρέματος Ραφήνας. | 81 |
| <i>Διάγραμμα 6.7.</i> Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσει της παροχής εξόδου για την λεκάνη του ρέματος Ραφήνας. | 81 |
| <i>Διάγραμμα 6.8.</i> Παράδειγμα προσδιορισμού του πλάτους της διατομής Δ3. | 83 |
| <i>Διάγραμμα 6.9.</i> Παράδειγμα προσδιορισμού του πλάτους της διατομής Δ70. | 84 |
| <i>Διάγραμμα 6.10.</i> Μεταβολή χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής για την λεκάνη του Ξεριά. | 86 |
| <i>Διάγραμμα 6.11.</i> Μεταβολή χρόνου απόκρισης συναρτήσει της παροχής εξόδου για την λεκάνη του Ξεριά. | 86 |
| <i>Διάγραμμα 6.12.</i> Box plots με το εκτιμώμενο εύρος τιμών του χρόνου απόκρισης | 87 |
| <i>Διάγραμμα 6.13.</i> Γραμμική τάση μεταβολής συντελεστή b γραμμών τάσης $P_t = a t_r^{-b}$ συναρτήσει της μέσης κλίσης της μέγιστης διαδρομής ροής των υπό εξέταση λεκανών απορροής. | 88 |
| <i>Διάγραμμα 6.14.</i> Γραμμική τάση μεταβολής συντελεστή b' γραμμών τάσης $Q_t = a' t_r^{-b'}$ συναρτήσει της μέσης κλίσης της μέγιστης διαδρομής ροής των υπό εξέταση λεκανών απορροής. | 89 |
| <i>Διάγραμμα 6.15.</i> Απεικόνιση μεταβολής συντελεστή a γραμμών τάσης $P_t = a t_r^{-b}$ συναρτήσει του μήκους της μέγιστης διαδρομής ροής των υπό εξέταση λεκανών απορροής. | 89 |
| <i>Διάγραμμα 6.16.</i> Απεικόνιση μεταβολής συντελεστή a' γραμμών τάσης $Q_t = a' t_r^{-b'}$ συναρτήσει του μήκους της μέγιστης διαδρομής ροής των υπό εξέταση λεκανών απορροής. | 90 |
| <i>Διάγραμμα 7.1.</i> Ανάλυση ευαισθησίας πλάτους διατομής για την λεκάνη απορροής του Νέδοντα. | 92 |
| <i>Διάγραμμα 7.2.</i> Ανάλυση ευαισθησίας πλάτους διατομής για την λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου. | 93 |
| <i>Διάγραμμα 7.3.</i> Ανάλυση ευαισθησίας πλάτους διατομής για την λεκάνη απορροής του ρέματος Ραφήνας. | 93 |
| <i>Διάγραμμα 7.4.</i> Ανάλυση ευαισθησίας πλάτους διατομής για την λεκάνη απορροής του ρέματος Ξεριά. | 93 |

| | |
|---|-----|
| <i>Διάγραμμα 7.5. Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή τραχύτητας Manning για την λεκάνη απορροής του Νέδοντα.</i> | 94 |
| <i>Διάγραμμα 7.6. Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή τραχύτητας Manning για την λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου.</i> | 95 |
| <i>Διάγραμμα 7.7. Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή τραχύτητας Manning για την λεκάνη απορροής του ρέματος της Ραφήνας.</i> | 95 |
| <i>Διάγραμμα 7.8. Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή τραχύτητας Manning για την λεκάνη απορροής του ρέματος Ξεριά.</i> | 95 |
| <i>Διάγραμμα 7.9. Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή παρεμπόδισης για την λεκάνη απορροής του Νέδοντα.</i> | 97 |
| <i>Διάγραμμα 7.10. Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή παρεμπόδισης για την λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου.</i> | 97 |
| <i>Διάγραμμα 7.11. Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή παρεμπόδισης για την λεκάνη απορροής του ρέματος Ραφήνας.</i> | 97 |
| <i>Διάγραμμα 7.12. Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή παρεμπόδισης για την λεκάνη απορροής του Ξεριά.</i> | 98 |
| <i>Διάγραμμα 7.13. Σύγκριση χαρακτηριστικών κλίσεων της λεκάνης του Νέδοντα για διαφορετικές χωρικές αναλύσεις.</i> | 102 |
| <i>Διάγραμμα 7.14. Υπολογισμός των χρόνων απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής από ΨΜΥ διαφορετικών χωρικών αναλύσεων της λεκάνης του Νέδοντα.</i> | 103 |
| <i>Διάγραμμα 7.15. Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής από ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 25 m της λεκάνης του Νέδοντα.</i> | 103 |
| <i>Διάγραμμα 7.16. Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής από ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 50 m της λεκάνης του Νέδοντα.</i> | 103 |
| <i>Διάγραμμα 7.17. Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής από ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 100 m της λεκάνης του Νέδοντα.</i> | 104 |
| <i>Διάγραμμα 7.18. Μεταβολή χρόνων απόκρισης και παροχών σε μοντέλα διαφορετικών χωρικών αναλύσεων της λεκάνης του Νέδοντα.</i> | 104 |

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|---|----|
| <i>Εικόνα 2.1.</i> Σχηματική απεικόνιση βασικών χρονικών μεγεθών σε ένα πλημμυρικό επεισόδιο. | 18 |
| <i>Εικόνα 2.2.</i> Παράδειγμα μεταβολής του χρόνου συγκέντρωσης συναρτήσει της πλημμυρικής παροχής, στη λεκάνη απορροής Cow Bayou (Πηγή: Grimaldi et al., 2012). | 26 |
| <i>Εικόνα 2.3.</i> Μέθοδοι αναπαράστασης της υψομετρικής πληροφορίας: (α) Δίκτυο τετραγωνικού πλέγματος (b) Ακανόνιστο δίκτυο τριγώνων (c) Δίκτυο υπό μορφή περιγράμματος | 28 |
| <i>Εικόνα 3.1.</i> Ερμηνεία του χρόνου συγκέντρωσης, ως ο χρόνος που απαιτείται για τη διαδρομή μιας σταγόνας από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης ως την διατομή εξόδου. | 31 |
| <i>Εικόνα 3.2.</i> Παράδειγμα απεικόνισης των διανυσματικών οντοτήτων σε περιβάλλον GIS: a) Γραμμικές οντότητες, b) Σημειακές οντότητες, c) Επιφανειακές οντότητες..... | 35 |
| <i>Εικόνα 3.3.</i> Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας εκτίμησης του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής..... | 38 |
| <i>Εικόνα 4.1.</i> Παράλληλο σύστημα εφαρμογής του αλγορίθμου Planchon & Darboux (2001)..... | 41 |
| <i>Εικόνα 4.2.</i> Διατομή της βυθίσματος (αριστερά) και συμπλήρωσή του (δεξιά) στο ArcMap (Πηγή: ArcGISHelp)..... | 41 |
| <i>Εικόνα 4.3.</i> Αλγόριθμοι μονής και πολλαπλής κατεύθυνσης ροής (Πηγή: Wolock & McGabe, 1995). | 43 |
| <i>Εικόνα 4.4.</i> Κωδικοποίηση των διευθύνσεων ροής και της συγκέντρωση ροής στο ArcGIS (Πηγή: ArcGIS Help)..... | 44 |
| <i>Εικόνα 4.5.</i> Μέθοδοι κατάταξης των ρευμάτων σε τάξεις ιεράρχησης. | 45 |
| <i>Εικόνα 4.6.</i> Σχέση της κλίσης-έκτασης ανάντη συμβάλλουσας περιοχής σε λογαριθμική κλίμακα..... | 47 |
| <i>Εικόνα 4.7.</i> Γράφημα τοπικής κλίσης-έκτασης ανάντη περιοχής αποστράγγισης ΨΜΥ (Πηγή: McNamara et al., 2006). | 48 |
| <i>Εικόνα 4.8.</i> Πεδία συμπλήρωσης του εργαλείου Splitted Longest Flow Path & Subbasins στο περιβάλλον ArcGIS. | 49 |
| <i>Εικόνα 4.9.</i> Πεδία συμπλήρωσης του εργαλείου kCoefficient στο περιβάλλον του ArcGIS. | 51 |
| <i>Εικόνα 5.1.</i> Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης του Νέδοντα. | 54 |
| <i>Εικόνα 5.2.</i> Ψηφιακό μοντέλο κλίσεων της λεκάνης του Νέδοντα. | 54 |
| <i>Εικόνα 5.3.</i> Υδρογραφικό δίκτυο και υδρομετρικοί σταθμοί της λεκάνης του Νέδοντα. | 55 |
| <i>Εικόνα 5.4.</i> Χρήσεις γης στην λεκάνη του Νέδοντα. | 55 |
| <i>Εικόνα 5.5.</i> Γεωλογικοί σχηματισμοί της λεκάνης του Νέδοντα. | 56 |
| <i>Εικόνα 5.6.</i> Διαπερατότητα γεωλογικών σχηματισμών της λεκάνης του Νέδοντα..... | 57 |
| <i>Εικόνα 5.7.</i> Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης του Σαρανταπόταμου. | 58 |
| <i>Εικόνα 5.8.</i> Ψηφιακό μοντέλο κλίσεων της λεκάνης του Σαρανταπόταμου. | 58 |
| <i>Εικόνα 5.9.</i> Υδρογραφικό δίκτυο και υδρομετρικοί σταθμοί της λεκάνης του Σαρανταπόταμου. | 59 |
| <i>Εικόνα 5.10.</i> Χρήσεις γης στην λεκάνη του Σαρανταπόταμου. | 59 |

| | |
|--|-----|
| <i>Εικόνα 5.11. Γεωλογικοί σχηματισμοί της λεκάνης του Σαρανταπόταμου.</i> | 60 |
| <i>Εικόνα 5.12. Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης του ρέματος Ραφήνας.</i> | 61 |
| <i>Εικόνα 5.13. Ψηφιακό μοντέλο κλίσεων της λεκάνης του ρέματος Ραφήνας.</i> | 61 |
| <i>Εικόνα 5.14. Υδρογραφικό δίκτυο και υδρομετρικοί σταθμοί της λεκάνης του ρέματος Ραφήνας.</i> | 62 |
| <i>Εικόνα 5.15. Χρήσεις γης στην λεκάνη του ρέματος Ραφήνας.</i> | 63 |
| <i>Εικόνα 5.16. Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ρέματος Ραφήνας (Πηγή: Αλωνιστιώτη, 2011).</i> | 63 |
| <i>Εικόνα 5.17. Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης του ρέματος Ξεριά.</i> | 65 |
| <i>Εικόνα 5.18. Ψηφιακό μοντέλο κλίσεων της λεκάνης του ρέματος Ξεριά.</i> | 65 |
| <i>Εικόνα 5.19. Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης του ρέματος Ξεριά.</i> | 66 |
| <i>Εικόνα 6.1. Σύγκριση των αλγορίθμων συμπλήρωσης των βυθισμάτων του SAGA GIS (Planchon & Darboux, 2001) και του ArcGIS για την λεκάνη του Νέδοντα.</i> | 70 |
| <i>Εικόνα 6.2. Υδρογραφικό δίκτυο και μέγιστη διαδρομή ροής της λεκάνης του Νέδοντα.</i> | 72 |
| <i>Εικόνα 6.3. Δεδομένα εξόδου από το περιβάλλον GIS της λεκάνης του Νέδοντα.</i> | 73 |
| <i>Εικόνα 6.4. Υδρογραφικό δίκτυο και μέγιστη διαδρομή ροής της λεκάνης του Σαρανταπόταμου.</i> | 75 |
| <i>Εικόνα 6.5. Δεδομένα εξόδου από το περιβάλλον GIS της λεκάνης του Σαρανταπόταμου.</i> | 76 |
| <i>Εικόνα 6.6. Υδρογραφικό δίκτυο και μέγιστη διαδρομή ροής της λεκάνης του ρέματος Ραφήνας.</i> | 78 |
| <i>Εικόνα 6.7. Σχεδίαση διατομών σε επιλεγμένους κόμβους της μέγιστης διαδρομής ροής της λεκάνης του ρέματος Ραφήνας.</i> | 79 |
| <i>Εικόνα 6.8. Δεδομένα εξόδου από το περιβάλλον GIS της λεκάνης του ρέματος Ραφήνας.</i> | 80 |
| <i>Εικόνα 6.9. Υδρογραφικό δίκτυο και μέγιστη διαδρομή ροής της λεκάνης του Ξεριά.</i> | 82 |
| <i>Εικόνα 6.10. Σχεδίαση διατομών κατά μήκος της μέγιστης διαδρομής ροής της λεκάνης του ρέματος Ξεριά.</i> | 83 |
| <i>Εικόνα 6.11. Δεδομένα εξόδου από το περιβάλλον GIS της λεκάνης του Ξεριά.</i> | 85 |
| <i>Εικόνα 7.1. Αναπαράσταση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης του Νέδοντα από σύνολα διαφορετικών χωρικών αναλύσεων.</i> | 100 |
| <i>Εικόνα 7.2. Ψηφιακά μοντέλα κλίσεων διαφορετικών χωρικών αναλύσεων για την λεκάνη του Νέδοντα.</i> | 102 |

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|-----|
| <i>Πίνακας 2.1.</i> Συντελεστές τραχύτητας εδάφους για ροή σε φιλμ (Πηγή: TR-55). | 22 |
| <i>Πίνακας 2.2.</i> Τιμές συντελεστή παρεμπόδισης k επίγειας ροής (Haan et al., 1994· McCuen, 2008). 24 | |
| <i>Πίνακας 4.1.</i> Αντιστοίχιση τιμών συντελεστή παρεμπόδισης με τις χρήσεις γης του Corine Land Cover 2000. | 50 |
| <i>Πίνακας 6.1.</i> Αποτελέσματα υπολογισμού του χρόνου απόκρισης και της παροχής..... | 74 |
| <i>Πίνακας 6.2.</i> Αποτελέσματα υπολογισμού του χρόνου απόκρισης και της παροχής..... | 77 |
| <i>Πίνακας 6.3.</i> Αποτελέσματα υπολογισμού του χρόνου απόκρισης και της παροχής..... | 80 |
| <i>Πίνακας 6.4.</i> Αποτελέσματα υπολογισμού του χρόνου απόκρισης και της παροχής..... | 85 |
| <i>Πίνακας 7.1.</i> Σύγκριση μέσων υψομέτρων ΨΜΕ διαφορετικών χωρικών αναλύσεων | 99 |
| <i>Πίνακας 7.2.</i> Σύγκριση βασικών χαρακτηριστικών εκτιμώμενων από μοντέλα διαφορετικών | 101 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

| | |
|-----------|--|
| Q_p | Πλημμυρική παροχή αιχμής |
| T | Περίοδος επαναφοράς |
| C | Συντελεστής απορροής |
| i | Κρίσιμη ένταση βροχής |
| A | Επιφάνεια λεκάνης απορροής |
| L | Μήκος ροής |
| L_{max} | Μέγιστη διαδρομή ροής |
| S | Μέση κλίση επιφάνειας |
| J | Κλίση κατά μήκος τμήματος του υδρογραφικού δικτύου |
| t_c | Χρόνος συγκέντρωσης |
| t_L | Χρόνος υστέρησης |
| \bar{u} | Μέση ταχύτητα ροής |
| V | Ταχύτητα ροής |
| t | Χρόνος ταξιδιού ταξιδιού της απορροής |
| t_r | Χρόνος απόκρισης σε ένα γεγονός βροχής r |
| P_r | Ύψος απορροής ενός γεγονότος βροχής r |
| Q_r | Παροχή στην έξοδο της λεκάνης για ένα γεγονός βροχής r |
| Q | Παροχή σε κόμβο |
| b | Πλάτος διατομής του υδατορεύματος |
| y | Βάθος ροής του υδατορεύματος |
| k | Συντελεστής παρεμπόδισης |
| n | Συντελεστής τραχύτητας Manning |
| R | Υδραυλική ακτίνα |
| B | Μήκος βρεχόμενης περιμέτρου |
| E | Εμβαδόν βρεχόμενης διατομής |

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η προσπάθεια ορθολογικού και αξιόπιστου σχεδιασμού ενός έργου διαχείρισης υδατικών πόρων, προάγει την έρευνα υφιστάμενων μεθόδων της εφαρμοσμένης Υδρολογίας και την αναζήτηση βελτιωμένων τεχνικών, συμβάλλοντας στην εξέλιξη του επιστημονικού αυτού τομέα. Η μοντελοποίηση αποτελεί μια απαιτητική και αβέβαιη διαδικασία, λόγω της αδυναμίας ενσωμάτωσης των πολύπλοκων φυσικών νόμων που διέπουν το υδατικό σύστημα και της στοχαστικής φύσης του υδάτινου στοιχείου. Η απόσταση μεταξύ της θεωρίας και της πράξης καλύπτεται εν μέρει από το εμπειρικό υπόβαθρο της Τεχνικής Υδρολογίας, που στηρίζεται σε απλοποιημένης μορφής προσεγγίσεις και παραδοχές.

Ειδικότερα, η περιγραφή των υδρολογικών διεργασιών μιας λεκάνης απορροής, στο πλαίσιο του αντιπλημμυρικού σχεδιασμού, απαιτεί την εκτίμηση χρονικών παραμέτρων, ενδεικτικών της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης σε ένα επεισόδιο βροχής. Μια κρίσιμη εννοιολογική παράμετρος που χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό, καθώς αποτελεί τυπικό δεδομένο εισόδου σε μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης και μεθόδους προσδιορισμού των υδρολογικών παραμέτρων, είναι ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής. Η εν λόγω παράμετρος είναι άμεσα συνυφασμένη με την ακρίβεια του σχεδιασμού και παρότι αντιμετωπίζεται ως σταθερά της λεκάνης απορροής, εντούτοις πρόκειται για τυχαία μεταβλητή, αντιστρόφως ανάλογη της έντασης της βροχόπτωσης.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια ποιοτική αξιολόγηση διαφόρων καθιερωμένων μεθόδων εκτίμησης της χρονικής αυτής παραμέτρου, μέσω της εμβάθυνσης στο γνωστικό τους υπόβαθρο και της διερεύνησης ζητημάτων αβεβαιότητας που τις συνοδεύουν. Κύριος σκοπός της είναι η ανάπτυξη μιας μεθοδολογικής προσέγγισης προσδιορισμού μιας χαρακτηριστικής χρονικής παραμέτρου της λεκάνης απορροής ως συνάρτηση του ύψους απορροής της βροχόπτωσης. Η εκτιμώμενη παράμετρος είναι ενδεικτική του χρόνου υδρολογικής απόκρισης, προσεγγίζοντας τον χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης. Υπό μια ντετερμινιστική θεώρηση, η μεθοδολογία υλοποιείται από απλές σχέσεις υδραυλικής και εμπειρικές προσεγγίσεις, σε ημι-κατανεμημένη χωρική κλίμακα. Ουσιαστικά συνίσταται στον υπολογισμό των ταχυτήτων κατά μήκος της μέγιστης διαδρομής ροής, υπό τη θεώρηση διαφορετικών καθεστώτων ροής.

Βασικό πυρήνα της μελέτης αποτελεί η επεξεργασία των χωρικών δεδομένων σε σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών, αναδεικνύοντας τους περιορισμούς που τίθενται κατά την εφαρμογή χωρικών αλγορίθμων.

Επιπλέον, στο πλαίσιο της εργασίας πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση ευαισθησίας της υιοθετούμενης μεθόδου, με σκοπό να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση των αβέβαιων μεταβλητών εισόδου στο αποτέλεσμα. Προέκταση αυτής της ανάλυσης αποτελεί και η διερεύνηση της επίπτωσης που επιφέρει η επιλογή της κλίμακας της γεωπληροφορίας σε ψηφιακό περιβάλλον, κατά την εκτέλεση της εφαρμογής.

Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε ένα δείγμα τεσσάρων λεκανών απορροής μικρής σχετικά κλίμακας, προβάλλοντας μια μαθηματική σχέση συσχέτισης μεταξύ του χρόνου απόκρισης και του ύψους απορροής της βροχής. Μέσω της σχέσης σύνδεσης των δύο μεταβλητών

παρατηρείται μια αντιστοιχία του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti και κατά Kirpich, σε συγκεκριμένο ύψος απορροής της βροχής.

Γενικότερα, η κατανόηση της συμπεριφοράς του υδατικού συστήματος σε ένα πλημμυρικό επεισόδιο ενισχύεται μέσω της μελέτης διάδοσης του πλημμυρικού κύματος στην χωρική και χρονική διάσταση. Προς την κατεύθυνση αυτή, εκπονήθηκε η εν λόγω μελέτη διερεύνησης της μεταβλητότητας της χρονικής απόκρισης της λεκάνης, δίνοντας το έναυσμα για περαιτέρω έρευνα σε ένα γνωστικό αντικείμενο που βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο.

Λέξεις κλειδιά: χρόνος συγκέντρωσης, παροχή σχεδιασμού, ύψος απορροής, μέγιστη διαδρομή ροής, Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρων (ΨΜΥ).

EXTENDED ABSTRACT

Investigation of the time-response variability of river basins

Introduction

A primary design variable in hydrology is the peak discharge, Q_P , defined as the maximum flow rate passing from a particular cross-section during a design storm event. Peak discharge can be estimated by rainfall-runoff models, such as the rational method and the unit hydrograph approach. Several time parameters are associated with flood modelling, which have direct impacts on the estimation of peak discharge. Commonly used time parameters are the time of concentration, t_c , the lag time, t_L , as well as the time to peak, t_p , and base time, t_b , of the unit hydrograph. These are used to quantify how fast runoff traverses the watershed and the delay between rainfall and runoff. The time of concentration is the most widely-studied, and is typically used for estimating the rest of time parameters.

In the literature are provided various definitions for the time of concentration concept, both computational and theoretical. According the most common one, t_c is defined as “the travel time required for a rain drop to flow from the hydraulically most remote point of a basin to its outlet”. Theoretically, given a uniformly distributed effective rainfall over the basin, t_c refers to the time interval after the start of rainfall for which the entire basin contributes to runoff generation, thus maximizing the flow rate at the outlet. When both rainfall and runoff observations are available, and after excluding hydrological losses and base flow, the time of concentration can be determined as the time difference from the end of rainfall excess to the end of direct runoff. Nevertheless, restricted field data for graphical estimations lead to empirically-established methods for computing t_c on the basis of geomorphological data, such as the Giandotti’s formula. Although these regional formulas are widely accepted in applied hydrology, they have inherent limitations, since they have been generally derived through regression analysis fitted to local field observations. An alternative approach, which was proposed by Natural Resources Conservation Service (NRCS), in 1986, is founded on a more natural basis and is known as the velocity method. This distributed approach considers three flow regimes along the longest flow path, i.e. sheet flow, shallow concentrated flow and open-channel flow.

Due to discrepancies among definitions and estimation procedures, t_c remains one of the most ambiguous concepts in hydrology. Even the simplest approaches, employing regional formulas, are affected by several uncertainties, such as geometrical hypotheses, automatic extraction of the drainage network, as well as DEM resolution and pre-processing. However, the most important misconception is the treatment of t_c as a constant property of the basin. In fact, the time of concentration is not constant, but varies inversely with discharge, and thus the rainfall intensity. The variability of t_c is absolutely crucial, since it strongly affects the reliability of hydrological design and the safety of associated hydraulic structures. The aim of this master thesis is to quantify the variability of the travel time across the longest flow path (LFP) of a river basin against the effective rainfall produced over the catchment. The methodology is based on the kinematic approach employed within

typical design of urban sewer networks, which employs a semi-distributed schematization of the hydrological system and takes advantage of the rational method for the estimation of design peak discharge of each network element. The input data are derived through digital elevation model processing on geographic information systems. Finally, a sensitivity analysis is applied to investigate how the methodology is affected by various input parameters and DEM resolution.

Data

The analysis is implemented in four mesoscale rural basins. *Table 1* shows their main characteristics, as well as the time of concentration values that are calculated through two of the most popular regional formulas, i.e. Giandotti and Kirpich. It is remarked that the two formulas provide estimations that differ up to 100%.

Table 1. Main characteristics of the four selected basins.

| | Nedontas | Sarantapotamos | Rafina | Xerias |
|--|----------|----------------|----------------|----------|
| Location | Messenia | Western Attica | Eastern Attica | Magnesia |
| Area (km ²) | 114.8 | 143.7 | 123.3 | 111.5 |
| Min elevation (m) | 47.7 | 118.5 | 0.0 | 0.0 |
| Max elevation (m) | 1666.0 | 1353.8 | 902.6 | 1573.3 |
| Mean elevation (m) | 866.4 | 495.0 | 225.6 | 465.8 |
| Longest flow path (km) | 21.6 | 32.1 | 29.6 | 34.0 |
| Mean slope of LFP (%) | 7.5 | 4.0 | 3.0 | 4.4 |
| Time of concentration, Giandotti formula (h) | 3.3 | 6.3 | 7.4 | 5.4 |
| Time of concentration, Kirpich formula (h) | 1.9 | 3.4 | 3.5 | 3.3 |

Methodology

The proposed methodology adopts a semi-distributed spatial scale, following the rationale of urban stormwater design. After determining the longest flow path of the basin, two flow types are taken into consideration i.e. overland flow and channel flow. Essentially, along the maximum flow route are defined junctions and river segments with specific morphometric and hydraulic characteristics (upstream drainage area, length, mean slope, roughness). Initially we determine the overland velocity (m/s) of the most upstream sub-basin, by employing the empirical formula:

$$V_{overland} = k \cdot \sqrt{J} \quad (1)$$

where k is a roughness coefficient that is mainly related to the soil cover (m/s), and J is the mean slope of the watercourse (m/m).

By proceeding from upstream to downstream, we calculate the input peak discharge, Q_r , through the rational formula, considering a temporally and spatially uniform surface runoff depth (effective rainfall) P_r over the upstream drainage area, which duration is at least equal to the travel time of the upstream network, i.e.:

$$Q_r = \frac{P_r \cdot \sum_{i=1}^N A_i}{\sum_{i=1}^N t_i} \quad (2)$$

where A_i (m^2) is the area of each individual upstream sub-basin i , and t_i (m/s) is the associated travel time, which is given by:

$$t_r = \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{V_i} \quad (3)$$

where L_i is the length of each upstream river segment i (m) and V_i (m/s) is the corresponding channel velocity (m/s). The latter is calculated through the Manning's formula, thus considering uniform flow conditions, i.e.:

$$V_{channel} = \frac{1}{n} R^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad (4)$$

where n is the Manning's roughness coefficient, R is the hydraulic radius (m), and J is the mean longitudinal slope of the river segment (m/m). For given input discharge, Q (m^3/s), the hydraulic radius is estimated by assuming a rectangular cross section, and solving the Manning's formula for the unknown flow depth, i.e.:

$$Q - \frac{1}{n} \frac{J^{1/2} \cdot b^{5/3} \cdot y^{5/3}}{(b + 2 \cdot y)^{2/3}} = 0 \quad (5)$$

where b is the width of the cross section (m), y is the depth of the cross section (m).

In the above procedure, most inputs are extracted via distributed spatial analysis, while some parameters, such as the roughness coefficients k and n , are user-specified. In particular, the schematization of the hydrological system is derived from a structured topology in GIS environment, which is composed of junctions, flow segments and surface elements (basins). Regarding the hydraulic characteristics, the length and slope are extracted through the DEM, while the section width is either estimated by field measurements or, in the absence of such data, from the DEM's topography or other sources (e.g., satellite maps).

Results

For given runoff depth, P_r , the proposed methodology calculates the travel time, t_r , as well as the resulting peak discharge, Q_r , at the basin outlet. In **Figure 1** are shown the scatter diagrams of travel time against runoff depth, at the four studied basins. In all cases, the two variables, i.e. travel time and runoff depth, are highly correlated, and they are well-approximated by power relationship of the form $t_r = a P_r^{-b}$, where $a, b > 0$. Additionally, an asymptotic behavior is apparent, which means that for extreme hydrological events, the travel time converges to a minimum value.

Interesting conclusions are also obtained by plotting the time of concentration values that are estimated by the two empirical formulas, i.e. Giandotti and Kirpich. In three out of four

basins (Nedontas, Rafina, Xerias), the Giandotti's value corresponds to a runoff height of about 2 mm, while the Kirpich's value corresponds to a runoff height of about 20 mm, i.e. one order of magnitude higher. In Sarantapotamos basin, the flow regime of which is strongly affected by topographic peculiarities, the Giandotti's time corresponds to a much higher value, while the Kirpich's time is outlier.

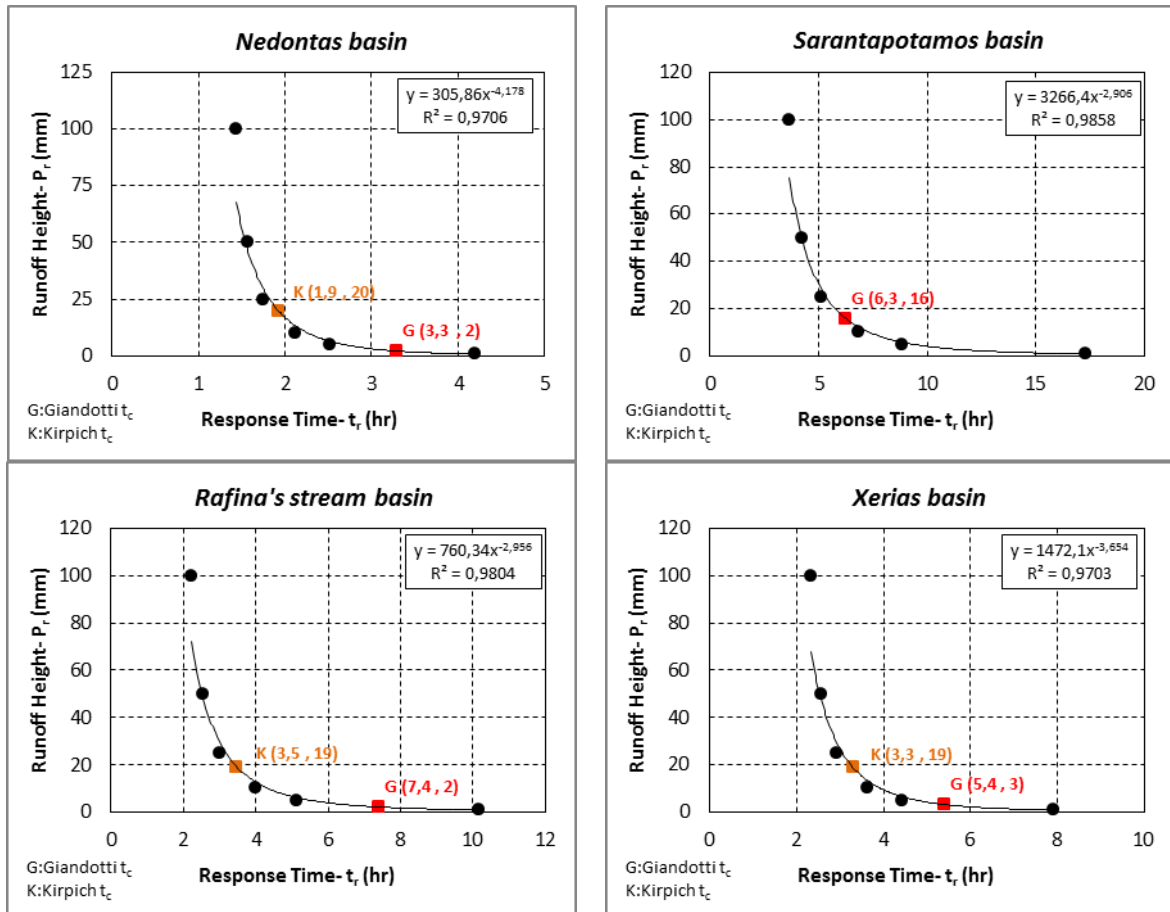


Figure 1. Scatter plots of travel time against runoff depth, in selected basins.

The variability of the travel time across the four basins is also demonstrated by means of box plots (Figure 2). It is shown that this variability is larger in cases of basins containing areas with flat topography, due to the storage effects and flow attenuations (routing). This also explains why the deviations between the Giandotti's and Kirpich's formula are smaller in the river basin of Nedontas, which is characterized by steep slopes and rapid response, and are larger in the river basin of Rafina stream, which extends over a much more smooth terrain. We remind that the Giandotti's formula provides much higher t_c values than the Kirpich's formula, since the two methods use different indices to account the relief effects. Actually, their differences are more significant in basins characterized by heterogeneous slopes.

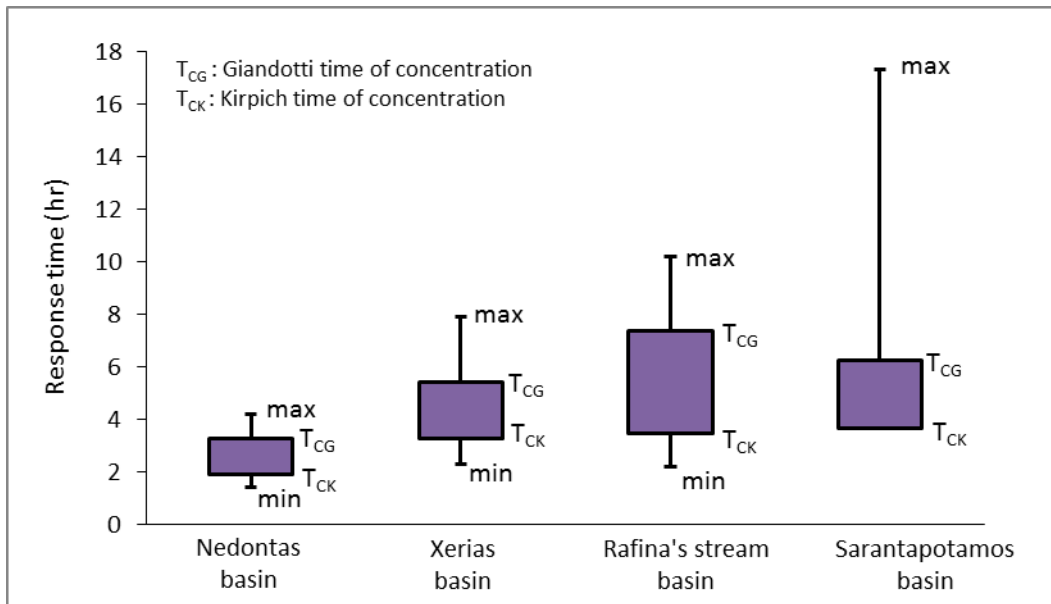


Figure 2. Box plots for all estimated timing values for the four selected watersheds.

It is also worth mentioning that coefficients a and b of the runoff-time relationship are well-correlated with two major geomorphometric characteristics of the four basins. (Figures 3 and 4). In particular, the exponent b is linear function of the average slope of the longest flow path, and the coefficient a is also function of length. This conclusion is very important and may be the basis for establishing empirical formulas of general applicability.

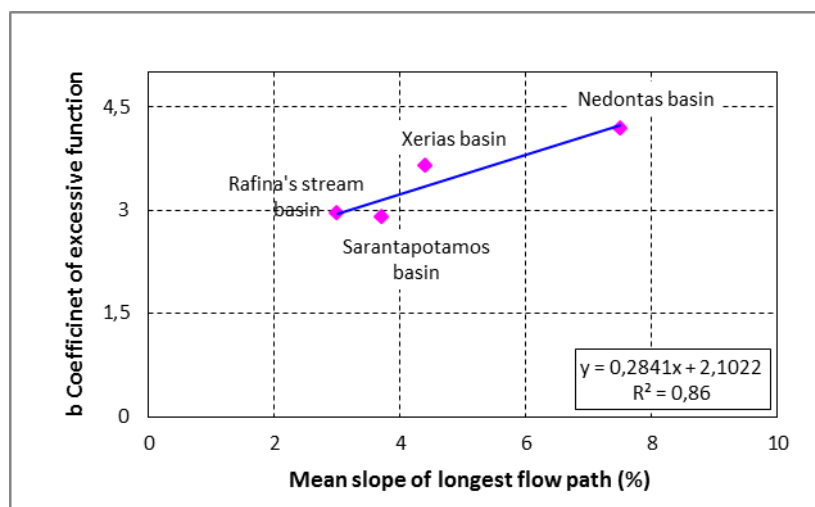


Figure 3. Scatter plot of exponent b against the average slope of the longest flow path.

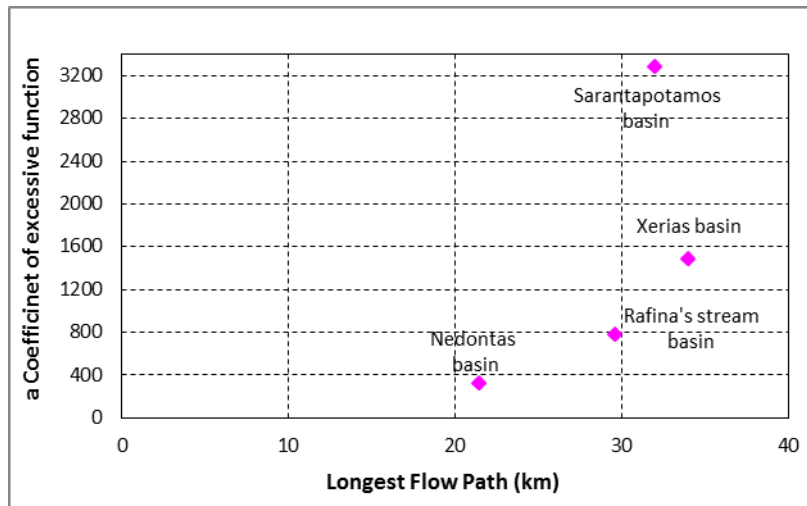


Figure 4. Scatter plot of coefficient a against the longest flow path length.

Sensitivity analysis

In order to quantify the effects of parameter uncertainty to travel time estimations, we employed a scenario-based sensitivity analysis, by changing by $\pm 20\%$ the following inputs:

- surface roughness coefficient, k ;
- Manning's roughness coefficient, n ; and
- width of rectangular section, b .

The selection of these parameters is considered crucial, due to uncertainty induced from measurement errors, lack of field information and inadequate knowledge of associated hydrological mechanisms.

From the sensitivity analysis it is concluded that in all basins, the range of uncertainty reduces as the runoff depth increases. Specifically, the section width is a parameter with low sensitivity, which becomes negligible for high runoff depths. In the other hand, the most sensitive parameter is the surface roughness coefficient.

Effects of DEM resolution

In order to give a well-established answer for this inquire, DEMs resolutions of 25 m, 50 m and 100 m have been compared against a reference DEM of 5 m analysis. The analysis was conducted for the Nedontas river basin, which has steep morphology and significant surface water potential. The three DEMs were created using a bilinear resampling starting from the original resolution of 5 m. Results reveal that:

- The drainage area tends to be overestimated by about 1% at 100 m resolution and 0.2% at 25 m and 50 m. However, these differences are extremely low, providing rather minor changes in the estimated area, which is mainly realized due to errors of the interpolation method.
- The ability of DEM for meandering streams is gradually limited, leading to a reduction of the flow length as the resolution making coarser. The LFP length

exhibits the largest uncertainty in comparison to other geomorphological characteristics. The maximum difference is up to 6%, for 100 m resolution.

- The time of concentration of the Kirpich's formula shows larger deviations from the Giandotti's. This is justified by the sensitivity of the length parameter of the Kirpich's equation.
- As the resolution decreases, the representation of topography by a DEM tends to become smoother. The average slope of the watershed is underestimated, while the average slope of the maximum flow path is kept relatively constant. Quantitative, it is not obvious, how likely is the change of watercourse slope, as both the elevations and the flow length decrease, in coarser models.
- As shown in *Figure 5*, as the resolution becomes coarser, the travel time is underestimated, led to increased estimates of peak discharge. Yet, similarly to model parameters discussed before, it is observed that the effect of spatial resolution becomes smaller, as the runoff depth increases. Hence, the effect of DEM resolution is attenuated when considering low frequency flood events.

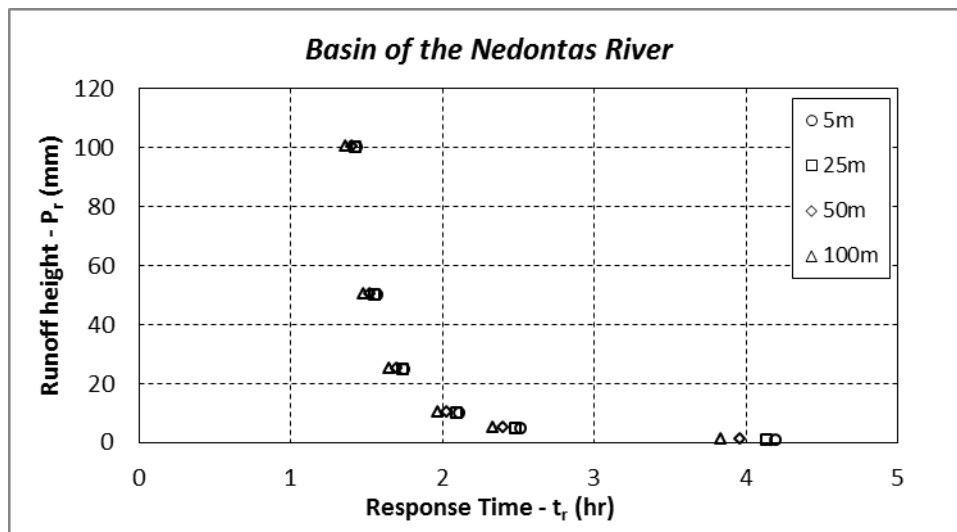


Figure 5. Response time as function of runoff depth for different DEM resolutions, in the river basin of Nedontas.

Conclusions

The developed methodology allows handling the travel time across the longest flow path, which is one of the commonly used definitions for the time of concentration, as a varying parameter, which depends on the effective rainfall (runoff depth) generated over the basin. This provides a novel, physically-consistent approach for all temporal parameters that are associated with t_c , which will radically change significant aspects of hydrological modelling.

The accuracy of results may be enhanced via proper selection of the channel source point and the identification of the flow regime separation, which is crucial point of the methodology. Further improvement may be ensured by accounting for routing effects in low-slope channels, for which the use of the Manning's formula is not valid. Field measurements can also improve several hydraulic assumptions, including section geometry,

roughness coefficient, etc. The longest flow path discretization should be also examined, either in coarser parts, or cell by cell, for the effect on time estimation. Finally, technological progression of GIS tools, for the automatic extraction of the drainage network and DEM pre-processing may be increased quality of DEM data.

Anyway, the sensitivity analysis showed the influence of parameter uncertainty is attenuated, as runoff increases. Particularly, the sensitivity of travel time against the width parameter is rather minor, even for small runoff values. Moreover, although the travel time is slightly affected by the DEM resolution, this effect is not statistically important.

Apparently, the current sample (four basins) is not sufficient for extracting safe statistical conclusions, e.g. by means of establishing regional formulas that account for. However, this study triggers further research on the treatment of the response time of the basin as a varying parameter, which depends on runoff. For this purpose, it is essential to apply the methodology on a sufficient sample of basins, which different geomorphological characteristics.

Key words: *time of concentration; travel time; runoff depth; longest flow path (LFP); rational method; Digital Elevation Model (DEM).*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενική τοποθέτηση

Η περίπλοκη φύση των υδρολογικών μεταβλητών καθιστά τον υδρολογικό σχεδιασμό ενός υδραυλικού έργου μια απαιτητική διαδικασία, η οποία καθοδηγείται από τους στόχους, τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς της εκάστοτε μελέτης διαχείρισης και αξιοποίησης των υδατικών πόρων. Το υπόβαθρο της υδρολογίας είναι έντονα εμπειρικό και αποκαλύπτεται μέσα από την εφαρμογή πρακτικών που είτε ακολουθούν απλοποιημένες προσεγγίσεις, υπό τη θεώρηση ενός μακροσκοπικού πρίσματος, είτε βασίζονται σε αποτελέσματα πειραματικών λεκανών απορροής, οι οποίες επαληθεύονται για δεδομένες υδροκλιματικές και γεωμορφολογικές συνθήκες. Επιπρόσθετος παράγοντας που επιβαρύνει την επίτευξη ενός αξιόπιστου σχεδιασμού είναι η έλλειψη αξιόπιστης μετρητικής πληροφορίας πεδίου, ως δεδομένο βαθμονόμησης και επαλήθευσης των μοντέλων προσομοίωσης. Για τους λόγους αυτούς, τα περιθώρια της προόδου ολοένα και επεκτείνονται, αφενός τεχνολογικά, μέσω της αξιοποίησης των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographical Information System – GIS) και των υδρολογικών και υδραυλικών μοντέλων, και αφετέρου επιστημονικά, μέσω της διαρκούς έρευνας και αναζήτησης βελτιωμένων μεθοδολογιών, που ενσωματώνουν όσο γίνεται ρεαλιστικότερα τις αλληλεπιδρώσεις υδρολογικές συνιστώσες.

Η διακύμανση των μεταβλητών που σχετίζονται με τις διεργασίες του υδρολογικού κύκλου εισάγει ένα πιθανοτικό – στατιστικό πλαίσιο προσέγγισης, σε μια καθορισμένη χωρική και χρονική κλίμακα μελέτης του υδραυλικού έργου. Η χρονική κλίμακα μπορεί να κυμαίνεται από μια λεπτή ανάλυση, λίγων λεπτών έως μερικών ημερών, για την μελέτη καταγίδων και πλημμυρών, έως μια αδρή, μηνιαία ή ετήσια, που χρησιμοποιείται κατά κανόνα σε προβλήματα αξιοποίησης υδατικών πόρων. Συνηθέστερη χωρική μονάδα αποτελεί η λεκάνη απορροής, διαχωρίζοντας την υδρολογική από την υδραυλική ανάλυση, στην οποία η κλίμακα μεταφέρεται στα στοιχεία ενός υδρογραφικού δικτύου ή ενός τμήματος αγωγού.

Βασικότερη υδρολογική μεταβλητή¹ είναι η επιφανειακή απορροή, ως έκφραση της κινητικής και δυναμικής συμπεριφοράς του νερού στην επιφάνεια του εδάφους. Η μελέτη των ακραίων τιμών της είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την διαστασιολόγηση και την ασφάλεια ενός υδραυλικού ή αντιπλημμυρικού έργου, προκειμένου ο σχεδιασμός του να ανταποκρίνεται σε δυσμενείς συνθήκες. Προς αποφυγή των δυνητικών επιπτώσεων μιας πιθανής αστοχίας του έργου και υπό μια στατιστική σκοπιά, εισάγεται η έννοια της παροχής σχεδιασμού, δηλαδή μιας πλημμύρας σχεδιασμού συγκεκριμένης περιόδου επαναφοράς², T , όπου η υπέρβαση της οδηγεί σε αστοχία του έργου. Ουσιαστικά, η αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης και εξασφάλισης της ασφάλειας, οδηγεί στην υιοθέτηση ενός ανεκτού επιπέδου διακινδύνευσης, που εκφράζεται με όρους πιθανότητας. Επομένως, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην παροχή αιχμής ή παροχή σχεδιασμού, που παράγεται κατά

¹ Στις βασικές υδρολογικές μεταβλητές ανήκουν η απορροή (επιφανειακή και υπόγεια), η κατακρήμνιση, η εξάτμιση, η παρεμπόδιση, η κατακράτηση και η διήθηση.

² Το αντίστροφο της περιόδου επαναφοράς ($1/T$) συνιστά την πιθανότητα υπέρβασης, δηλαδή την ετήσια πιθανότητα αστοχίας του έργου.

την διάρκεια εξέλιξης ενός πλημμυρικού επεισοδίου, βάσει μιας καταγίδας σχεδιασμού. Η εκτίμηση αυτής της πλημμυρικής παροχής συνιστά τον υδρολογικό σχεδιασμό, τον οποίο έπεται η υδραυλική ανάλυση που μελετά τα χαρακτηριστικά της ροής κατά μήκος ενός αγωγού ή δικτύου αγωγών και, σε ειδικές περιπτώσεις, ενός πλημμυρικού πεδίου που κατακλύζεται εκατέρωθέν του.

Κρίσιμη χρονική παράμετρος στον υδρολογικό σχεδιασμό είναι ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής, ο οποίος αποτελεί δεδομένο εισόδου σε υδρολογικά μοντέλα προσομοίωσης και εμπειρικές μεθόδους εκτίμησης της παροχής σχεδιασμού. Λανθασμένη εκτίμηση του χρονικού αυτού μεγέθους οδηγεί σε μη αντιπροσωπευτική τιμή της παροχής αιχμής, επιφέροντας συνέπειες στην εκπλήρωση ενός ορθού υδρολογικού σχεδιασμού του έργου. Ειδικότερα, υποεκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης συνεπάγεται υπερεκτίμηση της παροχής, κατευθύνοντας τον σχεδιασμό σε μια πιο αντιοικονομική υιοθέτηση επιλογών. Επομένως, αναδεικνύεται η σπουδαιότητα της χρονικής αυτής παραμέτρου, της οποίας η ακρίβεια είναι συνυφασμένη με την ακρίβεια της παροχής σχεδιασμού.

Η εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης επιτυγχάνεται μέσα από ημιεμπειρικές μεθόδους, οι οποίες προσδίδουν αβεβαιότητα στην προσδιορισμένη τιμή, εξαιτίας του περιοριστικού πλαισίου εφαρμογής τους. Επιπρόσθετα, ένα ακόμα θεμελιώδες ζήτημα που τίθεται είναι η μεταβλητότητα του χρόνου συγκέντρωσης συναρτήσει της έντασης της βροχής. Ο χρόνος συγκέντρωσης, ως έκφραση της χρονικής απόκρισης της λεκάνης στο γεγονός της βροχής, επιταχύνεται σε επεισόδια βροχής μεγαλύτερης έντασης. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η εκτίμηση του χρονικού αυτού μεγέθους για μια λεκάνη απορροής γίνεται πιο πολύπλοκη λόγω της αντιστρόφως ανάλογης σχέσης του με την ένταση του επεισοδίου της βροχής, και κατ' επέκταση με την περίοδο επαναφοράς της πλημμύρας σχεδιασμού.

1.2. Αντικείμενο και διάρθρωση της εργασίας

Η εξάρτηση του χρόνου συγκέντρωσης από την ένταση της βροχής σε συνδυασμό με τις παγιωμένες μεθοδολογίες προσδιορισμού του, οι οποίες δεν ποσοτικοποιούν την επίδραση αυτή, στρέφουν το ενδιαφέρον στην αναζήτηση νέων μεθοδολογικών εργαλείων υπολογισμού του. Προς την κατεύθυνση αυτή, στην παρούσα εργασία διερευνάται η μεταβλητότητα της χρονικής απόκρισης της λεκάνης σε μεταβαλλόμενα γεγονότα απορροϊκής βροχής και αναπτύσσεται μια ντετερμινιστική μεθοδολογία προσδιορισμού της. Η προσέγγιση ακολουθεί την συλλογιστική του σχεδιασμού αστικών αγωγών ομβρίων και βασίζεται στον υπολογισμό χρόνων ροής τμημάτων κατά μήκος της υδραυλικά μέγιστης διαδρομής ροής³, ως συνάρτηση του ύψους απορροής της βροχής και λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμορφολογικά στοιχεία της λεκάνης.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας πραγματοποιείται σε τέσσερις λεκάνες απορροής, στις οποίες για μεταβλητά ύψη απορροής της βροχής υπολογίζεται μια χρονική παράμετρος της λεκάνης, ενδεικτική του χρόνου υδρολογικής της απόκρισης. Η μεταβλητότητα της

³ Η μεγαλύτερη διαδρομή ροής στην λεκάνη που διαμορφώνεται κατά μήκος της διεύθυνσης ροής.

χρονικής παραμέτρου συναρτήσει της περισσειας⁴ βροχής αναδεικνύει μια συσχέτιση των δυο αυτών μεγεθών, που εκφράζεται μέσα από μια σχέση δύναμης. Στο πλαίσιο διερεύνησης της ακρίβειας της μεθοδολογίας, πραγματοποιείται μια ανάλυση ευαισθησίας, ως προς ορισμένες παραμέτρους εισόδου της και ως προς την χωρική ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου υψομέτρου, ΨΜΥ (Digital Elevation Model – DEM), το οποίο αποτελεί το κύριο δεδομένο επεξεργασίας.

Η εργασία διαρθρώνεται σε οκτώ κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου και του παρόντος. Στην συνέχεια έπεται μια σύντομη περιγραφή τους. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένας άξονας σημαντικών θεμάτων της βιβλιογραφικής ανάλυσης, που συνιστά βασικό πυλώνα στην πραγμάτωση της υφιστάμενης μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, διασαφηνίζεται η έννοια του χρόνου συγκέντρωσης, επισυνάπτονται οι μέθοδοι εκτίμησής του και αναδεικνύονται ζητήματα αβεβαιότητας, που αφορούν τον υπολογισμό του. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογική προσέγγιση που αναπτύχθηκε προς επίτευξη του σκοπού της εργασίας, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στα στάδια της γεωμορφομετρικής ανάλυσης του ΨΜΥ, που διεξήχθησαν σε περιβάλλον GIS και τα οποία αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι κάθε υδρολογικής μελέτης. Στο πέμπτο κεφάλαιο σκιαγραφείται το προφίλ των λεκανών απορροής που ερευνήθηκαν. Στο έκτο υλοποιείται η μεθοδολογία μέσω των επιλεγμένων λογισμικών, ενώ διατυπώνονται και τα αποτελέσματα που συνάγονται από την εφαρμογή της. Στο έβδομο κεφάλαιο παρατίθεται η ανάλυση ευαισθησίας, ενώ η εργασία ολοκληρώνεται στο όγδοο κεφάλαιο, με την καταγραφή των συμπερασμάτων, σε σχέση με την διερεύνηση του διεξήχθη στο πλαίσιο της εργασίας, και την επισήμανση ορισμένων προτάσεων που δίνουν το έναυσμα για μελλοντική έρευνα.

⁴ Ύψος επιφανειακής βροχοπτώσεως, δηλαδή δεν λαμβάνονται υπόψη τα υδρολογικά ελλείμματα (απώλειες) της βροχής.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια επισκόπηση της βιβλιογραφίας, που στόχο έχει να καταστεί σαφές το γνωστικό υπόβαθρο που αφορά το αντικείμενο της εργασίας, να εντοπιστούν τρωτά σημεία του και έτσι να αποσαφηνιστούν οι στόχοι της εν λόγω έρευνας. Ο χρόνος συγκέντρωσης αποτελεί σημείο σύνδεσης των επιστημονικών τομέων της υδρολογίας και της γεωμορφομετρίας, καθώς αποτελεί υδρολογικό και γεωμορφομετρικό μέγεθος της λεκάνης απορροής. Στην ενότητα αυτή περιλαμβάνονται οι μέθοδοι προσδιορισμού του χρονικού αυτού μεγέθους, η εφαρμογή των οποίων εγείρει ζητήματα ορθής ερμηνείας αλλά και αβεβαιότητας στην εκτίμησή του.

2.1. Υδρολογικός σχεδιασμός

Ο υδρολογικός σχεδιασμός των αντιπλημμυρικών έργων στηρίζεται στην εκτίμηση της πλημμύρας σχεδιασμού που προκαλείται από την αντίστοιχη καταιγίδα σχεδιασμού, η οποία μεγιστοποιεί την τιμή της και αναφέρεται ως παροχή αιχμής ή παροχή σχεδιασμού. Η πλημμύρα είναι ένα πιθανοτικό φαινόμενο και η παροχή αιχμής της προσδιορίζεται βάσει της επιλογής μιας περιόδου επαναφοράς, τέτοια ώστε η υδρολογική διακινδύνευση, δηλαδή η πιθανότητα αστοχίας κατά την διάρκεια ζωής του έργου, να καλύπτει συγκεκριμένα οικονομικά και τεχνικά κριτήρια, με γνώμονα την ασφάλεια της κατασκευής στον χρονικό ορίζοντα λειτουργίας. Αξιοσημείωτο είναι ότι σε περιπτώσεις μικρής και μεσαίας κλίμακας τεχνικών έργων, της τάξεως των 5 έως 20 ετών περιόδου επαναφοράς, η παροχή αιχμής αποτελεί την μοναδική παράμετρο του σχεδιασμού, υδρολογικού και υδραυλικού, όπως για παράδειγμα σε δευτερεύοντες και τριτεύοντες αγωγούς αποχέτευσης ομβρίων και σε μικρά έργα διευθέτησης χειμμάρων. Ο σχεδιασμός ακολουθεί μια στατιστική – πιθανοτική προσέγγιση, καθώς η δημιουργία πλημμύρας είναι συνυφασμένη με διεργασίες του υδρολογικού κύκλου, που χαρακτηρίζονται ως τυχαίες μεταβλητές. Στην Ελλάδα, η περιορισμένη υδρομετρική πληροφορία, με τη μορφή χρονοσειρών παροχών λεπτής χρονικής διακριτότητας και επαρκούς μήκους, κάνει την στατιστική ανάλυση των παροχών αιχμής μια ιδιαίτερος αβέβαιη διαδικασία. Για τον λόγο αυτό, η συσχέτιση της βροχής με την απορροή γίνεται μέσω διάφορων μεθοδολογιών, από την χρήση απλών εμπειρικών σχέσεων, όπως είναι η ορθολογική μέθοδος, έως την εφαρμογή εξειδικευμένων υδρολογικών μοντέλων προσομοίωσης.

Στην υδρολογία πλημμυρών, εκτός από την χωροχρονική εξέλιξη της πλημμύρας, δίνεται έμφαση στα φυσιογραφικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου, αντίστοιχα, τα οποία επηρεάζουν την απόκρισή της στο επεισόδιο της βροχής. Τα μεγέθη που λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό αφορούν στην παροχή αιχμής, που μεταφράζεται σε αντίστοιχη στάθμη στο υδατόρευμα, τον χρόνο εμφάνισης της και τη διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου και, τέλος, τη συνολική απορροή και κατακλυζόμενη έκταση, λόγω του βάθους και των ταχυτήτων ροής που δημιουργούνται κατά μήκος και εγκάρσια του δικτύου αποστράγγισης.

Βασική χρονική παράμετρος είναι ο χρόνος συγκέντρωσης, που συνδέεται με την παροχή σχεδιασμού και αποτελεί τυπικό δεδομένο εισόδου στα μοντέλα πλημμυρών, καθώς και

στην μέθοδο του μοναδιαίου υδρογραφήματος (MY). Η βάση του υδρογραφήματος σχεδιασμού συνίσταται από τον χρόνο συγκέντρωσης και τη διάρκεια της βροχόπτωσης. Η χρονική αυτή παράμετρος είναι χαρακτηριστική για την λεκάνη, καθώς αποδίδει την ταχύτητα υδρολογικής απόκρισής της στο γεγονός της βροχής. Θεωρητικά, αναφέρεται στην χρονική κλίμακα όπου ολόκληρη η λεκάνη συμβάλλει στην απορροή, δημιουργώντας τον μέγιστο ρυθμό ροής στην έξοδο, γι' αυτό το λόγο θεωρείται κρίσιμη στον καθορισμό της παροχής αιχμής. Σύμφωνα με τους Bondelid *et al.* (1982), το 75% των συνολικών λαθών στην εκτίμηση της παροχής αιχμής μπορούν να προκύψουν από λάθη στην εκτίμηση της χρονικής αυτής παραμέτρου.

2.2. Χρόνος συγκέντρωσης

Ο χρόνος συγκέντρωσης ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το νερό, που ρέει επιφανειακά, από το υδραυλικά, πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης μέχρι την διατομή εξόδου (Dingman, 1994, σελ. 397). Σύμφωνα με τον ορισμό αυτό, ο χρόνος συγκέντρωσης συνδέεται εμπειρικά με την μέγιστη διαδρομή ροής του νερού μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$t_c = L_{max} / \bar{u} \quad (2.1)$$

όπου t_c ο χρόνος συγκέντρωσης, L_{max} η μέγιστη διαδρομή ροής του νερού και \bar{u} η μέση ταχύτητα ροής.

Γενικά, ο χρόνος συγκέντρωσης εξαρτάται από διάφορα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, όπως:

- το σχήμα και η έκταση της
- το μήκος και η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου
- η κλίση και η τραχύτητα του εδάφους
- τα γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου

Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στην χωροχρονική απόκριση της απορροής και ειδικότερα, πιο πυκνό δίκτυο, με μεγάλο μήκος κύριου υδατορεύματος – συχνά μόνιμης ροής – και καλά διαμορφωμένες μισγάγγειες, θα επιταχύνει την αποστράγγιση, μειώνοντας τον χρόνο συγκέντρωσης και αυξάνοντας την απορροή. Ακόμη, προχωρώντας στα κατάντη η ταχύτητα ροής αυξάνεται και μπορεί να ενισχυθεί σημαντικά σε περιπτώσεις μείωσης της τραχύτητας του υδατορεύματος, λόγω για παράδειγμα επένδυσης της διατομής, διευκολύνοντας την διαδικασία μεταφοράς του νερού και μειώνοντας τον χρόνο. Το ανάγλυφο μπορεί να επιταχύνει σημαντικά την απόκριση, όταν είναι απότομο, με έντονες κλίσεις και μειωμένη τραχύτητα εδάφους, με αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου και την αύξηση της παροχής. Αντίθετα, ένα ανάγλυφο ήπιων κλίσεων, που για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα εκθέτει την απορροή στις διεργασίες διήθησης και εξάτμισης, μειώνει την παροχή αιχμής του υδρογραφήματος εξόδου. Ακόμη, το σχήμα της λεκάνης και η έκτασή της καθορίζουν την απορροή, καθώς σε κυκλικό

σχήματος λεκάνη μικρής έκτασης, ο χρόνος συγκέντρωσης του όγκου στα κατάντη μπορεί να μειωθεί σημαντικά.

Ωστόσο, όλα αυτά τα χαρακτηριστικά αντιμετωπίζονται ως δείκτες των φυσικών διεργασιών κατά την απορροή και θα πρέπει να μελετώνται υπό την θεώρηση ενός ύψους βροχής που αποτελεί και τον σημαντικότερο παράγοντα στον σχεδιασμό. Για παράδειγμα, σε μικρές λεκάνες, το ύψος απορροής ως δεδομένο εισόδου είναι ιδιαίτερος σημαντικό, σε αντίθεση με μεγάλες λεκάνες, όπου η αποθηκευτικότητα καθορίζει σε σημαντικό βαθμό το χρόνο απόκρισης (McCuen, 2005).

2.3. Μέθοδοι εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης

Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες μέθοδοι εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης, οι οποίες διακρίνονται σε:

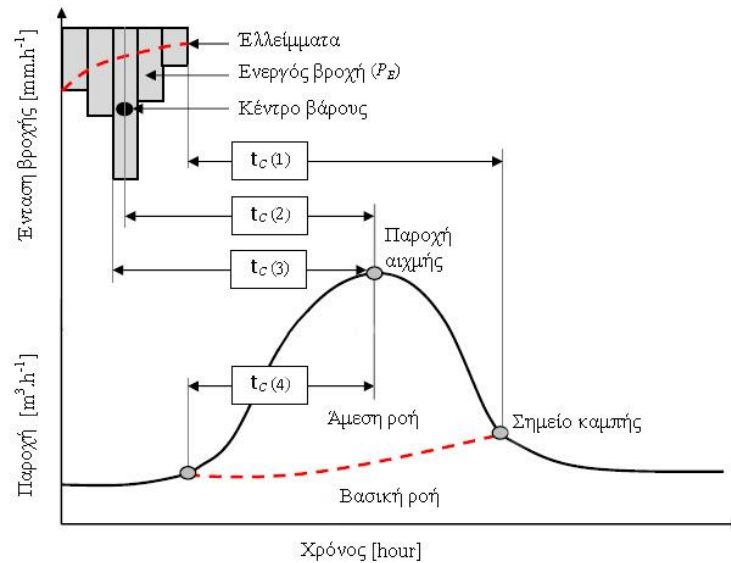
- εμπειρικές συγκεντρωτικές, που λαμβάνουν υπόψη τα γεωμετρικά μεγέθη της λεκάνης,
- γραφικές, που προϋποθέτουν την ύπαρξη δεδομένων βροχής και απορροής, και
- κατανεμημένα μοντέλα, υλοποιημένα κυρίως σε περιβάλλον GIS.

Στην συνέχεια γίνεται μια αναλυτική περιγραφή των μεθόδων.

2.3.1. Γραφικές μέθοδοι εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης

Σύμφωνα με τον McCuen (2009), υπάρχουν έξι διαφορετικά χρονικά μεγέθη που σχετίζονται με τον ορισμό του χρόνου συγκέντρωσης, όταν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα βροχής και απορροής. Επομένως, γραφικά, μέσω της ερμηνείας των παρατηρημένων υετογραφήματων και υδρογραφήματων, μπορούν να δοθούν οι εξής ορισμοί του χρόνου συγκέντρωσης (*Εικόνα 2.1*):

1. Το χρονικό διάστημα από το πέρας της ενεργού βροχής έως το σημείο καμπής του ολικού υδρογραφήματος – t_c (1).
2. Το χρονικό διάστημα από το κέντρο βάρους της ενεργού βροχής έως την αιχμή του ολικού υδρογραφήματος – t_c (2) (χρόνος υστέρησης).
3. Το χρονικό διάστημα από το μέγιστο της έντασης της βροχής μέχρι την παροχή αιχμής – t_c (3).
4. Το χρονικό διάστημα από την έναρξη της συνολικής απορροής μέχρι την αιχμή του ολικού υδρογραφήματος – t_c (4) (χρόνος ανόδου).
5. Το χρονικό διάστημα από το κέντρο βάρους της ενεργού βροχής έως την παροχή αιχμής της άμεσης απορροής.
6. Το χρονικό διάστημα από το κέντρο βάρους της ενεργού βροχής έως το κέντρο βάρους του υδρογραφήματος της άμεσης απορροής (κεντροβαρικός χρόνος υστέρησης).



Εικόνα 2.1. Σχηματική απεικόνιση βασικών χρονικών μεγεθών σε ένα πλημμυρικό επεισόδιο.

Ωστόσο, κατά τον Grimaldi *et al.* (2012), ο δεύτερος ορισμός ταυτίζεται με τον χρόνο υστέρησης, του οποίου η έννοια αντανάκλα την αποθηκευτική ικανότητα της λεκάνης και είναι θεμελιωδώς διαφορετική από τον χρόνο συγκέντρωσης. Ο χρόνος υστέρησης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης (αναλογία χρόνων διαδρομής του νερού), αλλά και από την μορφή του υετογραφήματος (διάρκεια, ένταση, ομοιομορφία βροχής), και για τον λόγο αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί αναλλοίωτη σταθερά της λεκάνης. Όμοια, και ο χρόνος της καμπύλης ανόδου συνδέεται με τα χαρακτηριστικά της βροχής, σε αντίθεση με την καμπύλη καθόδου, που ερμηνεύει την αποφόρτιση του νερού και είναι ανεξάρτητη της διηθητικότητας και της έντασης της βροχής, αλλά εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κοίτης των υδατορευμάτων.

Ένα κρίσιμο ερώτημα που τίθεται είναι το πώς κάθε μια από αυτές τις ερμηνείες του ορισμού συμφωνούν με τον χρόνο συγκέντρωσης που υπολογίζεται συμβατικά, χρησιμοποιώντας την μέγιστη υδραυλικά διαδρομή ροής.

Γενικότερα, οι διαφορές της τραχύτητας, του βάθους ροής και της κλίσης στα τμήματα της λεκάνης κάνουν τον χρόνο απόκρισης της να διαφέρει συνολικά από τον υπολογιζόμενο χρόνο, κατά μήκος της μέγιστης υδραυλικά διαδρομής ροής. Ειδικότερα, ο χρόνος απόκρισης που βασίζεται στην μέγιστη διαδρομή ροής αναμένεται να είναι συντομότερος από τον χρόνο απόκρισης ολόκληρης της λεκάνης, με αποτέλεσμα η χρήση του να οδηγεί σε αυξημένη εκτίμηση της παροχής σχεδιασμού. Αυτό συμβαίνει επειδή η αποθηκευτικότητα στην επιφάνεια της λεκάνης προκαλεί μεγαλύτερη επιβράδυνση του χρόνου απόκρισης σε σχέση με την αποθηκευτικότητα του υδατορεύματος. Αυτή η πιθανή «προκατάληψη» στον υπολογισμό αυτού του χρόνου απόκρισης διερευνήθηκε από τον McCuen (2009), που σύγκρινε σε 27 λεκάνες τις χρονικές μεταβλητές μετρήσιμων δεδομένων βροχής – απορροής με τον χρόνο συγκέντρωσης που υπολογίζεται από την μέθοδο κινηματικού κύματος (velocity method).

Στην έρευνα του, ο «παραδοσιακός» γραφικός ορισμός του χρόνου συγκέντρωσης, δηλαδή ο χρόνος από το πέρας της ενεργού βροχόπτωσης έως την καμπή του υδρογραφήματος άμεσης απορροής, προέκυψε εξαιρετικά αβέβαιος στον καθορισμό. Ωστόσο, χρησιμοποιείται ως ένδειξη του χρόνου απόκρισης, καθώς η λεκάνη είναι πιθανώς κορεσμένη στο τέλος της βροχής. Ο χρόνος μέχρι το σημείο καμπής είναι μια υποκειμενική μεταβλητή και έχει, συνεπώς, μια πολύ ευρεία κατανομή. Επιπλέον, η εκτίμηση του χρόνου βάσει αυτού του ορισμού δεν σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό είτε με την αιχμή της έντασης της βροχής είτε με την αιχμή της απορροής και το γεγονός αυτό τον καθιστά μη αντιπροσωπευτικό λόγω της κρισιμότητας την παροχής αιχμής στον σχεδιασμό. Έτσι, οι μεταβλητές του χρόνου που σχετίζονται με τις αιχμές ενδεχομένως είναι καταλληλότερες. Στις περιπτώσεις δε που ο όγκος της πλημμύρας είναι καθοριστικής σημασίας στο σχεδιασμό, οι μεταβλητές του χρόνου που συνδέονται με τα κέντρα βάρους της βροχής και της απορροής αποτελούν καλύτερες ενδείξεις του χρόνου απόκρισης, καθώς έχουν πιθανόν πιο σταθερές τιμές, καθώς το κέντρο βάρους υποδηλώνει μια μέση τιμή. Έτσι διαφορετικός σκοπός σχεδιασμού μπορεί να οδηγήσει σε μια διαφορετική επιλογή της μεθόδου εκτίμησης του χρόνου απόκρισης. Σύμφωνα με τον McCuen (2009), το χρονικό διάστημα από το κέντρο βάρους της ενεργού βροχόπτωσης έως το κέντρο βάρους του υδρογραφήματος άμεσης απορροής (χρόνος υστέρησης) βρέθηκε να είναι η λιγότερο αβέβαιη χρονική μεταβλητή σε σχέση με τις άλλες, και να υπολογίζει μεγαλύτερους χρόνους από αυτούς της κινηματικής μεθόδου, λόγω της αποθηκευτικότητας της λεκάνης. Βάσει των αποτελεσμάτων του McCuen (2009), η υποεκτίμηση του χρόνου της κινηματικής μεθόδου εντοπίζεται σε ένα ποσοστό της τάξης του 50%. Για τον λόγο αυτό, προτείνει την εφαρμογή ενός συντελεστή προσαρμογής στον χρόνο απόκρισης που υπολογίζεται κατά μήκος της μέγιστης υδραυλικά διαδρομής ροής, προκειμένου να αντιμετωπιστούν αδυναμίες κατά τον υπολογισμό του.

2.3.2. Εμπειρικές μέθοδοι εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης

Λόγω της έλλειψης δεδομένων και της πολυπλοκότητας προσδιορισμού του χρόνου συγκέντρωσης, έχουν προταθεί απλές εμπειρικές σχέσεις εκτίμησής του συναρτήσει βασικών μεγεθών της λεκάνης (κλίση, εμβადόν, υψόμετρα, κ.τ.λ.). Στην συνέχεια, γίνεται μια σύντομη αναφορά σε επιλεγμένες εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης, με ευρεία εφαρμογή στον ελληνικό χώρο, εξαιτίας της περιορισμένης απαιτούμενης πληροφορίας.

Η πλέον διαδεδομένη σχέση στην ελληνική πρακτική, η οποία συστήνεται από τις προδιαγραφές των υδραυλικών έργων (ΠΔ 696,1974), είναι η σχέση του Giandotti (1934):

$$t_c = \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1,5 \cdot L}{0,8 \cdot \sqrt{\Delta H}} \quad (2.2)$$

όπου t_c ο χρόνος συγκέντρωσης (h), A η επιφάνεια της λεκάνης (km^2), L το μήκος της κύριας μισγάγγειας (m) και ΔH η διαφορά του μέσου υψομέτρου της λεκάνης από το υψόμετρο εξόδου της (m).

Η σχέση του Giandotti προέκυψε από 12 αγροτικές λεκάνες απορροής της κεντρικής και βόρειας Ιταλίας, έκτασης 170-70.000 km^2 . Ωστόσο δεν είναι απολύτως γνωστός ο αριθμός

και η φύση των επεισοδίων βροχής που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του εμπειρικού μοντέλου.

Μια ακόμη σχέση που βρίσκει εφαρμογή είναι αυτή του Kirpich, η οποία αναπτύχθηκε από την Αμερικανική Soil Conservation Service (SCS) το 1940 και στηρίχθηκε σε δεδομένα από τις περιοχές Tennessee και Pennsylvania των ΗΠΑ, μικρών αγροτικών λεκανών έκτασης από 0,5 έως 45 ha, με απότομες κλίσεις 3-10%, φυτοκάλυψη 0-56% και με καλά σχηματισμένο υδρογραφικό δίκτυο. Για αστικές λεκάνες, με επιφάνειες ασφαλικές ή από σκυρόδεμα, η τιμή του χρόνου διορθώνεται με μια μείωση κατά 40%. Η σχέση του Kirpich (1940) είναι η ακόλουθη:

$$t_c = 0,0667 \cdot L^{0,77} / S^{0,385} \quad (2.3)$$

όπου t_c ο χρόνος συγκέντρωσης (h), L το μήκος της κύριας μισγάγγειας (km) και S η μέση κλίση (m/m), λαμβάνοντας υπόψη την υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο πιο ψηλό σημείο της λεκάνης και την έξοδο της.

Η σχέση του Kirpich υπολογίζει σημαντικά βραχύτερους χρόνους συγκέντρωσης από την σχέση του Giandotti (Daniil & Lazaridis, 2005). Το γεγονός αυτό δικαιολογείται εν μέρει από την επιλογή της παραμέτρου της κλίσης, η οποία αντανακλά την ορμή της απορροής. Πιο συγκεκριμένα, στην σχέση του Kirpich, η μέση κλίση της λεκάνης προκύπτει από το μέγιστο υψόμετρο της έως την έξοδο – αποδίδοντας πιο απότομο ανάγλυφο – σε αντίθεση με την σχέση του Giandotti που λαμβάνει υπόψη την επίδραση του ανάγλυφου από το μέσο υψόμετρο.

Τέλος, για λόγους πληρότητας αναφέρεται και η σχέση της SCS (1973), η οποία θεωρείται κατάλληλη για μικρές αστικές λεκάνες κάτω των 8 km² και εκτιμάται ως εξής:

$$t_c = 0,057 \cdot L^{0,8} (1000 / CN - 9)^{0,70} / S^{1/2} \quad (2.4)$$

όπου t_c ο χρόνος συγκέντρωσης (h), L το μήκος της κύριας μισγάγγειας (km) και S η μέση κλίση (m/m), και CN ο αριθμός καμπύλης απορροής. Η SCS κάνει την υπόθεση ότι ο χρόνος υστέρησης είναι το 60% του χρόνου συγκέντρωσης ($t_L = 0,6 \cdot t_c$).

2.3.3. Η μέθοδος της Natural Resources Conservation Service (NRCS, 1986)

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζεται σε σχετική Τεχνική Έκθεση (Technical Release, TR-55) της Natural Resources Conservation Service (1986) και αποτελεί ένα καταναμημένο μοντέλο εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης, σε αντίθεση με το συγκεντρωμένο μοντέλο που υιοθετείται στις εμπειρικές μεθόδους. Η δομή της εμπεριέχει μια συνεπή υδραυλική βάση και μέσα από έρευνες των Fang *et al.* (2007) και McCuen (1984) παρουσιάζεται κατάλληλη για εφαρμογή σε αστικές και μη αστικές λεκάνες, λόγω των μικρών αποκλίσεων ανάμεσα στον χρόνο που προσδιορίζεται από δεδομένα βροχής – απορροής και σε εκείνον που υπολογίζεται από την μέθοδο. Η ανάλυση TR-55 θεωρεί τρεις βασικούς τύπους ροής κατά μήκος της μέγιστης διαδρομής ροής:

- κατανεμημένη επίγεια ροή ή ροή σε φιλμ (sheet flow),
- συγκεντρωμένη επίγεια ροή (shallow concentrated flow), και
- ροή στο κυρίως υδατόρευμα (channel flow).

Στη συνέχεια, υπολογίζει τον συνολικό χρόνο αθροίζοντας τους επιμέρους χρόνους ταξιδιού των διαδοχικών συνιστωσών του συστήματος αποστράγγισης και μεταφοράς των υδάτων. Η επιλογή των παραμέτρων για προσδιορισμό των τριών καθεστώτων ροής εμπλέκει σε μεγάλο βαθμό την κρίση και την εμπειρία του μελετητή μηχανικού. Οι δύο πρώτοι τύποι ροής εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την κλίση, την κάλυψη γης, το μήκος, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, την αποθήκευση του νερού λόγω ύπαρξης βυθισμάτων και τις προγενέστερες συνθήκες βροχόπτωσης, ενώ η ροή στο υδατόρευμα είναι συνάρτηση των υδραυλικών ιδιοτήτων του υδατορεύματος. Η μέθοδος έχει λογική πρακτική, με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης με έντονη κατακράτηση που να επιβραδύνουν σημαντικά την απορροή στην λεκάνη (π.χ. κοιλάτητες, καρστικά πετρώματα).

Κατανεμημένη επίγεια ροή ή ροή σε φιλμ (Sheet flow)

Σύμφωνα με την NRCS (1986), λίγο μετά την έναρξη του επεισοδίου βροχής, η ροή στο ανάντη τμήμα της λεκάνης είναι δισδιάστατη, μη διαμορφωμένη, χωρίς σαφή όρια και παρατηρείται σε επίπεδο έδαφος, για μικρά μήκη διαδρομής ροής, με μέγιστη τάξη τα 30 m (~100 ft). Το είδος αυτό της ροής αναφέρεται ως *κατανεμημένη επίγεια ροή* ή *ροή σε φιλμ* (sheet flow) και χαρακτηρίζεται από αρκετά αργή ταχύτητα σε σχέση με αυτή των κατάντη τμημάτων. Ο υπολογισμός αυτής της συνιστώσας ροής έχει νόημα σε μικρές λεκάνες, ενώ σε περίπτωση που το μήκος της ροής σε φιλμ υπερβαίνει το όριο των 30 m, το τμήμα αυτό προστίθενται στα κατάντη τμήματα των άλλων τύπων ροής.

Ο πιο ορθός τρόπος εκτίμησης του μήκους ροής σε φιλμ είναι μέσω επιτόπιας έρευνας στη λεκάνη απορροής. Συγκεντρωμένη καταγραφή των μελετών καθορισμού του μήκους της ροής σε φιλμ γίνεται από τον Merkel (2001). Η εξαγωγή ενός και μόνο μήκους ροής σε φιλμ είναι ανέφικτη, καθώς η πλειονότητα των μελετών (Ree *et al.*, 1977· Engman, 1986· Woodward & Welle, 1986· McCuen & Spiess, 1995) στηρίχθηκε στο τι είναι ρεαλιστικό στο πεδίο για συγκεκριμένες συνθήκες και καθόρισε το μήκος, θέτοντας ως κριτήριο το βάθος ροής, δηλαδή ορίζοντας το σημείο όπου παύει να ισχύει η ροή σε φιλμ και το βάθος ροής γίνεται μεγαλύτερο από μια δεδομένη τιμή. Ουσιαστικά, το βάθος ροής (συνήθως μικρότερο των 3 cm) αποτελεί το κριτήριο για την μετάβαση από την ροή σε φιλμ στην συγκεντρωμένη επίγεια. Σε μια επισκόπηση της σχετικής με το ζήτημα βιβλιογραφίας, επισημαίνεται ότι σε ομαλή, ομοιόμορφη επιφάνεια π.χ. σε αστικές λεκάνες, αναμένονται μεγαλύτερα μήκη ροής, σε αντίθεση με το δασικό περιβάλλον όπου αυξάνεται η τραχύτητα. Επιπλέον, αύξηση της κλίσης και της έντασης βροχής δημιουργεί μείωση του μήκους, ενώ σε υψηλής διηθητικότητας εδάφη και σε περιπτώσεις ύπαρξης πολλών βυθισμάτων (κατακράτηση νερού), το μήκος διαδρομής αναμένεται να μικρύνει.

Σύμφωνα με την μέθοδο NRCS (1986), ο χρόνος ταξιδιού υπολογίζεται με τη χρήση της κινηματικής εξίσωσης κύματος, στηριζόμενη στην εξίσωση Manning, με την υπόθεση ότι η

υδραυλική ακτίνα R είναι το γινόμενο της έντασης της βροχής i και του χρόνου ταξιδιού, t_{travel} (Overton & Meadows, 1976):

$$t_{\text{sheet}} = \frac{0.091 \cdot (n \cdot L_{\text{sheet}})^{0.8}}{P_2^{0.5} \cdot S^{0.4}} \quad (2.5)$$

όπου t_{sheet} ο χρόνος ταξιδιού της ροής σε φιλμ (s), L_{sheet} το μήκος της ροής σε φιλμ (m), S η μέση κλίση (m/m), n ο συντελεστής τραχύτητας εδάφους και P_2 η βροχόπτωση διάρκειας 24 h και περιόδου επαναφοράς 2 έτη (mm).

Η σχέση θεωρεί τις ακόλουθες υποθέσεις εφαρμογής:

- ρηχή, σταθερή, ομοιόμορφη ροή
- σταθερή ένταση της ενεργού βροχής, χωρικά και χρονικά
- διάρκεια βροχής 24 hr (λόγω της διαθεσιμότητας των ημερήσιων στοιχείων βροχόπτωσης) και περίοδος επαναφοράς $T=2$ έτη (σημειώνεται ότι σε μια πιο λεπτομερή μελέτη δεν θα πρέπει να αγνοηθεί το ζήτημα της χωρικής και χρονικής ανομοιογένειας της βροχής και η συχνότητα εμφάνισης του φαινομένου της πλημμύρας)
- ασήμαντη επίδραση της διήθησης στο χρόνο ταξιδιού

Ως πιο ευαίσθητη συνιστώσα της σχέσης παρουσιάζεται η τραχύτητα του εδάφους, η οποία σχετίζεται με το πόσο ομοιόμορφη είναι η υφή της επιφάνειας. Οι τιμές της δίνονται στον **Πίνακα 2.1**, για συγκεκριμένες επιφάνειες, υπό την θεώρηση ενός ύψους βροχής περίπου 3 cm ή λιγότερο, και προκύπτουν από την μελέτη του Engman (1986).

Πίνακας 2.1. Συντελεστές τραχύτητας εδάφους για ροή σε φιλμ (Πηγή: TR-55).

| Περιγραφή επιφάνειας | Συντελεστής τραχύτητας εδάφους |
|--|--------------------------------|
| Λείες επιφάνειες (τσιμέντο, άσφαλτος, χαλίκι) | 0,011 |
| Ακαλλιέργητη ή χέρσα έκταση ή επιφάνεια χαλαρών εδαφών | 0,05 |
| Καλλιεργημένο έδαφος (χαμηλή-πυκνή κάλυψη) | 0,06-0,17 |
| Ποώδης βλάστηση (χαμηλή-πυκνή) | 0,15-0,41 |
| Βοσκοτόπι | 0,13 |
| Δάσος με αραιή θαμνώδη βλάστηση | 0,4 |
| Δάσος με πυκνή θαμνώδη βλάστηση | 0,8 |

Συγκεντρωμένη επίγεια ροή (Shallow concentrated flow)

Μετά από κάποια απόσταση, λόγω της τοπογραφίας η ροή αρχίζει να συγκλίνει σε στοιχειώδεις διαμορφωμένες υδάτινες διαδρομές (π.χ. ρέματα, χαράδρες), διαμορφώνοντας την *συγκεντρωμένη επίγεια ροή* (shallow concentrated flow). Η εμπειρική σχέση της NRCS (1986), για τον υπολογισμό της ταχύτητας, σε αυτό τον τύπο ροής, βασίζεται στην εξίσωση Manning, με την υπόθεση ότι η υδραυλική ακτίνα είναι ίση με το βάθος της ροής, το οποίο

κυμαίνεται μεταξύ 3-15 cm, για ρηχή κατανεμημένη ροή και ευρεία ορθογωνική διατομή. Η σχέση που εφαρμόζεται είναι η εξής:

$$V_{shallow} = k \cdot \sqrt{S} \quad (2.6)$$

όπου $V_{shallow}$ η ταχύτητα επίγειας ροής (m/s), k ο συντελεστής παρεμπόδισης (m/s) και S η μέση κλίση της λεκάνης (m/m).

Ο χρόνος της συγκεντρωμένης επίγειας ροής υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$t_{shallow} = \frac{L_{shallow}}{V_{shallow}} = \frac{L_{shallow}}{k\sqrt{S}} \quad (2.7)$$

όπου $t_{shallow}$ ο χρόνος επίγειας ροής (s), $L_{shallow}$ το μήκος της επίγειας διαδρομής του νερού (m), $V_{shallow}$ η ταχύτητα επίγειας συγκεντρωμένης ροής, k ο συντελεστής παρεμπόδισης που εκφράζεται με όρους ταχύτητας (m/s) και S η μέση κλίση της επιφάνειας (m/m).

Για να αποφεύγεται η υπερεκτίμηση της ταχύτητας, για $S > 0,04$ η κλίση στο φατνίο προσαρμόζεται με βάση της εμπειρική σχέση αναγωγής:

$$S' = 0,05247 + 0,06363 \cdot S - 0,182 \cdot e^{-62,38 \cdot S} \quad (2.8)$$

Η διόρθωση αυτή επιδιώκεται γιατί για κλίση μεγαλύτερη από 4%, το προφίλ της ταχύτητας γίνεται πιο πολύπλοκο και η ταχύτητα έχει την τάση να υπερεκτιμάται.

Όσον αφορά τον συντελεστή παρεμπόδισης k (m/s), είναι μια παράμετρος που εξαρτάται από τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Η επιλογή των τιμών του στηρίζεται σε τυπικές τιμές της βιβλιογραφίας (**Πίνακας 2.2**), οι οποίες προτείνονται από τους Haan *et al.* (1994) και McCuen (1998), κάνοντας κάποιες παραδοχές για το βάθος ροής και την τραχύτητα. Στην βιβλιογραφία, συχνά δίνεται ένα μεγάλο εύρος τιμών της παραμέτρου αυτής για την επίγεια ροή, γεγονός που αντανάκλα την αβεβαιότητα προσδιορισμού της. Αυξημένη τραχύτητα καθυστερεί την απορροή, αυξάνοντας το δυναμικό της διήθησης σε διαπερατές επιφάνειες και μειώνοντας την διαδικασία διάβρωσης.

Πίνακας 2.2. Τιμές συντελεστή παρεμπόδισης k επίγειας ροής (Haan *et al.*, 1994· McCuen, 2008).

| Κάλυψη γης | k (m/s) | Εύρος τιμών |
|--|-----------|--|
| Δασική έκταση με ελαφριά εδαφική κάλυψη | 1,55 | Κατά Haan <i>et al.</i> 1994 |
| Δασική έκταση με πυκνή εδαφική κάλυψη | 0,76 | Κατά Haan <i>et al.</i> 1994 |
| Βοσκοτόπι με χαμηλή βλάστηση | 2,13 | Κατά Haan <i>et al.</i> 1994 & McCuen 1998 |
| Αγροτικές εκτάσεις σε αγραναύπαση ή με ελάχιστο όργωμα ή με εγκάρσιο όργωμα | 1,46 | 1,37-1,55 |
| Καλλιέργειες οργωμένες κατά μήκος της ροής | 2,75 | 2,72-2,77 |
| Σχεδόν γυμνό έδαφος | 3,07 | 3,05-3,08 |
| Στενό ρέμα σε ανάντη έκταση | 6,68 | 6,19-7,16 |
| Υδατόρευμα με βλάστηση | 4,85 | 4,91-4,79 |
| Αλλουβιακές αποθέσεις | 3,11 | 3,08-3,14 |
| Τεχνητές επιφάνειες (αεροδρόμιο, πλατείες, χώροι στάθμευσης, προβλήτες, εξωτερικές σκάλες) | 6,3 | 6,22-6,34 |
| Τεχνητές ρύσεις / Υδρορροές για αποστράγγιση ομβρίων | 14,11 | Κατά McCuen 1998 |

Ροή στο κυρίως υδατόρευμα ή σε κανάλι (channel flow)

Αυτός ο τύπος της ροής ξεκινά εκεί όπου είναι καλά καθορισμένη η διατομή του υδατορεύματος, ή όπου δηλώνεται ως ποτάμι στον χάρτη ή είναι ορατό από αεροφωτογραφίες. Η ταχύτητα προσδιορίζεται μέσω της εξίσωσης Manning, από την παρακάτω σχέση:

$$V_{channel} = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad (2.9)$$

όπου $V_{channel}$ η ταχύτητα ροής στο υδατόρευμα (m/s), n ο συντελεστής τραχύτητας Manning ($s/m^{-1/3}$), R η υδραυλική ακτίνα (m), J η κλίση του υδατορεύματος (m/m). Ο καθορισμός της υδραυλικής ακτίνας βασίζεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κοίτης, όπως αυτά διαμορφώνονται για περίοδο επαναφοράς 2 έτη.

Επομένως, ο χρόνος ταξιδιού στο υδατόρευμα προσδιορίζεται ως εξής:

$$t_{channel} = \frac{L_{channel}}{V_{channel}} \quad (2.10)$$

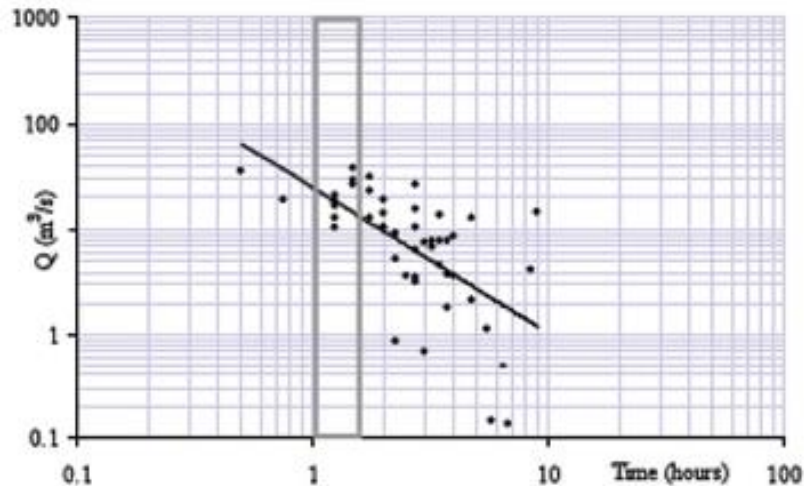
όπου $t_{channel}$ ο χρόνος ροής (s), και $L_{channel}$ και $V_{channel}$ το μήκος (m) και η ταχύτητα ροής (m/s) του υδατορεύματος, αντίστοιχα.

Όσον αφορά τον προσδιορισμό της κλίσης του υδατορεύματος, αναφέρεται ότι υπάρχουν διάφορες μέθοδοι υπολογισμού, όπως η θεώρηση της ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των κλίσεων στα τμήματα κατά μήκος της διαδρομής ροής (αποτέλεσμα, όμοιο με τον υπολογισμό της από το πρώτο και το τελευταίο σημείο της γραμμής) ή η μέθοδος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (Natural Environmental Research Council – NERC, 1975), που χρησιμοποιεί την κλίση που ορίζεται από τα σημεία στο 10% και 85% του μήκους της κοίτης, για τον υπολογισμό του χρόνου εμφάνισης της παροχής αιχμής.

Ο καθορισμός της διατομής του υδατορεύματος είναι ένα πολύ σημαντικό δεδομένο εισόδου κατά την ανάλυση και τον σχεδιασμό και ο ορθός προσδιορισμός του μπορεί να πραγματοποιηθεί με αναγνώριση της κοίτης και με απόκτηση πληροφορίας πεδίου (τραχύτητα, κλίση, βρεγμένη περίμετρος και εμβαδόν διατομής). Σε μια μακροσκοπική κλίμακα αναγνώρισης της λεκάνης, αναμένεται τα ανάντη ρέματα να διαμορφώνονται από μια πιο τριγωνικού σχήματος διατομή, ενώ προχωρώντας προς τα κατάντη, όπου μεγαλύτερη έκταση αποστραγγίζεται στο ρέμα και η τοπογραφία είναι πιο πεδινή, η διατομή έχει την τάση να μεταβάλλεται σε μια πιο ορθογωνική ή τραπεζοειδή γεωμετρία. Ωστόσο, η διατομή μεταβάλλεται και στο επεισόδιο της πλημμύρας, λόγω αστάθειας των πρηνών, διαδικασιών διάβρωσης και εναπόθεσης υλικού, ανάπτυξης πλημμυρικής κοίτης και ύπαρξης κάποιου τεχνικού έργου (π.χ. γέφυρα – λόγω βάθρων). Θεωρώντας σχετικά σταθερές κλιματικές συνθήκες και σταθερή κάλυψη γης, ένα σύστημα ρεμάτων θα αναπτύξει μια ισορροπία ανάμεσα στις απορροές του και στο μέγεθος του καναλιού, ώστε το υδατόρευμα να είναι αρκετά μεγάλο για να παροχετεύει το νερό, κάτω από τις περισσότερες συνθήκες ροής (bankfull flow conditions). Όταν η ροή είναι μεγαλύτερη από την χωρητικότητά του, το ρέμα υπερχειλίζει και δημιουργείται η πλημμυρική κοίτη. Σύμφωνα με την TR-55, ο υπολογισμός του χρόνου συγκέντρωσης βασίζεται στην παροχή περιόδου επαναφοράς $T=2$ ετών (μέσα σε ένα συνιστώμενο εύρος $T=1,5$ ως 3 έτη), θεωρώντας ότι αυτός ο χρόνος ταξιδιού είναι αντιπροσωπευτικός σε συνθήκες ροής ενός ευρέος φάσματος παροχών. Η θεώρηση αυτή είναι σύμφωνη και με άλλες έρευνες, όπως του Kent (1972), ο οποίος προτείνει την παροχή περιόδου επαναφοράς 2 ετών, θεωρώντας ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των υδραυλικών παραμέτρων της κοίτης και εάν αυτό δεν είναι εφικτό, συστήνει την χρήση μιας παροχής, για χαμηλή ροή στο κανάλι.

2.4. Αβεβαιότητες μεθόδων εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης

Η πληθώρα των μεθόδων προσδιορισμού του χρόνου συγκέντρωσης επιφέρει σημαντική μεταβλητότητα στις εκτιμώμενες τιμές του. Κάθε μέθοδος προσδίδει αβεβαιότητα στην εκτίμηση, καθώς στηρίζεται σε υποθέσεις και περιλαμβάνει σφάλματα και περιορισμούς. Ακόμη, παρότι ο χρόνος συγκέντρωσης αντιμετωπίζεται ως σταθερά της λεκάνης, εντούτοις πρόκειται για τυχαία μεταβλητή που είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ένταση της βροχόπτωσης και κατ' επέκταση με την παροχή σχεδιασμού. Από μελέτη του Grimaldi *et al.* (2012), το χρονικό αυτό μέγεθος αλλάζει ακόμα και κατά μια τάξη μεγέθους, σε περιπτώσεις γεγονότων βροχής διαφορετικής έντασης. Η παρατήρηση αυτή είναι εμφανής στην **Εικόνα 2.2**, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή του χρόνου συγκέντρωσης συναρτήσει της πλημμυρικής παροχής, βάσει δεδομένων βροχής – απορροής της λεκάνης απορροής Cow Bayou.



Εικόνα 2.2. Παράδειγμα μεταβολής του χρόνου συγκέντρωσης συναρτήσει της πλημμυρικής παροχής, στη λεκάνη απορροής Cow Bayou (Πηγή: Grimaldi et al., 2012).

Οι γραφικές μέθοδοι εκτίμησης, αν και προβάλλουν την επίδραση της έντασης της βροχής στον χρόνο συγκέντρωσης, καθώς μελετούν το γεγονός βροχής – απορροής, έχουν το μειονέκτημα ότι απαιτούν παρατηρήσεις υετογράμματος και υδρογραφήματος, που είναι δύσκολο να εντοπιστούν λόγω έλλειψης δεδομένων πεδίου, καθώς και εκτιμήσεις των υδρολογικών ελλειμμάτων και της άμεσης απορροής, που βασίζονται σε υποθέσεις ή μοντέλα.

Οι εμπειρικές σχέσεις, αν και εφαρμόζονται ευρύτατα από τους μελετητές υδρολόγους, υπόκεινται σε εγγενείς περιορισμούς (κλιματικές, γεωμορφολογικές συνθήκες), ενώ η ελλιπής γνώση της ακρίβειάς τους, καθιστά επισφαλή την χρήση τους. Σύμφωνα με τους Efstratiadis *et al.* (2014), δεδομένου ότι οι μέθοδοι καθορίστηκαν μέσω κάποιου είδους ανάλυσης παλινδρόμησης, η απόδοσή τους εξαρτάται από το μέγεθος και την ποιότητα του αρχικού δείγματος των δεδομένων. Επιπλέον, ένα σημαντικό ζήτημα που τίθεται αφορά την έννοια της «υδρολογικής ομοιότητας», δηλαδή του κατά πόσο μπορούν να είναι αξιόπιστα μοντέλα μακρο-κλίμακας, που προέκυψαν από την υδρολογική συμπεριφορά μιας συγκεκριμένης λεκάνης και μεταφέρθηκαν σε «υδρολογικά παρόμοια» λεκάνη απορροής. Ενώ η γενική δομή και οι μεταβλητές των εμπειρικών σχέσεων είναι εννοιολογικά συνεπείς, οι παράμετροι της παλινδρόμησης εξαρτώνται από τις τοπικές συνθήκες, κάνοντας την έννοια της «υδρολογικής ομοιότητας» να μην ευσταθεί.

Σχετικά με την μέθοδο NRCS (1986), από μελέτη των Fang *et al.* (2006) σε 92 λεκάνες απορροής στο Τέξας, διαπιστώνεται ότι έχει την τάση να υποεκτιμά τον χρόνο συγκέντρωσης, με αποτέλεσμα να υπερεκτιμά την παροχή αιχμής και έτσι να οδηγεί σε πιο συντηρητικό και δαπανηρό υδρολογικό σχεδιασμό. Ένας από τους λόγους που παρατηρείται υποεκτίμηση του μεγέθους είναι ότι αγνοείται η αποθηκευτική ικανότητα, κυρίως της λεκάνης απορροής (ειδικότερα σε μεγάλες, ήπιων κλίσεων λεκάνες), αλλά και του υδατορεύματος, που επιβραδύνουν τον χρόνο ροής. Το μήκος, ως ένας δείκτης της απόστασης που διανύει το πλημμυρικό κύμα και της δυνητικής αποθήκευσης του νερού, συμβάλλει στην εξασθένηση του κύματος, ενώ το ελικοειδές σχήμα του και οι περιοχές

λιμνάσματος του νερού, μειώνουν σημαντικά την ταχύτητα. Άλλα ζητήματα που ανακύπτουν αναφορικά με την μέθοδο είναι ότι στις περιπτώσεις όπου επικρατούν πολύ διαφορετικές συνθήκες στην λεκάνη, η διαδικασία θα πρέπει να εφαρμόζεται σε υπολεκάνες, υπολογίζοντας τον χρόνο συγκέντρωσης σε καθεμία ξεχωριστά και προσθέτοντας τους χρόνους στα κατάντη. Ένα ακόμη ερώτημα που τίθεται από έρευνα των Ravnovic *et al.* (2008), είναι εάν η μέθοδος θα πρέπει να εφαρμοστεί σε επίπεδο φατνίου (pixel-based method, cell by cell) ή τμηματικά σε στοιχειώδη μήκη (single-segment method), κι αυτό γιατί αυξημένη διακριτοποίηση στη μέγιστη υδραυλική διαδρομή ροής, είναι πιθανό να αποδώσει μεγαλύτερους χρόνους, με πιο εμφανή αποτελέσματα σε σχετικά πιο μεγάλες λεκάνες απορροής (έκτασης > 13 km²), πιο επίπεδης τοπογραφίας. Ακόμη, η χωρική ανάλυση του φατνίου και η αυτόματη εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου μέσω των αλγορίθμων δρομολόγησης ροής, επηρεάζουν σημαντικά την εκτίμηση του χρόνου, σε περιβάλλον GIS. Τέλος, υπογραμμίζεται ότι η TR-55 ανάλυση ενσωματώνει μια σειρά γεωμετρικών υποθέσεων για τον καθορισμό της υδραυλικής ακτίνας στην διατομή του υδατορεύματος, που ενισχύουν την αβεβαιότητα προσδιορισμού του χρόνου ροής.

2.5. Αβεβαιότητες κατά την γεωμορφομετρική ανάλυση

Ένας ακόμη παράγοντας αβεβαιότητας είναι η χωρική κλίμακα του ΨΜΥ, η οποία επιδρά στην αυτόματη εξαγωγή των γεωμορφομετρικών και υδρογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης. Τα τελευταία χρόνια, το θέμα της χωρικής ανάλυσης γίνεται ολοένα και πιο σημαντικό, καθώς αναδεικνύει τις δυνατότητες και τους περιορισμούς που θέτει η χρήση του ψηφιακού μοντέλου. Στο επίκεντρο της έρευνας τίθενται δύο βασικά ερωτήματα για την επιλογή της ανάλυσης του μοντέλου σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Πρώτον, κατά πόσο η επιλογή αυτή μπορεί να ταιριάζει την αληθινή πληροφορία με το περιεχόμενο των δεδομένων στο πλαίσιο αποδοχής των σφαλμάτων αναπαράστασης, τα οποία είναι αναμενόμενο να υπάρχουν λόγω των αβεβαιοτήτων των πρωτογενών μετρήσεων και των υπολογιστικών διαδικασιών. Και δεύτερον, κατά πόσον μπορεί να επιτευχθεί μια βέλτιστη κλίμακα που θα ισορροπεί την αποδεκτή ακρίβεια με τους περιορισμούς που τίθενται κατά τη συλλογή λεπτομερέστερων δεδομένων πεδίου. Έτσι, το ενδιαφέρον στρέφεται στο ζήτημα εξεύρεσης ενός ορθού βαθμού διακριτοποίησης, ο οποίος περιγράφει επαρκώς τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, και συνεπάγεται την ελάχιστη αβεβαιότητα στην προσομοίωση των υδρολογικών μεγεθών από ΨΜΥ.

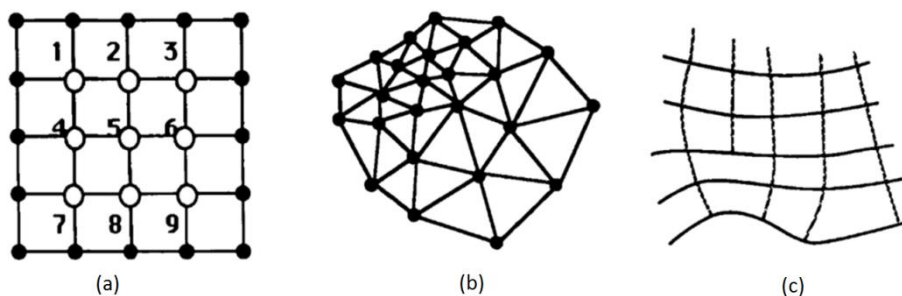
2.5.1. Γεωμορφομετρική ανάλυση

Οι τεχνολογικές εξελίξεις που συνδέονται με την χρήση των GIS, καθώς και η αύξηση της διαθεσιμότητας και της ποιότητας των ψηφιακών μοντέλων εδάφους (ΨΜΕ, Digital Terrain Model – DTM), έχουν επεκτείνει σημαντικά τις δυνατότητες χρησιμοποίησής τους σε υδρολογικές εφαρμογές και ζητήματα προστασίας και διαχείρισης των υδατικών πόρων. Η γεωμορφομετρία αποτελεί τον επιστημονικό τομέα της ποσοτικής ανάλυσης της γήινης επιφάνειας βάσει δεδομένων προερχόμενων από ψηφιακό μοντέλο. Απαρτίζεται από επιμέρους διαδικασίες που αποσκοπούν στην εξαγωγή περιγραφικών χαρακτηριστικών, που αποδίδονται είτε ως ένα συνεχές πεδίο τιμών, συνήθως υπό ψηφιδωτή μορφή (raster

map), είτε ως διακριτά χωρικά αντικείμενα, υπό διανυσματική μορφή (vector map), οριοθετούμενα ευκρινώς στην επιφάνεια (Pike *et al.*, 2009).

Το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων, από την εισαγωγή του το 1958 (Miller & Laflamme, 1958), έχει αποτελέσει την βάση για ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, και, ανάλογα με την προέλευση της πληροφορίας που συνθέτει (ορθότητα, ακρίβεια, αξιοπιστία), μπορεί να αποδώσει με υψηλή ακρίβεια την μορφολογία της γήινης επιφάνειας, εξομαλύνοντας τους φυσικούς, χρονικούς και οικονομικούς περιορισμούς που τίθενται από τη μέτρηση και τη διαχείριση δεδομένων πεδίου. Το δίκτυό του αναπαριστά την χωρική κατανομή των υψομέτρων και μπορεί να αποδοθεί με μια από τις ακόλουθες μορφές (**Εικόνα 2.3**):

- Δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων (triangulated irregular networks), το οποίο σχηματίζεται από χαρακτηριστικά σημεία της επιφάνειας του εδάφους (π.χ., κορυφογραμμές, σημεία αλλαγής της κλίσης), τα οποία αποθηκεύονται ως ένα σύνολο από συντεταγμένες (X, Y, Z).
- Δίκτυο τετραγωνικού πλέγματος (square-grid network), στο οποίο τα δεδομένα αποθηκεύονται ως συντεταγμένες Z σε διαδοχικά σημεία, κατά μήκος ενός προφίλ με καθορισμένο το σημείο εκκίνησης και την απόσταση του πλέγματος.
- Δίκτυο υπό μορφή περιγράμματος (contour-based network), το οποίο απαρτίζεται από ψηφιακές γραμμές περιγράμματος, καθορισμένου υψομέτρου, των οποίων τα δεδομένα αποθηκεύονται ως ζεύγη συντεταγμένων (X, Y).



Εικόνα 2.3. Μέθοδοι αναπαράστασης της υψομετρικής πληροφορίας: (α) Δίκτυο τετραγωνικού πλέγματος (β) Ακανόνιστο δίκτυο τριγώνων (γ) Δίκτυο υπό μορφή περιγράμματος (Πηγή: Moore *et al.*, 1991).

Σε μια σύγκριση των μεθόδων προκύπτει ότι το ακανόνιστο δίκτυο τριγώνων αποτελεί μια πολύπλοκη δομή και λιγότερο εύληπτη στον χρήστη, ενώ το δίκτυο υπό μορφή περιγράμματος απαιτεί μεγάλο όγκο πληροφορίας. Επομένως, η μορφή του τετραγωνικού πλέγματος εμφανίζεται ως η καταλληλότερη στη διαχείριση της πληροφορίας, παρέχοντας υπολογιστική αποδοτικότητα και μεγαλύτερη ευκολία στην κατανόηση των λειτουργιών επεξεργασίας.

2.5.2. Η έννοια της κλίμακας στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους

Η κλίμακα του ΨΜΥ αποτελεί κρίσιμο ζήτημα σε μια υδρολογική πρόβλεψη, καθώς μαζί με την ακρίβεια και την ορθότητα των δεδομένων παρέχει ένδειξη της ποιότητας του μοντέλου. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, όπως και ο τοπογραφικός χάρτης, συνδέεται με

την έννοια της κλίμακας, παρά το γεγονός ότι πολλοί ερευνητές ισχυρίζονται ότι δεν υπάρχει κλίμακα σε σύνολα ψηφιακών δεδομένων, αλλά μόνο η έννοια της χωρικής ανάλυσης (Li *et al.*, 2005). Στα ψηφιακά μοντέλα, η διάσταση του φατνίου περιγράφει την έννοια της κλίμακας, καθώς αποτελεί τη βασική μονάδα για την μέτρηση και αναπαράσταση της επιφάνειας, αποδίδοντας το επίπεδο της λεπτομέρειας του χάρτη. Έτσι, η χωρική ανάλυση μπορεί να θεωρηθεί ως η μικρότερη απόσταση μέσα στην οποία είναι δυνατόν να καταγραφεί μεταβολή (Τσούλος, 2004, σελ. 156). Η χωρική ανάλυση δεν είναι ταυτόσημη έννοια με την κλίμακα, αλλά παρέχει ένδειξη αυτής, καθώς μπορεί να θεωρηθεί μέτρο της περιεχόμενης πληροφορίας του χάρτη.

2.5.3. Επίδραση της κλίμακας στα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά

Η χωρική ανάλυση του μοντέλου, η πηγή των δεδομένων και η ομαδοποίηση χωρικά ανομοιογενών περιοχών, μπορούν να επιφέρουν σημαντικά σφάλματα στην εκτίμηση του μεγέθους και του χρόνου εμφάνισης της παροχής σχεδιασμού. Πιο συγκεκριμένα, καθώς η ανάλυση γίνεται πιο αδρή, η έκταση της λεκάνης απορροής, το μήκος ροής, η κλίση και ο χρόνος συγκέντρωσης έχουν την τάση να μειώνονται, με αποτέλεσμα να υπάρχει η τάση υπερεκτίμησης της παροχής αιχμής. Σκοπός της διερεύνησης της διακύμανσης των παραμέτρων λόγω της ανάλυσης είναι να διαμορφώνεται μέσω των αποτελεσμάτων μια εικόνα στον μελετητή των πιθανών συνεπειών προσδιορισμού των παραμέτρων του μοντέλου, ως αποτέλεσμα της αλλαγής της διάστασης του φατνίου.

Σε αδρότερο ΨΜΥ, αφενός η συντομότερη διαδρομή ροής οδηγεί σε ταχύτερη απόκριση και άρα πιο απότομο κλάδο ανόδου του υδρογραφήματος, αφετέρου οι μικρότερες κλίσεις έχουν την τάση να αυξάνουν τον χρόνο που απαιτείται για την εμφάνιση της παροχής αιχμής στο υδρογράφημα. Αυτές οι αντιφατικές επιδράσεις τείνουν να διαμορφώσουν σημαντικά συγκρίσιμες πλημμυρικές αιχμές για διαφορετικές χωρικές αναλύσεις. Καθώς η ανάλυση μικραίνει, παρατηρείται υποεκτίμηση του μήκους ροής, ειδικότερα σε ποτάμια έντονης ελικοειδούς μορφής (Vieux, 1993· Thielen *et al.*, 1999). Ακόμη, σε πιο μεγάλη χωρική κλίμακα, η έκταση της λεκάνης τείνει να μειωθεί λόγω σφαλμάτων κατά την οριοθέτησή της στο σύστημα GIS, χωρίς ωστόσο μεγάλη διακύμανση (Vieux, 1993). Ακόμη, όσον αφορά τον αριθμό καμπύλης απορροής (Runoff Curve Number, CN) παρατηρείται μικρή μεταβολή του, που σχετίζεται με διαφορετική ερμηνεία των ορίων του υδροκρίτη και με διατήρηση της πληροφορίας εδάφους και χρήσεων γης. Τέλος, μια άλλη παράμετρος που επηρεάζονται είναι ο τοπογραφικός δείκτης υγρασίας (Topographic Wetness Index – TWI), ο οποίος υποδεικνύει το χωρικό πρότυπο υγρασίας του εδάφους, και μοντελοποιεί ως πιο κορεσμένες τις λεκάνες στις αδρές αναλύσεις και ως πιο ξηρές στις υψηλές (Krienze, 2004).

Η μέση κλίση μπορεί να υπολογιστεί είτε ως η μέση κλίση της κοίτης της κύριας μισγάγγειας, είτε ως η μέση κλίση της λεκάνης απορροής. Οι δύο αυτές τιμές μπορεί να διαφέρουν σημαντικά, ανάλογα την μορφολογία της λεκάνης και την διάσταση του φατνίου στο ΨΜΕ. Πολυάριθμες έρευνες έχουν δείξει ότι η τοπική κλίση και η μέση κλίση της λεκάνης απορροής είναι αντιστρόφως ανάλογες της ανάλυσης και αυτό γιατί κατά την αύξησή της, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά μικρής κλίμακας «χάνονται», με αποτέλεσμα

την εξομάλυνση της αναπαράστασης του τοπίου (Vieux, 1993· Zhang & Montgomery, 1994· Thielen *et al.*, 1999). Επιπλέον, η επίδραση της διάστασης του πλέγματος στην εκτίμηση της κλίσης ποικίλει με την τοπογραφική πολυπλοκότητα του εδάφους. Η ευαισθησία της μέσης κλίσης της λεκάνης στη διάσταση του φατνίου φαίνεται να είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την μέση κλίση του κύριου υδατορεύματος, η οποία, σύμφωνα με έρευνα των Moglen & Hartman (2001), παραμένει σχετικά σταθερή μέχρι και την ανάλυση των 90 m. Ειδικότερα, καθώς η διάσταση του φατνίου αυξάνει μέχρι και τα 90 m, το μήκος μειώνεται και το ανάγλυφο ομαλοποιείται με τον ίδιο ρυθμό, προκαλώντας μικρές μεταβολές στην μέση κλίση της διαδρομής ροής.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται η μεθοδολογική προσέγγιση που υιοθετήθηκε προκειμένου να δημιουργηθεί ένα εργαλείο για τον υπολογισμό μιας χρονικής παραμέτρου, η οποία αντανακλά την υδρολογική απόκριση της λεκάνης απορροής σε ένα επεισόδιο βροχής, που παράγει ομοιόμορφα κατανεμημένη επιφανειακή απορροή (καθαρή βροχή). Η παρουσίαση της μεθοδολογίας περιλαμβάνει την παράθεση του θεωρητικού της υποβάθρου και στην περιγραφή της εφαρμογής της.

3.1. Θεωρητικό πλαίσιο μεθοδολογίας

Η διαδικασία έχει ως κοινή συνιστώσα με την μέθοδο της NRCS (1986) τον υπολογισμό χρόνων ροής κατά μήκος της μέγιστης διαδρομής ροής της λεκάνης. Ωστόσο η διαφορά των δύο μεθοδολογικών προσεγγίσεων συνίσταται στην θεώρηση διαφορετικών τύπων ροής κατά μήκος της διαδρομής αυτής. Ειδικότερα, ενώ στην μέθοδο της NRCS (1986), γίνεται η θεώρηση τριών καθεστώτων ροής, ροή σε φιλμ, επίγεια συγκεντρωμένη ροή και ροή στο υδατόρευμα, στην αναπτυσσόμενη μεθοδολογία ουσιαστικά γίνεται ενσωμάτωση των δύο συνιστωσών επίγεια ροής, οπότε θεωρούνται δύο τύποι ροής, επίγεια ροή (overland flow) και ροή στο υδατόρευμα (channel flow). Η θεώρηση αυτή γίνεται διότι οι δύο μηχανισμοί επίγεια ροής είναι εξαιρετικά πολύπλοκοι και είναι δύσκολο να διακριθούν και να οριοθετηθούν μέσα σε περιβάλλον GIS. Επιπλέον, η ροή σε φιλμ αναπτύσσεται σε πολύ μικρό τμήμα της μέγιστης διαδρομής ροής, της τάξης των λίγων δεκάδων μέτρων, που στην κλίμακα της χωρικής ανάλυσης του ΨΜΥ μπορεί να αγνοηθεί.



Εικόνα 3.1. Ερμηνεία του χρόνου συγκέντρωσης, ως ο χρόνος που απαιτείται για τη διαδρομή μιας σταγόνας από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης ως την διατομή εξόδου.

Κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας, η χρονική παράμετρος απόκρισης της λεκάνης υπολογίζεται για δεδομένο ύψος απορροής και θεωρείται ότι προσεγγίζει τον χρόνο συγκέντρωσης. Ο χρόνος ταξιδιού του νερού προσδιορίζεται με βάση την ταχύτητα ροής κατά μήκος της μέγιστης υδραυλικής διαδρομής, που διαμορφώνεται από την υψομετρική πληροφορία του ΨΜΥ. Η διαδρομή του νερού περιλαμβάνει δύο συνιστώσες (*Εικόνα 3.1*):

- τη ροή πάνω στην επιφάνεια του εδάφους (επίγεια ροή), που συντελείται με μια μέση ταχύτητα u_s στις μη διαμορφωμένες πλαγιές και μισγάγγειες, και
- τη ροή στο υδρογραφικό δίκτυο, που πραγματοποιείται με μια μέση ταχύτητα u_r , για την οποία κατά κανόνα ισχύει $u_r \gg u_s$.

Η μεθοδολογία είναι μια απλή, προσδιοριστική προσέγγιση φυσικής βάσης σε ημι-κατανεμημένη (semi-distributed) χωρική κλίμακα, μεμονωμένου γεγονότος. Αυτό σημαίνει ότι κατά την εφαρμογή της, η απόκριση του συστήματος καθορίζεται πλήρως από τις αρχικές του συνθήκες. Σε αντίθεση με τις πιθανοτικές προσεγγίσεις που ποσοτικοποιούν την αβεβαιότητα των μεταβλητών εξόδου, προσδιορίζει μονοσήμαντα τις παραμέτρους εξόδου, χωρίς να δίνει ένα εύρος αξιοπιστίας στο παραγόμενο αποτέλεσμα.

Κατά μήκος της μέγιστης διαδρομής ροής, η λεκάνη χωρίζεται σε διακριτές περιοχές (υπολεκάνες) με συγκεκριμένα μορφομετρικά χαρακτηριστικά (έκταση, κλίση, τραχύτητα, μήκος ροής), τα οποία είτε υπολογίζονται από την κατανεμημένη πληροφορία του ΨΜΥ (έκταση, μήκος, κλίση) είτε εισάγονται ως σταθερές τιμές (π.χ. τραχύτητα στο ποτάμι, συντελεστής παρεμπόδισης επίγειας ροής). Για κάθε τμήμα της λεκάνης υπολογίζεται ο χρόνος ταξιδιού της απορροής βάσει του καθεστώτος ροής που το διέπει. Ο χρόνος αυτός είναι συνάρτηση του μήκους ροής, το οποίο διατηρείται αναλλοίωτο, και της ταχύτητας ροής, η οποία επηρεάζεται από την ένταση της βροχής. Προκειμένου να ενσωματωθεί η επίδραση της έντασης της απορροϊκής βροχής στην ταχύτητα ροής και κατ' επέκταση στον χρόνο, στον κατάντη κόμβο κάθε επιμέρους τμήματος ροής εκτιμάται η παροχή εξόδου, η οποία αποτελεί παροχή εισόδου στο επόμενο από αυτό τμήμα, κ.ο.κ. Η παροχή στην έξοδο, που είναι ανάλογη του ύψους απορροής, υπολογίζεται μέσω της ορθολογικής μεθόδου, και αναμένεται να καθορίσει την ταχύτητα ροής του νερού σε κάθε επόμενο κατάντη τμήμα.

Ορθολογική μέθοδος

Η ορθολογική μέθοδος αποτελεί ένα απλό και ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο βροχής – απορροής, και βασίζεται στην αρχή ότι σε βροχή ομοιόμορφης έντασης και κατανομής σε μια λεκάνη σχετικά μικρής έκτασης (της τάξης των λίγων km^2), η παροχή αιχμής στην έξοδο εμφανίζεται όταν καταφτάσει το νερό από όλα τα σημεία της. Η εφαρμογή της είναι ευρεία στην Ελλάδα και συνήθως για την εκτίμηση της παροχής σχεδιασμού σε αντιπλημμυρικά έργα μικρής και μεσαίας κλίμακας, όπως αστικά δίκτυα ομβρίων. Οι υποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου είναι οι εξής:

- Η περίοδος επαναφοράς της παροχής αιχμής είναι ίση με την περίοδο επαναφοράς της βροχής.
- Η βροχόπτωση στη λεκάνη είναι χωρικά και χρονικά ομοιόμορφη.
- Η διάρκεια της κρίσιμης έντασης βροχής είναι ίση με τον χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης, προκειμένου όλα τα σημεία της να συμβάλλουν στην απορροή.

Η μέθοδος βασίζεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$Q_p = 0,278 \cdot C \cdot i \cdot A \quad (3.1)$$

όπου Q_p η παροχή αιχμής (m^3/s), C ο συντελεστής απορροής (αδιάστατος), i η κρίσιμη ένταση βροχής (mm/h), A η επιφάνεια της λεκάνης (km^2), ενώ ο συντελεστής 0.278 (= 1000/3600) χρησιμοποιείται για τη μετατροπή των μονάδων.

Ο συντελεστής απορροής εκφράζει το ποσοστό της βροχόπτωσης που γίνεται απορροή για μια δεδομένη επιφάνεια και σε μια καθορισμένη χρονική κλίμακα. Σε ετήσια χρονική βάση, ο συντελεστής απορροής είναι πάντα μικρότερος της μονάδας, ενώ σε άλλες χρονικές κλίμακες (π.χ. μηνιαία), μπορεί να ξεπεράσει το 100%, λόγω υστέρησης της απορροής σε σχέση με την βροχόπτωση (π.χ. εκφόρτιση πηγών, τήξη χιονιού). Στον υδρολογικό σχεδιασμό, ο συντελεστής απορροής θεωρείται χαρακτηριστικό μέγεθος της λεκάνης και όχι μεταβλητή, και ενσωματώνει το σύνολο των υδρολογικών ελλειμμάτων, που διαχωρίζουν την ενεργό από την ολική βροχόπτωση (απώλειες λόγω διήθησης, κατακράτησης και επιφανειακής παγίδευσης). Στην πραγματικότητα, ο εν λόγω συντελεστής αποτελεί τυχαία μεταβλητή (δηλαδή διαφέρει σε κάθε πλημμυρικό επεισόδιο), καθώς εξαρτάται από παράγοντες όπως οι συνθήκες υγρασίας του εδάφους κατά την έναρξη της βροχής, η απόσταση από το προηγούμενο επεισόδιο βροχής και η χρονική κατανομή της καταιγίδας (Ευστρατιάδης κ.ά., 2014).

3.2. Περιγραφή μεθοδολογίας

3.2.1. Επίγεια ροή κατά μήκος της μέγιστης διαδρομής ροής

Η επίγεια ροή στις πλαγιές της λεκάνης περιλαμβάνει το τμήμα της υδραυλικά μέγιστης διαδρομής ροής από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης έως το σημείο εισόδου του νερού στο διαμορφωμένο υδρογραφικό δίκτυο, του οποίου η γεωμετρία (π.χ., πλάτος διατομής) είναι επαρκώς προσδιορισμένη. Η διαδρομή της επίγειας ροής συντελείται στο πιο άναπτες τμήμα της λεκάνης και διέπεται από πολύπλοκους φυσικούς νόμους, μη σαφή γεωμετρία και έντονη ετερογένεια (π.χ. χωρική μεταβολή του συντελεστή παρεμπόδισης). Επομένως, η αναλυτική εκτίμηση της ταχύτητας επίγειας ροής καθίσταται ιδιαίτερος δυσχερής, καθώς απαιτεί μελέτη και γνώση δεδομένων πεδίου. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε η χρήση των Σχ. 2.6 & 2.7 της NRCS (1986), για συγκεντρωμένη επίγεια ροή, υπολογίζοντας την ταχύτητα ροής και ακολούθως τον χρόνο ταξιδιού στην διεύθυνση της μέσης κλίσης της διαδρομής του νερού στο τμήμα αυτό:

$$V_{overland} = k \cdot \sqrt{J} \quad (3.2)$$

$$t_{overland} = \frac{L_{overland}}{V_{overland}} = \frac{L_{overland}}{k \sqrt{J}} \quad (3.3)$$

όπου $t_{overland}$ ο χρόνος επίγειας ροής (s), $V_{overland}$ η ταχύτητα επίγειας ροής (m/s), k ο συντελεστής παρεμπόδισης (m/s) και J η μέση κλίση κοίτης του τμήματος που συντελείται η επίγεια ροή (m/m), $L_{overland}$ το μήκος επίγειας ροής (m).

Στο σημείο αυτό επισημαίνεται ότι επιλέχθηκε η μέση κλίση της διαδρομής ροής για το εν λόγω τμήμα και όχι η μέση κλίση της λεκάνης, καθώς με την αύξηση της έκτασης της λεκάνης αποστράγγισης φαίνεται να κυριαρχούν οι διεργασίες στο κανάλι. Πράγματι, εμπειρικές μελέτες του χρόνου απόκρισης της λεκάνης έχουν δείξει ότι ακόμη και για μικρές λεκάνες απορροής, η επιλογή της μέσης κλίσης του καναλιού είναι καταλληλότερη σε σχέση με την μέση κλίση της λεκάνης (Moglen & Hartman, 2001).

3.2.2. Ροή στο υδατόρευμα κατά μήκος της μέγιστης διαδρομής ροής

Η συνιστώσα της ταχύτητας στο υδρογραφικό δίκτυο εκτιμάται από γνωστούς νόμους της υδραυλικής, με την θεώρηση μονοδιάστατης ροής. Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται η εξίσωση Manning, θεωρώντας, για απλούστευση, ορθογωνική διατομή:

$$R = \frac{E}{B} = \frac{b \cdot y}{b + 2 \cdot y} \quad (3.4)$$

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} = \frac{1}{n} \frac{J^{1/2} \cdot b^{2/3} \cdot y^{2/3}}{(b + 2 \cdot y)^{2/3}} \quad (3.5)$$

όπου V η ταχύτητα ροής στο υδατόρευμα (m/s), n ο συντελεστής τραχύτητας Manning ($\text{s/m}^{-1/3}$), R η υδραυλική ακτίνα (m), J η κλίση του υδατορεύματος (m/m), b το πλάτος της διατομής (m), y το βάθος ροής (m), E το εμβαδόν της διατομής (m^2), και B η βρεχόμενη περίμετρος (m).

3.2.3. Κριτήρια τμηματοποίησης της μέγιστης διαδρομής ροής

Η επιλογή της τμηματοποίησης και, συνεπώς, της χωροθέτησης των κόμβων διαχωρισμού και σχηματοποίησης των αντίστοιχων υπολεκανών, γίνεται στο σημείο έναρξης της ροής στο υδρογραφικό δίκτυο, καθώς το τμήμα ανάντη του χαρακτηρίζεται από άλλο καθεστώς ροής (επίγεια ροή), σε συγκλίνοντες κλάδους του δικτύου (ενδεχόμενη ευάλωτη θέση λόγω κατάκλυσης σε περίπτωση πλημμύρας) και σε σημεία ύπαρξης υδρομετρικών σταθμών, προκειμένου να ενισχυθεί η πληροφορία από στοιχεία πεδίου, όπου είναι διαθέσιμα. Ένα ακόμη κριτήριο τμηματοποίησης αποτέλεσαν τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της διατομής του υδρογραφικού δικτύου. Ειδικότερα, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό της ταχύτητας ροής στο υδατόρευμα, επιλέχθηκε η υποδιαίρεση της διαδρομής ροής σε τμήματα, σχετικά σταθερής και πιο λεπτομερώς καθορισμένης γεωμετρίας της διατομής (πλάτος και βάθος ροής).

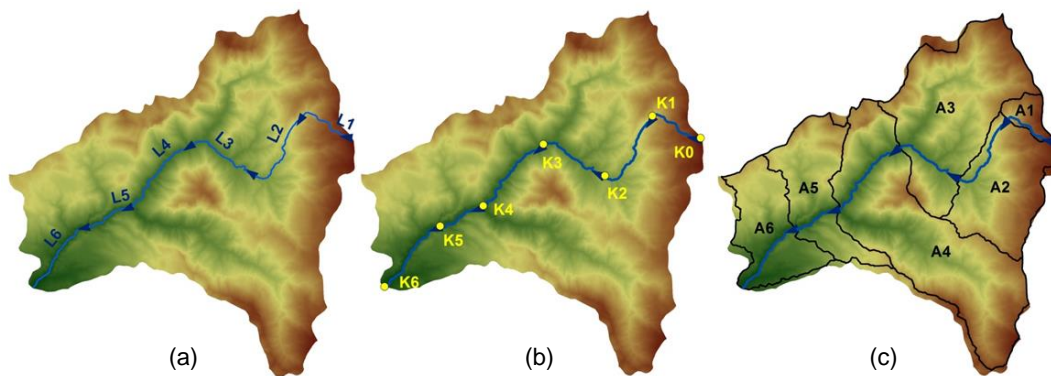
3.2.4. Προσδιορισμός των υδραυλικών χαρακτηριστικών

Το πλάτος της διατομής για κάθε επιμέρους τμήμα του υδατορεύματος αποτελεί δεδομένο εισόδου και ορίστηκε είτε από δεδομένα πεδίου (οριζοντιογραφική αποτύπωση σε σημεία της κοίτης), όπου ήταν διαθέσιμα, είτε από την πληροφορία του ΨΜΥ με σχεδιασμό των διατομών, όπου η ανάλυση το επέτρεπε, σε συνδυασμό με την αναγνώριση των οχθών της κοίτης, όπου ήταν εφικτό, σε ορθοφωτογραφίες της πιλοτικής εφαρμογής του Εθνικού Κτηματολογίου. Σημαντικό είναι να αναφερθεί, ότι οι εν λόγω τιμές διατηρήθηκαν σταθερές στο μοντέλο, για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ύψους απορροής, λόγω της

πολυπλοκότητας προσδιορισμού της κοίτης κατά μήκος της ροής του τμήματος, ανάλογα με το επεισόδιο της βροχής. Όσον αφορά τον συντελεστή τραχύτητας Manning, η ακριβής εκτίμηση του είναι ανέφικτη λόγω της εμπειρικής του φύσης, καθώς η τιμή του εξαρτάται από πολλούς αλληλεπιδρώντες παράγοντες (αντίσταση τριβής, δομή και υφή επιφάνειας, πυκνότητα βλάστησης, ύπαρξη εμποδίων, κ.α.). Επομένως, επιλέγεται, κατά προσέγγιση, η τιμή 0,03 για φυσικό υδατόρευμα και 0,02 για επενδυμένες διατομές από σκυρόδεμα.

3.2.5. Δημιουργία τοπολογικών σχέσεων σε περιβάλλον GIS

Βάσει της ανωτέρω ανάλυσης, κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας, η μέγιστη υδραυλικά διαδρομής ροής χωρίζεται σε $i = 1, 2, \dots, N$ τμήματα, κάθε ένα εκ των οποίων αποτελεί ένα διάνυσμα με αρχή και πέρας έναν κόμβο εισόδου και έναν εξόδου, αντίστοιχα, και κατεύθυνση ροής στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης. Στους κόμβους δίνεται η αρίθμηση K_i , για $i = 0, 1, 2, \dots, N$, ενώ ο κατάντη κόμβος κάθε τμήματος χαρακτηρίζει, μέσω της αρίθμησης του, την υπολεκάνη απορροής που διαρρέει το εκάστοτε τμήμα. Επομένως, οι υπολεκάνες περιγράφονται από μια αρίθμηση A_i , όπου $i = 1, 2, \dots, N$. Στην **Εικόνα 3.2** δίνεται ένα σχηματικό παράδειγμα της τοπολογίας των διανυσματικών αυτών οντοτήτων.



Εικόνα 3.2. Παράδειγμα απεικόνισης των διανυσματικών οντοτήτων σε περιβάλλον GIS: *a)* Γραμμικές οντότητες, *b)* Σημειακές οντότητες, *c)* Επιφανειακές οντότητες.

Η οργάνωση αυτών των διανυσματικών δεδομένων πραγματοποιείται μέσα από την δόμηση τοπολογίας σε GIS, δηλαδή της δημιουργίας χωρικών σχέσεων μεταξύ τους. Επομένως, οι κόμβοι (σημειακά στοιχεία) χαρακτηρίζονται από το υψόμετρο τους και καθορίζουν την κλίση των επιμέρους τμημάτων της μέγιστης διαδρομής. Τα τμήματα αυτά (γραμμικά στοιχεία) έχουν καθορισμένο μήκος και τους προσδίδεται η ιδιότητα του πλάτους της διατομής τους, όπου ορίζεται υδρογραφικό δίκτυο, και του συντελεστή τραχύτητας ή παρεμπόδισης. Ακόμη, στο σύστημα περιλαμβάνεται και η έκταση της υπολεκάνης απορροής, που διαρρέει το εκάστοτε τμήμα της μέγιστης διαδρομής ροής. Η δομημένη τοπολογία καθιστά την διανυσματική απεικόνιση κατανοητή και απλοποιημένη και αποτελεί το δεδομένο εξόδου από το περιβάλλον του GIS, ώστε να εφαρμοστεί η ακόλουθη ανάλυση.

Για $i = 1$, δηλαδή στο πρώτο ανάντη τμήμα της μέγιστης διαδρομής ροής, η απορροή θεωρείται πάντα επίγεια και ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$V_1 = V_{overland} = k \cdot \sqrt{J_1} \quad (3.6)$$

$$t_1 = t_{overland} = \frac{L_1}{k \sqrt{J_1}} \quad (3.7)$$

όπου t_1 ο χρόνος επίγειας ροής (s), V_1 η ταχύτητα επίγειας ροής (m/s), k ο συντελεστής παρεμπόδισης (m/s) και J_1 η μέση κλίση κοίτης του τμήματος που συντελείται η επίγεια ροή (m/m), L_1 το μήκος επίγειας ροής (m).

Ο μετασχηματισμός του ύψους απορροής που κατακρημνίζεται στην λεκάνη σε απορροή πραγματοποιείται μέσω της ακόλουθης σχέσης, η οποία ακολουθεί την απλοποιημένη εμπειρική προσέγγιση της ορθολογικής μεθόδου και εφαρμόζεται σε κάθε κατάντη κόμβο των επιμέρους διαδρομών ροής:

$$Q_i = \frac{P_r \cdot \sum_{j=1}^i A_j}{\sum_{j=1}^i t_j} \quad \text{για } i=1, 2, \dots, N \quad (3.8)$$

όπου N είναι ο αριθμός των επιμέρους τμημάτων της μέγιστης υδραυλικά διαδρομής ροής, Q_i (m^3/s) η παροχή εξόδου στον κόμβο K_i για $i = 1, 2, \dots, N$, P_r (m) το ύψος απορροής, ενώ A_j (m^2) και t_j (s) είναι το εμβαδόν της υπολεκάνης απορροής και ο χρόνος ταξιδιού του νερού στο τμήμα i , αντίστοιχα.

Η τιμή της παροχής αποτελεί δεδομένο εξόδου για κάθε τμήμα $i - 1$ και δεδομένου εισόδου για το τμήμα i . Η σχέση της παροχής στην έξοδο κάθε κόμβου του υδρογραφικού δικτύου διαμορφώνεται ως εξής:

$$Q_{i-1} = V_i \cdot E_i = \frac{1}{n_i} R_i^{2/3} \cdot J_i^{1/2} \cdot E_i \quad (3.9)$$

$$\text{όπου } R_i = \frac{E_i}{B_i} = \frac{b_i \cdot y_i}{b_i + 2y_i} \quad (3.10)$$

Το βάθος ροής για κάθε τμήμα που ανήκει στο υδατόρευμα υπολογίζεται από την σχέση:

$$Q_{i-1} - \frac{1}{n_i} \frac{J_i^{1/2} \cdot b_i^{5/3} \cdot y_i^{5/3}}{(b_i + 2 \cdot y_i)^{2/3}} = 0 \quad \text{για } i = 2, 3, \dots, N \quad (3.11)$$

Επειδή η εξίσωση δεν έχει αναλυτική λύση, η επίλυσή της γίνεται μέσω βελτιστοποίησης, κατά την οποία αναζητείται το βάθος ροής που ελαχιστοποιεί (μηδενίζει) την παραπάνω έκφραση.

Συμπερασματικά, δημιουργείται ένα σύστημα μορφής δικτύου, το οποίο για κάθε τμήμα i της μέγιστης διαδρομής ροής δέχεται ως παραμέτρους εισόδου το ύψος απορροής P_r , το μήκος L_i και την κλίση του J_i , το εμβαδό της υπολεκάνης απορροής A_i , το πλάτος της

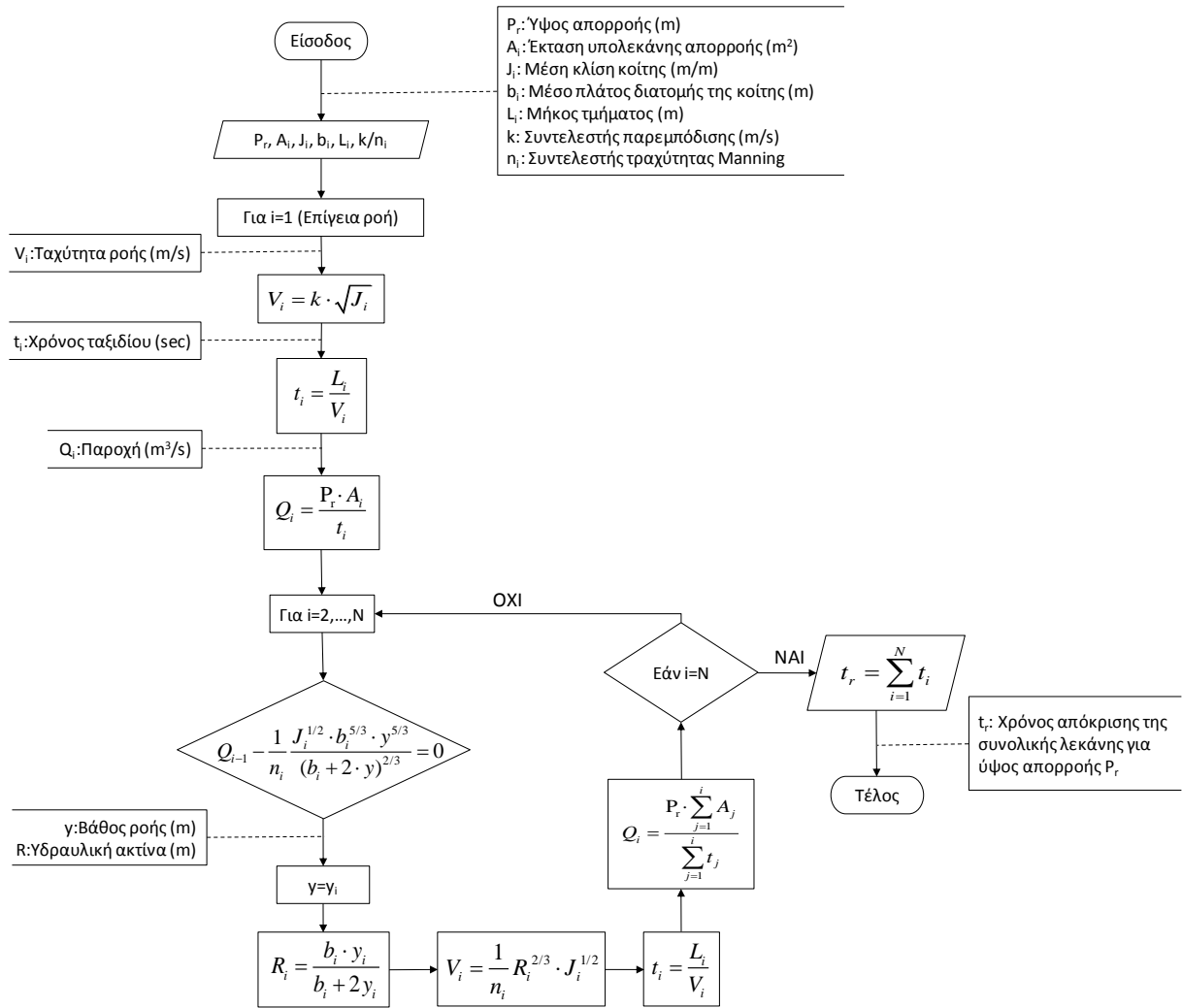
διατομής b_i για τα τμήματα της διαδρομής του νερού στο υδατόρευμα, την τραχύτητα στο ποτάμι n_i ή τον συντελεστή παρεμπόδισης k για το τμήμα της επίγειας ροής, και την παροχή εξόδου του προηγούμενου τμήματος Q_{i-1} . Στη συνέχεια, σε κάθε κλάδο του υδρογραφικού δικτύου υπολογίζει τις μεταβλητές εξόδου, δηλαδή το βάθος ροής y_i (μέσω βελτιστοποίησης), την ταχύτητα ροής V_i , τον χρόνο ταξιδιού του νερού t_i και την παροχή εξόδου στον κατάντη κόμβο Q_i . Επομένως, για δεδομένο ύψος ενεργού βροχής P_r , η μεθοδολογία προσδιορίζει ένα χρόνο απόκρισης της λεκάνης t_r που απαιτείται για την εμφάνιση της υπολογισμένης παροχής αιχμής $Q_r = Q_N$ στην έξοδο της λεκάνης, αθροίζοντας τους επιμέρους χρόνους των N ανάντη τμημάτων. Οι σχέσεις υπολογισμού είναι οι ακόλουθες:

$$t_r = \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{V_i} \quad (3.12)$$

$$Q_r = Q_N = \frac{P_r \cdot \sum_{i=1}^N A_i}{\sum_{i=1}^N t_i} \quad (3.13)$$

όπου L_i (m) το μήκος, V_i (m/s) η ταχύτητα, A_i (m²) το εμβαδό των επιμέρους υπολεκανών, t_i (s) ο χρόνος ταξιδιού του νερού για το i τμήμα ροής, t_r (s) ο συνολικός χρόνος απόκρισης, και Q_r (m³/s) η παροχή στην έξοδο της λεκάνης, για δεδομένο ύψος απορροής P_r .

Η μεθοδολογία που αναλύθηκε εφαρμόστηκε για ύψη απορροής 1 mm, 5 mm, 10 mm, 25 mm, 50 mm και 100 mm, για τα οποία υπολογίστηκε η παροχή στην έξοδο της εκάστοτε λεκάνης μελέτης και ο χρόνος απόκρισης. Προς κατανόηση των επιμέρους βημάτων της μεθοδολογίας παρατίθεται ένα λογικό διάγραμμα ροής (**Εικόνα 3.3**), που υλοποιήθηκε στο λογισμικό excel, με στόχο τον υπολογισμό του χρόνου απόκρισης και της παροχής στην έξοδο της λεκάνης για συγκεκριμένο ύψος απορροής.



Εικόνα 3.3. Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας εκτίμησης του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής.

4. ΓΕΩΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Βασικό στάδιο υλοποίησης της μεθοδολογίας αποτελεί η υδρολογική ανάλυση του ΨΜΕ, κατά την οποία υπολογίζονται οι παράμετροι που αποτυπώνουν το γεωμορφολογικό προφίλ μιας περιοχής μελέτης, και παράλληλα επηρεάζουν τις διεργασίες κατά την απορροή. Με την ανάπτυξη των GIS, η αυτόματη εξαγωγή των χαρακτηριστικών γεωμετρικών μεγεθών της λεκάνης απορροής είναι πλέον ταχύτερη, λιγότερο υποκειμενική και διαθέτει άμεσα στον χρήστη μετρημένα μεγέθη που εξυπηρετούν την εκπλήρωση μελετών υδρολογικού ενδιαφέροντος.

4.1. Λογισμικά εφαρμογής

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκαν δύο συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών, το SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses) και το ArcGIS της εταιρείας ESRI, προκειμένου, μέσω της σύγκρισης των δύο λογισμικών να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες επεξεργασίας της χωρικής πληροφορίας. Το λογισμικό SAGA αναπτύχθηκε το 2001, από μια επιστημονική ομάδα του Πανεπιστημίου Göttingen της Γερμανίας, ενώ από το 2004 διατίθεται μέσω μιας άδειας χρήσης λογισμικού ανοικτού κώδικα. Το πρόγραμμα κωδικοποιείται σε γλώσσα προγραμματισμού C++ και διαθέτει ένα οργανωμένο σύνολο βιβλιοθηκών, παρέχοντας στον χρήστη ευχέρεια και ευελιξία στην εφαρμογή χωρικών αλγορίθμων, που δεν περιλαμβάνονται στο λογισμικό ArcGIS, το οποίο χρησιμοποιείται ευρύτατα. Τέλος, αναφέρεται ότι κατά την χρήση του ArcGIS (ArcCatalog, ArcMap), προσαρτήθηκε το υδρολογικό εργαλείο του ArcHydro Tool και του HEC-GeoRAS, τα οποία επέκτειναν σημαντικά τις δυνατότητες κατά την ανάλυση.

4.2. Συμπλήρωση βυθισμάτων (Fill Sinks)

Θεμελιώδες στάδιο της προεπεξεργασίας του ψηφιακού μοντέλου αποτελεί η αναγνώριση και απομάκρυνση των τοπογραφικών βυθισμάτων, βάσει της υψομετρικής πληροφορίας, που περιέχεται σε κάθε φατνίο του καννάβου. Η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων οδηγεί στον σχηματισμό τεχνητών βυθισμάτων, η ύπαρξη των οποίων εμποδίζει την ορθή αναπαράσταση των διαδρομών ροής του νερού στο ψηφιακό μοντέλο, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ασύνδετα υδάτινα σώματα και υπολεκάνες απορροής χωρίς στόμιο εξόδου. Η πλήρωση των βυθισμάτων αποτελεί πρωταρχική ενέργεια πριν την εξαγωγή των υδρογραφικών χαρακτηριστικών, καθώς αν αυτά δεν απομονωθούν δημιουργούνται καταβόθρες στο μοντέλο, που απομονώνουν τα τμήματα της λεκάνης.

Οι κοιλότητες που εντοπίζονται μπορεί να είναι τεχνητές και πραγματικές. Η εμφάνιση των τεχνητών κοιλοτήτων οφείλεται σε ένα σύνολο παραγόντων, που αφορούν στα σφάλματα δειγματοληψίας, την δημιουργία του ΨΜΥ κατά τη διαδικασία της παρεμβολής, καθώς και τις επιδράσεις της εξομάλυνσης, σε περίπτωση εφαρμογής φίλτρου, ή την στρογγυλοποίηση των τιμών του υψομέτρου στην πλησιέστερη ακέραια τιμή. Τέτοιου είδους κοιλότητες συνδέονται άμεσα με την οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια, των αρχικών δεδομένων, καθώς και με τις μεταβολές που παρατηρούνται στην επιφάνεια του αναγλύφου. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι τα τεχνητά βυθίσματα συναντώνται συχνά σε περιοχές με χαμηλό ανάγλυφο, γεγονός που αποδίδεται σε μεγάλο βαθμό στην

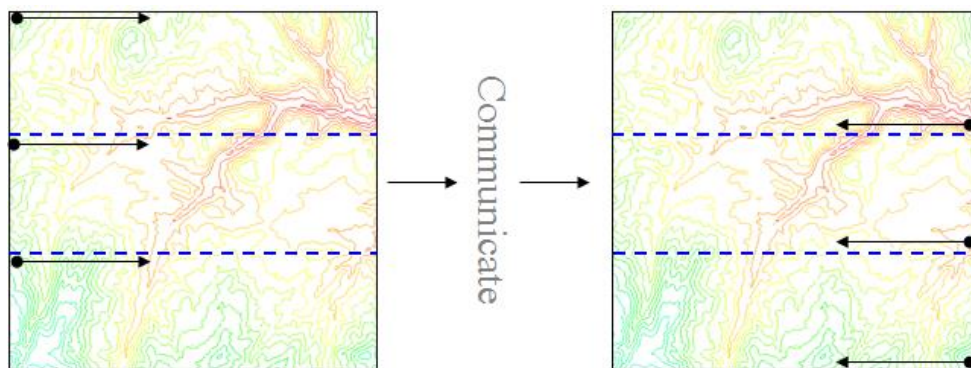
περιορισμένη κατακόρυφη ακρίβεια του ΨΜΥ. Επιπλέον, σύμφωνα με έρευνες έχει αποδειχθεί ότι υψηλής ανάλυσης ψηφιακά μοντέλα υψομέτρων από δεδομένα LiDAR, περιέχουν μεγάλο αριθμό βυθισμάτων, λόγω του μικρού μεγέθους της ψηφίδας. Ωστόσο, στο ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων μπορεί να υπάρχουν και πραγματικές κοιλότητες, οι οποίες εκπροσωπούν περιοχές φυσικής εναπόθεσης ή τεχνητές αλλοιώσεις τοπίου, που οφείλονται σε ανθρώπινη παρέμβαση. Κατά κανόνα, αυτού του είδους οι κοιλότητες παρουσιάζονται πιο σπάνια σε σχέση με τις τεχνητές ή σχεδόν απουσιάζουν και συνήθως αναφέρονται σε λίμνες ή τεχνητές δομές, σε λεκάνες συγκράτησης ροής ή λατομεία σε εξω-αστικό περιβάλλον.

Αλγόριθμος συμπλήρωσης βυθισμάτων των Planchon & Darboux (2001)

Ο αλγόριθμος που περιλαμβάνεται στο λογισμικό SAGA GIS αποτελεί μία καινοτόμο προσέγγιση πλήρωσης των βυθισμάτων, και παρά την πολυπλοκότητα του πλεονεκτεί έναντι των υφιστάμενων μεθόδων. Κατά κύριο λόγο συνίσταται στην εκτέλεση υπολογισμών δύο σταδίων. Αρχικά, η επιφάνεια του ΨΜΥ θεωρείται ότι καλύπτεται από ένα παχύ στρώμα νερού, το οποίο γεμίζει τα βυθίσματα, και στη συνέχεια αφαιρείται η ποσότητα που βρίσκεται σε περίσσεια (Planchon & Darboux, 2001). Ο αλγόριθμος ξεκινά ορίζοντας μία μεταβατική επιφάνεια, στην οποία τα φατνία χαρακτηρίζονται από άπειρη (ή πολύ μεγάλη) τιμή υψομέτρου. Γύρω από τα όρια του πλέγματος (σημεία καθορισμένης τιμής υψομέτρου), τα υψόμετρα της μεταβατικής επιφάνειας μειώνονται προκειμένου να ταιριάζουν στην ανύψωση του αρχικού μοντέλου. Η εφαρμογή εκτελεί μια σειρά συνεχόμενων σάρωσεων στο υπόλοιπο μοντέλο. Κατά την διάρκεια κάθε σάρωσης, ο αλγόριθμος ελέγχει στο κελί το υψόμετρο των γειτονικών του φατνίων, προκειμένου να καθοριστεί το γειτονικό κελί με το χαμηλότερο υψόμετρο. Εάν η αρχική ανύψωση είναι μεγαλύτερη ή ίση από αυτή του χαμηλότερου γειτονικού φατνίου, τότε τίθεται στο κελί η τιμή του αρχικού υψομέτρου. Σε αντίθετη περίπτωση, η τιμή του φατνίου τίθεται ίση με τη χαμηλότερη τιμή του γειτονικού κελιού. Κατά συνέπεια, δημιουργείται ένα διορθωμένο ΨΜΥ, στο οποίο οι τιμές των υψομέτρων των φατνίων είναι ίσες ή μεγαλύτερες από εκείνες του αρχικού μοντέλου. Ακόμη, επισημαίνεται ότι κάθε σάρωση αποτελεί ένα συνδυασμό σάρωσης με κατεύθυνση από αριστερά προς τα δεξιά ή δεξιά προς τα αριστερά και από κάτω προς τα πάνω ή από πάνω προς τα κάτω. Η διαδικασία διεξάγεται μέσα από οχτώ συνδυασμούς σάρωσης, διότι μεταβάλλοντας την κατεύθυνση από την οποία γίνεται η προσέγγιση του υψομέτρου του φατνίου, αυξάνεται η πιθανότητα γρήγορης επίλυσης του αλγορίθμου, με παράλληλη μείωση του συνολικού αριθμού των επαναλήψεων. Η διαδικασία σταματά μετά από την σάρωση κατά την οποία δεν τροποποιείται η τιμή κάποιου φατνίου.

Για την εξασφάλιση της ορθής εξαγωγής του αποστραγγιστικού δικτύου, είναι πιο πρακτικό η επιφάνεια των βυθισμάτων να εμφανίζει μία ελαφριά κλίση. Για το σκοπό αυτό, ορίζεται μία ελάχιστη θετική διαφορά του υψομέτρου για κάθε μία από τις οχτώ διευθύνσεις σάρωσης που ενώνουν ένα κελί με τα γειτονικά του. Η τιμή της διαφοράς δεν τίθεται ίση με μηδέν, προκειμένου ο αλγόριθμος να διορθώσει το ψηφιακό μοντέλο αφαιρώντας τα βυθίσματα και αποφεύγοντας την ανάπτυξη επίπεδων επιφανειών. Με αυτό τον τρόπο, εξασφαλίζεται για κάθε φατνίο ορισμένη κατεύθυνση στο δίκτυο

αποστράγγισης και σύνδεση αυτού με τα όρια του μοντέλου, ακολουθώντας την διαδρομή της φθίνουσας ανύψωσης, προκειμένου να καθορίσει την πορεία της συνεχούς ροής στην γήινη επιφάνεια. Η εφαρμογή του αλγορίθμου γίνεται παράλληλα, υλοποιώντας ένα σύστημα στο οποίο το πλέγμα διαιρείται οριζόντια σε p ίσα τμήματα (**Εικόνα 4.1**). Σε κάθε τμήμα του ΨΜΥ και διαβάζονται οι τιμές των φατνίων κατά μήκος μιας σειράς ακριβώς πάνω και κάτω από τα τμήματα στα οποία έχει διαιρεθεί το πλέγμα. Κάθε διεργασία διόρθωσης των βυθισμάτων που εκτελείται σε κάθε τμήμα, επιτρέπεται να έχει πρόσβαση σε όλα τα γειτονικά φατνία και διεξάγεται αυτόνομα, χωρίς να εισάγεται κάποια σχέση που να συνδέει τις επιμέρους διεργασίες των τμημάτων. Στα πλεονεκτήματα του αλγορίθμου ανήκει η αποτελεσματικότητά του και η ευελιξία του σε σχέση με τις δημοσιευμένες μεθόδους αντίστοιχων αλγορίθμων, καθώς παρέχει βελτιωμένη απόδοση του χρόνου εκτέλεσης σε μεγάλου όγκου δεδομένα. Αντιθέτως, στα μειονεκτήματά του εντοπίζεται η δυσκολία κατανόησης της διαδικασίας, που οφείλεται κυρίως στις τρεις πολύπλοκες υπορουτίνες του και στην αναδρομική εκτέλεση τους.

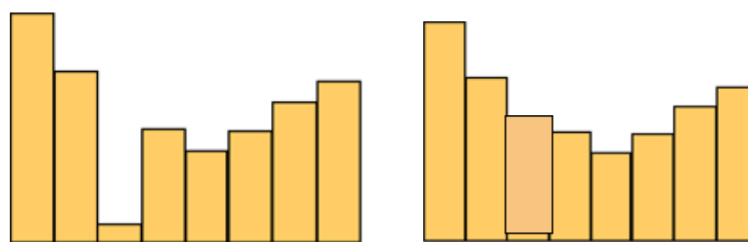


Εικόνα 4.1. Παράλληλο σύστημα εφαρμογής του αλγορίθμου Planchon & Darboux (2001)

(Πηγή: <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/giswr2010/giswr2010.htm>).

Συμπλήρωση των βυθισμάτων μέσω του λογισμικού ArcGIS

Στο λογισμικό του ArcMap, η συμπλήρωση των βυθισμάτων στηρίζεται στην πλήρωση των εσοχών μέχρι το χαμηλότερο υψόμετρο που εντοπίζεται στην γεινίαση του κελιού, το οποίο παρουσιάζει το βύθισμα (**Εικόνα 4.2**). Ο τρόπος που λειτουργεί ο αλγόριθμος (Tarboton *et al.*, 1991) είναι αρκετά απλός και επιτυγχάνει την προσομοίωση της ροής από τις ανάντη προς τις κατόντη περιοχές, διορθώνοντας το βύθισμα του κελιού, βάσει της υψομετρικής πληροφορίας των οκτώ γειτονικών του κελιών.



Εικόνα 4.2. Διατομή της βυθίσματος (αριστερά) και συμπλήρωσή του (δεξιά) στο ArcMap (Πηγή: ArcGISHelp).

4.3. Συγκέντρωση ροής (Flow Accumulation)

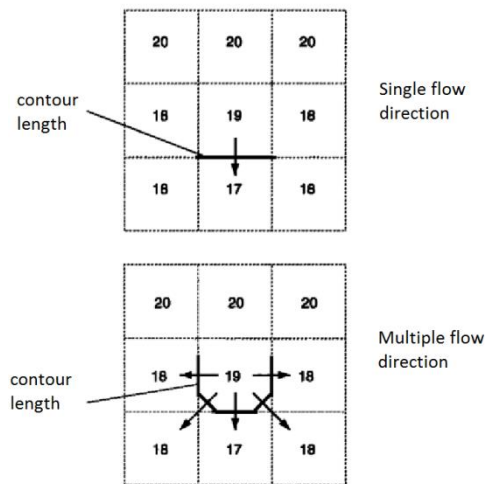
Η διαμόρφωση της τοπογραφίας στο φυσικό τοπίο έχει αντίκτυπο σε υδρολογικές, γεωμορφολογικές και βιολογικές δράσεις που συντελούνται σε αυτό. Στο πλαίσιο της μελέτης της γεωμορφολογίας εντάσσεται και η αναπαράσταση του υδάτινου στοιχείου (ποτάμια, λίμνες, κτλ.), στο περιβάλλον της υπό εξέταση περιοχής. Κατά την διάρκεια των τελευταίων είκοσι χρόνων, η διαθεσιμότητα δεδομένων υψηλής ακρίβειας, η χωρική ανάλυση, καθώς και η βελτίωση της ποιότητας των υδρολογικών εργαλείων μοντελοποίησης, έχουν οδηγήσει στην αυτόματη εξαγωγή των υδρογραφικών χαρακτηριστικών από ψηφιακά μοντέλα υψομέτρων. Το δίκτυο των ρεμάτων και τα σημεία έναρξης της ροής, έχουν κεντρική σημασία για την υδρολογία και γεωμορφολογία, διότι ελέγχουν και καθορίζουν τις περιβαλλοντικές παραμέτρους (π.χ. κλίμα, τοπογραφία, ιδιότητες του εδάφους). Εξάλλου, η απεικόνιση των υδάτινων σωμάτων αποτελεί την βάση για ένα ευρύ φάσμα ερευνών, που αφορούν την αποτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου, τη ρύπανση του ποτάμιου συστήματος, τη διαχείριση των υδατικών πόρων κ.ά.

Αλγόριθμοι συγκέντρωσης ροής

Ο καθορισμός του δικτύου αποστράγγισης σε μια δεδομένη περιοχή προσδιορίζεται με την χρήση αλγορίθμων δρομολόγησης ροής, που έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές και εφαρμόζονται κατά κύριο λόγο σε ΨΜΕ μορφής πλέγματος. Γενικά, οι αλγόριθμοι αυτοί:

- Προσομοιώνουν τη διανομή και τη ροή του ύδατος.
- Αναγνωρίζουν τις περιοχές που συμβάλουν στην απορροή και τις διαδρομές αποστράγγισης.
- Αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες με έναν απλουστευμένο, αλλά αρκετά ρεαλιστικό τρόπο.

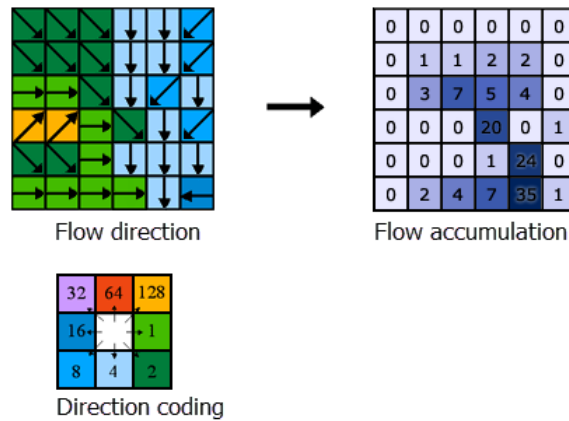
Σημειώνεται ότι υπάρχουν δύο βασικοί τύποι αλγορίθμων δρομολόγησης της ροής, μονής κατεύθυνσης ροής (Single Flow Direction) και πολλαπλής κατεύθυνσης ροής (Multiple Flow Direction) (**Εικόνα 4.3**). Η βασική ιδέα των αλγορίθμων μονής κατεύθυνσης (όπως ο αλγόριθμος D8 που εφαρμόζεται στο ArcMap) είναι ότι η απορροή του φατνίου εισρέει σε ένα και μόνο γειτονικό φατνίο, χαμηλότερου υψομέτρου. Αντίθετα, οι αλγόριθμοι πολλαπλής κατεύθυνσης (όπως οι αλγόριθμοι MFD8, DEMON, και D_{∞} που διατίθεται στο SAGA GIS) θεωρούν ότι η ροή από την τρέχουσα θέση αποστραγγίζεται σε περισσότερα του ενός, χαμηλότερου υψομέτρου, γειτονικά φατνία.



Εικόνα 4.3. Αλγόριθμοι μονής και πολλαπλής κατεύθυνσης ροής (Πηγή: Wolock & McGabe, 1995).

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος καθορισμού ροής είναι ο αλγόριθμος D8 (deterministic eight node algorithm) (O'Callaghan & Mark, 1984· Jensen & Dominigue, 1988), ο οποίος αποτελεί μια απλή δομή επεξεργασίας και διέπεται από τις εξής αρχές: Κατά την εφαρμογή του σε ένα κινούμενο παράθυρο φατνίων 3×3, το νερό του κεντρικού φατνίου ρέει σε μία μόνο από τις οκτώ πιθανές κατευθύνσεις, και, επιπλέον, η κατεύθυνση αυτή εμφανίζει την υψηλότερη τιμή κλίσης. Επομένως, η κατεύθυνση της ροής περιορίζεται σε πολλαπλάσια των 45°, γεγονός που αποτελεί και την κύρια αιτία για πολλά από τα μειονεκτήματα της μεθόδου. Ακόμη, ο αλγόριθμος έχει την τάση να δημιουργεί παράλληλες γραμμές ροής, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται αδυναμία στην μοντελοποίηση της σύγκλισης της ροής σε περιοχές όπου επικρατούν μη γραμμικές συνθήκες ροής (επιφανειακή και υπεδάφια ροή). Παρότι ο αλγόριθμος D8 έχει την ικανότητα να διαχειρίζεται πολύπλοκα χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας, επηρεάζεται από τη δομή του κανάβου, με αποτέλεσμα να προκύπτουν σημαντικά υπολογιστικά λάθη.

Κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου, κάθε φατνίο του κανάβου συγκέντρωσης της ροής που δημιουργείται χαρακτηρίζεται από μια τιμή που αντιστοιχεί στον αριθμό των φατνίων που αποστραγγίζονται σε αυτό και κατ' επέκταση στην έκταση της ανάντη λεκάνης αποστράγγισης. Επομένως, διευκολύνεται η ανίχνευση του υδρογραφικού δικτύου, καθώς μηδενικές τιμές χαρακτηρίζουν περιοχές κοντά στην κορυφογραμμή και υψηλές τιμές προσδιορίζουν την κοίτη του υδατορεύματος. Στο λογισμικό ArcGIS, η συγκέντρωση ροής προϋποθέτει την δημιουργία του *κανάβου διεύθυνσης ροής* (Flow Direction), που χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου. Για την δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου διεύθυνσης ροής αξιοποιείται η υψομετρική πληροφορία, διορθωμένη από βυθίσματα, και για κάθε φατνίο προσδιορίζεται η διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, η οποία χαρακτηρίζεται από μια συγκεκριμένη τιμή σύμφωνα με την κωδικοποίηση του μοντέλου των οκτώ διευθύνσεων (**Εικόνα 4.4**).



Εικόνα 4.4. Κωδικοποίηση των διευθύνσεων ροής και της συγκέντρωσης ροής στο ArcGIS (Πηγή: ArcGIS Help).

Ο αλγόριθμος MFD8 πολλαπλής κατεύθυνσης ροής (Quinn *et al.*, 1991) που χρησιμοποιείται στο λογισμικό SAGA GIS, βασίζεται στην λογική του κατανεμημένου υδρολογικού μοντέλου TOPMODEL (Beven *et al.*, 1995). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η κατανεμημένη στο έδαφος υγρασία εκτιμάται βάσει του χωρικού δείκτη υγρασίας:

$$I = \ln[\alpha/\tan(\beta)] \quad (4.1)$$

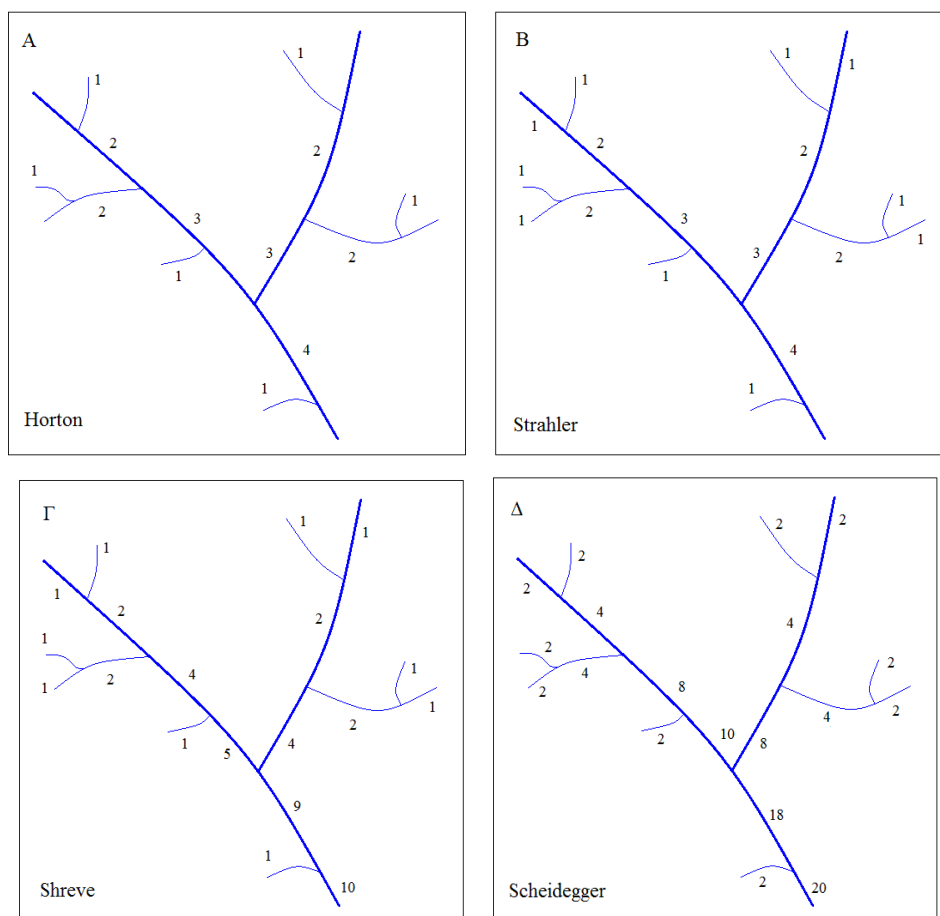
όπου α είναι η έκταση της ανάντη λεκάνης απορροής διαιρεμένη με το πλάτος ροής, κατά την έννοια την κάθετη στη ροή, και $\tan(\beta)$ είναι η τοπική κλίση του εδάφους, που εκφράζει τον όγκο νερού που έρχεται από την ανάντη συμβάλλουσα περιοχή, σε σχέση με την δυνατότητα παροχέτευσής του. Οι εμπνευστές της μεθόδου, χρησιμοποιώντας τον δείκτη αυτόν ως εργαλείο, προτείνουν η διανομή του νερού σε κάθε φατνίο να γίνεται προς όλες τις κατάντη διευθύνσεις. Οι διευθύνσεις αυτές διακρίνονται σε κάθετες και οριζόντιες, δημιουργώντας οχτώ πιθανές διανομές ροής σε ένα παράθυρο 3×3 γύρω από το εξεταζόμενο φατνίο (**Εικόνα 4.3**).

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο πολλαπλής κατεύθυνσης ροής και με δεδομένο εισόδο το διορθωμένο από βυθίσματα ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων, υπολογίζεται σε κάθε φατνίο, η έκταση της ανάντη λεκάνης απορροής. Αναλυτικότερα, για κάθε φατνίο i θεωρείται ότι υπάρχει νερό βάθους 1,0 m, επομένως ο όγκος του νερού θα είναι $V = 1,0 \times A(i)$ σε m^3 , όπου $A(i)$ το εμβαδόν του φατνίου σε m^2 . Αν το συγκεκριμένο φατνίο i παρέχει στο γειτονικό του φατνίο j , το ποσοστό $c(i, j)$ του όγκου του, τότε στο κελί j καταλήγει όγκος νερού $V' = A(i) c(i, j)$, σε m^3 . Είναι προφανές ότι προχωρώντας προς τα κατάντη και αθροίζοντας όλες αυτές τις συμβολές, προκύπτει ο όγκος νερού σε κάθε φατνίο, ή, ισοδύναμα, η έκταση της ανάντη λεκάνης, εφόσον θεωρείται μοναδιαίο βάθος νερού. Κατά την εκτέλεση του αλγόριθμου MFD8, προσδιορίζεται ακριβέστερα η βαθύτερη κοίτη του υδατορεύματος στο ΨΜΥ, με αποτέλεσμα να αναπαριστάται με πιο ρεαλιστικό τρόπο το ελικοειδές σχήμα του υδατορεύματος. Για τον λόγο αυτό, η χρήση του συστήνεται κυρίως σε λεκάνες με έντονες κλίσεις, καθώς περιορίζει τα σφάλματα αναπαράστασης του δικτύου, σε σχέση με τον αλγόριθμο μονής κατεύθυνσης D8, που ενδεχομένως δημιουργεί στρεβλωμένη περιγραφή της κατεύθυνσης ροής.

Τέλος, το λογισμικό του SAGAGIS, πέρα από τους αλγορίθμους D8 και MFD8, διαθέτει μια πληθώρα αλγορίθμων πολλαπλής κατεύθυνσης ροής που υπάρχουν στην βιβλιογραφία, όπως ο DEMON (Digital Elevation Model Network· Cabral & Burgess, 1994), Rho8 (Fairfield & Leymarie, 1991) και D ∞ (Deterministic Infinity· Tarboton, 1997). Από τους παραπάνω αλγορίθμους, την υψηλότερη ακρίβεια προσδιορισμού της ροής εμφανίζει ο αλγόριθμος DEMON, ο οποίος δέχεται την ελάχιστη επίδραση από την δομή του κανάβου, όμως η εφαρμογή του είναι αρκετά πολύπλοκη και η ταχύτητα επεξεργασίας των δεδομένων του, ιδιαίτερος χαμηλή.

Κατάταξη υδατορευμάτων σε τάξεις

Η τυπική κατάταξη των κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου σε ιεραρχημένες τάξεις πραγματοποιείται ανάλογα με το μήκος τους, την έκταση της ανάντη λεκάνης απορροής, την μέση ετήσια παροχή και άλλα στοιχεία. Η αρίθμηση των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου γίνεται κυρίως με τέσσερις μεθόδους (Horton, Strahler, Scheidegger, και Shreve), οι οποίες διασαφηνίζονται στην **Εικόνα 4.5**. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η ταξινόμηση κατά Strahler, η οποία αποτελεί τροποποίηση της μεθόδου Horton. Σύμφωνα με αυτή, οι κλάδοι που δεν δέχονται την απορροή μικρότερων κλάδων χαρακτηρίζονται ως πρώτης τάξης. Η ένωση δύο κλάδων πρώτης, σχηματίζει ένα ρεύμα δεύτερης, και ομοίως η σύνδεση δύο δεύτερης σχηματίζει τρίτης τάξεως ρεύμα, κοκ., ενώ κατά την συμβολή κλάδων διαφορετικής τάξεως, διατηρείται η τάξη του μεγαλύτερου ρεύματος.



Εικόνα 4.5. Μέθοδοι κατάταξης των ρευμάτων σε τάξεις ιεράρχησης.

4.4. Καθορισμός σημείου έναρξης υδρογραφικού δικτύου

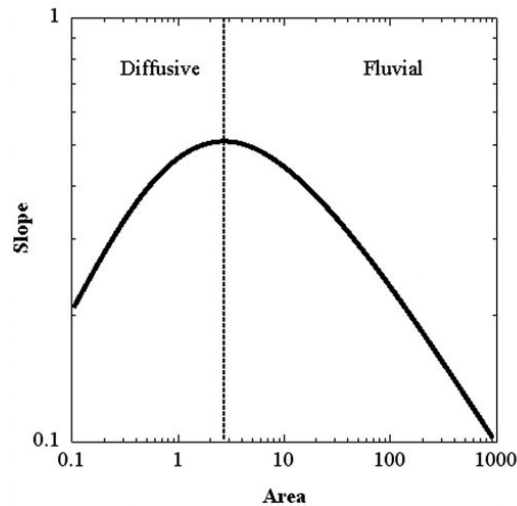
Η διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου πραγματοποιείται αυτόματα, με δεδομένα εισόδου το ΨΜΕ και τον κλίμακα συγκέντρωσης ροής, ορίζοντας μια «σταθερή» τιμή κατώφλιου, η οποία αντιπροσωπεύει τον αριθμό των φατνίων που αποστραγγίζονται από την ανάντη περιοχή. Η έναρξη του υδρογραφικού δικτύου σε ένα ΨΜΕ μορφής raster βασίζεται σε μία αυθαίρετη τιμή⁵ κατώφλιου που αντιστοιχεί στην ελάχιστη ανάντη λεκάνη απορροής, που χρειάζεται ώστε να σχηματιστεί και να διατηρηθεί ένα υδατόρευμα. Έτσι, το δίκτυο αποστράγγισης αποτελείται από φατνία με τιμές συγκέντρωσης ροής μεγαλύτερες του κατώφλιου και όσο η τιμή του ορίου μικραίνει, τόσο περισσότερο αυξάνεται η πυκνότητα του δικτύου.

Είναι προφανές ότι, λόγω της ετερογένειας της λεκάνης και της εξάρτησης των συνθηκών ροής από τις υδροκλιματικές συνθήκες (π.χ., το μήκος του υδρογραφικού δικτύου μεταβάλλεται ανάλογα με το μέγεθος του πλημμυρικού επεισοδίου), η έναρξη των διαδρομών ροής από τα ανάντη τμήματα δεν μπορεί να γίνεται με βάση ένα σταθερό κατώφλι. Επιπλέον, η διαφορά ανάμεσα στα παρατηρημένα σημεία έναρξης της ροής και στα υπολογισμένα μέσω του αλγορίθμου μπορεί να δημιουργήσει ελλιπή ή πρόσθετα τμήματα υδρογραφικού δικτύου. Επομένως, ο καθορισμός των σημείων έναρξης της ροής είναι μια διαδικασία που εμπεριέχει την κρίση του μελετητή και έχει συχνά σημαντική επίδραση στην γεωμετρία του δικτύου, τους γεωμορφολογικούς δείκτες και την υδρολογική απόκριση της λεκάνης απορροής. Για τον λόγο αυτό, το πιο ορθό είναι η αναγνώριση των σημείων αυτών να στηρίζεται σε έρευνα πεδίου. Αν αυτό δεν είναι εφικτό, η ψηφιοποίηση τοπογραφικών χαρτών και η επεξεργασία εναέριων τηλεπισκοπικών δεδομένων, με την εφαρμογή έγχρωμων σύνθετων σε δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης, μπορούν να διευκολύνουν αρκετά την επιλογή του μελετητή. Ωστόσο και σε αυτή την περίπτωση η διαδικασία υπόκειται σε σφάλματα που εξαρτώνται από την ποιότητα και την κλίμακα των δεδομένων. Προγενέστερες έρευνες, όπως των Montgomery *et al.* (1988), Tarboton *et al.* (1991) και Dietrich *et al.* (1993), έχουν δείξει ότι η θέση έναρξης του καναλιού μπορεί να προβλεφθεί χρησιμοποιώντας μια αντίστροφη σχέση μεταξύ της ανάντη συμβάλλουσας περιοχής πάνω από το σημείο έναρξης και της τοπικής κλίσης του σημείου αυτού. Ωστόσο, οι εν λόγω έρευνες θα πρέπει να επαληθευτούν προτού βρουν εφαρμογή, καθώς τα σημεία έναρξης του υδρογραφικού δικτύου μεταβάλλονται λόγω της αλλαγής των χρήσεων γης και των υδροκλιματικών συνθηκών της λεκάνης. Κατά την υδρολογική ανάλυση, η εξαγωγή του δικτύου είναι σημαντική, καθώς προσδιορίζει το τμήμα της λεκάνης στο οποίο συντελείται η χερσαία ροή και εκείνο το οποίο αποστραγγίζεται μέσω της κύριας μισγάγγειας, ενώ μεταβάλλει και τον αριθμό των κόμβων σύνδεσης του δικτύου.

Με βάση την επισκόπηση της βιβλιογραφίας διαπιστώνεται ότι υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις, που θεωρούν την έναρξη του καναλιού ροής εκεί όπου αλλάζει ο μηχανισμός διάβρωσης της λεκάνης απορροής. Σύμφωνα με τους Tarboton *et al.* (1991), το κρίσιμο σημείο που καθορίζει την έναρξη ροής εντοπίζεται κατά την μετάβαση του προφίλ

⁵ Στις αναλύσεις της εργασίας, επιλέγεται εμπειρικά κατώφλι 1 km² ανάντη έκταση λεκάνης.

τοπογραφίας από κυρτό σε κοίλο στο γράφημα τοπικής κλίσης – έκτασης της ανάντη συμβάλλουσας λεκάνης για κάθε σημείο του ΨΜΕ. Στην εν λόγω υπόθεση, η κυρτή τοπογραφία αντικατοπτρίζει μια διάχυτη διαδικασία διάβρωσης (diffusive erosion), όπου η κλίση στο γράφημα είναι θετική ($dS/dA > 0$), ενώ στο κοίλο μέρος, όπου εντοπίζεται η ποτάμια απόθεση (fluvial erosion), η κλίση είναι αρνητική ($dS/dA < 0$), όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 4.6**. Ουσιαστικά, οι Tarboton *et al.* (1991) ισχυρίζονται ότι η αλλαγή της κλίσης του γραφήματος αποτελεί ένα κατώτατο όριο, το οποίο εκφράζει μια μέση έκταση της ανάντη λεκάνης απορροής που απαιτείται για το σχηματισμό υδατορεύματος στο ΨΜΕ.

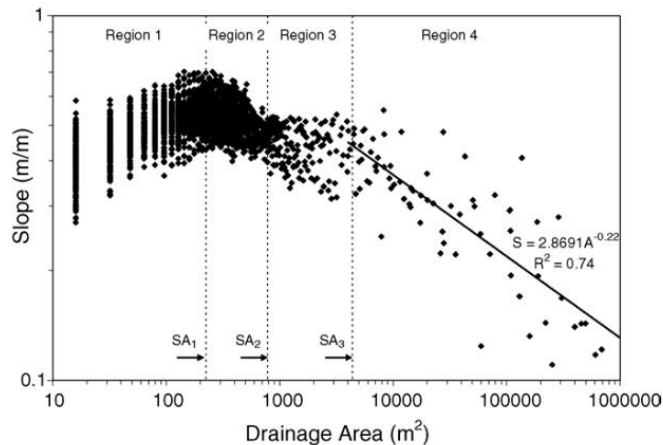


Εικόνα 4.6. Σχέση της κλίσης-έκτασης ανάντη συμβάλλουσας περιοχής σε λογαριθμική κλίμακα. Η διακεκομμένη γραμμή αναπαριστά την μετάβαση από διάχυτες διαδικασίες διάβρωσης στα αριστερά, σε ποτάμια, στα δεξιά (Πηγή: Cohen *et al.*, 2008).

Μια άλλη προσέγγιση είναι αυτή των Montgomery & Dietrich (1992) και Montgomery & Foufoula-Georgiou (1993), οι οποίοι υποστηρίζουν ότι η απαιτούμενη ανάντη έκταση για την διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου δεν είναι σταθερή σε όλη την λεκάνη απορροής, αλλά εξαρτάται από την τοπική κλίση. Για τον λόγο αυτό, πρότειναν την χρήση εμπειρικών σχέσεων κλίσης-έκτασης της ανάντη λεκάνης, στις οποίες χρησιμοποιούν ορισμένες παραμέτρους που σχετίζονται με την ένταση της βροχόπτωσης, τη διαπερατότητα, την πυκνότητα και την γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους. Ωστόσο στην ίδια φιλοσοφία, έχουν διατυπωθεί και ποικίλες άλλες έρευνες και μοντέλα για την διάκριση έναρξης της ροής, όπως για παράδειγμα η χρήση της υψογραφικής καμπύλης ή και του δείκτη ροής ενέργειας, θεωρώντας διαφορετική κατανομή διάχυσης ενέργειας εκεί όπου το κανάλι είναι καλά διαμορφωμένο από ότι εκεί όπου συντελείται η χερσαία ροή. Στην τελευταία αυτή προσέγγιση, η λεκάνη προσεγγίζεται ως ένα σύστημα διασκόρπισης ενέργειας που εκτονώνεται προχωρώντας στα κατόντη, και στο οποίο η αποφόρτιση της μάζας και της ενέργειας (συναρτήσει της κλίσης και της έκτασης της ανάντη συμβάλλουσας περιοχής) διαφοροποιεί τα καθεστώτα διάβρωσης.

Σε μια ενδιαφέρουσα έρευνα των McNamara *et al.* (2006), το γράφημα της τοπικής κλίσης-ανάντη έκτασης αποστράγγισης χωρίζεται σε τέσσερις περιοχές, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.7**. Στο γράφημα αυτό, η 1^η περιοχή αποτελεί ένδειξη κυρτής τοπογραφίας, με την κλίση να αυξάνεται κατά την αύξηση της ανάντη έκτασης, η 2^η περιοχή συνεπάγεται κοίλο

έδαφος με την κλίση να μειώνεται σε σχέση με την ανάντη έκταση, στην 3^η περιοχή παρατηρείται μια σταθερότητα, ενώ στην 4^η περιοχή ορίζεται μια εξίσωση δύναμης που διέπει την σχέση των δύο μεγεθών. Σύμφωνα με τους McNamara *et al.* (2006), η έναρξη του υδατορεύματος εντοπίζεται στην δεύτερη περιοχή, και ειδικότερα εκεί όπου γίνεται η μετάβαση από τη μη γραμμική σχέση των μεγεθών, δηλαδή την 1^η περιοχή, όπου κυριαρχούν οι διάχυτες διαδικασίες διάβρωσης που τείνουν να στρογγυλεύουν και να λειάνουν το ανάγλυφο (πτώση σταγόνας στο έδαφος, ερπυσμός εδάφους, κτλ.), σε γραμμική, με μείωση της κλίσης συναρτήσει της ανάντη έκτασης.



Εικόνα 4.7. Γράφημα τοπικής κλίσης-έκτασης ανάντη περιοχής αποστράγγισης ΨΜΥ (Πηγή: McNamara *et al.*, 2006).

4.5. Μέγιστη υδραυλικά διαδρομή ροής (Longest Flow Path)

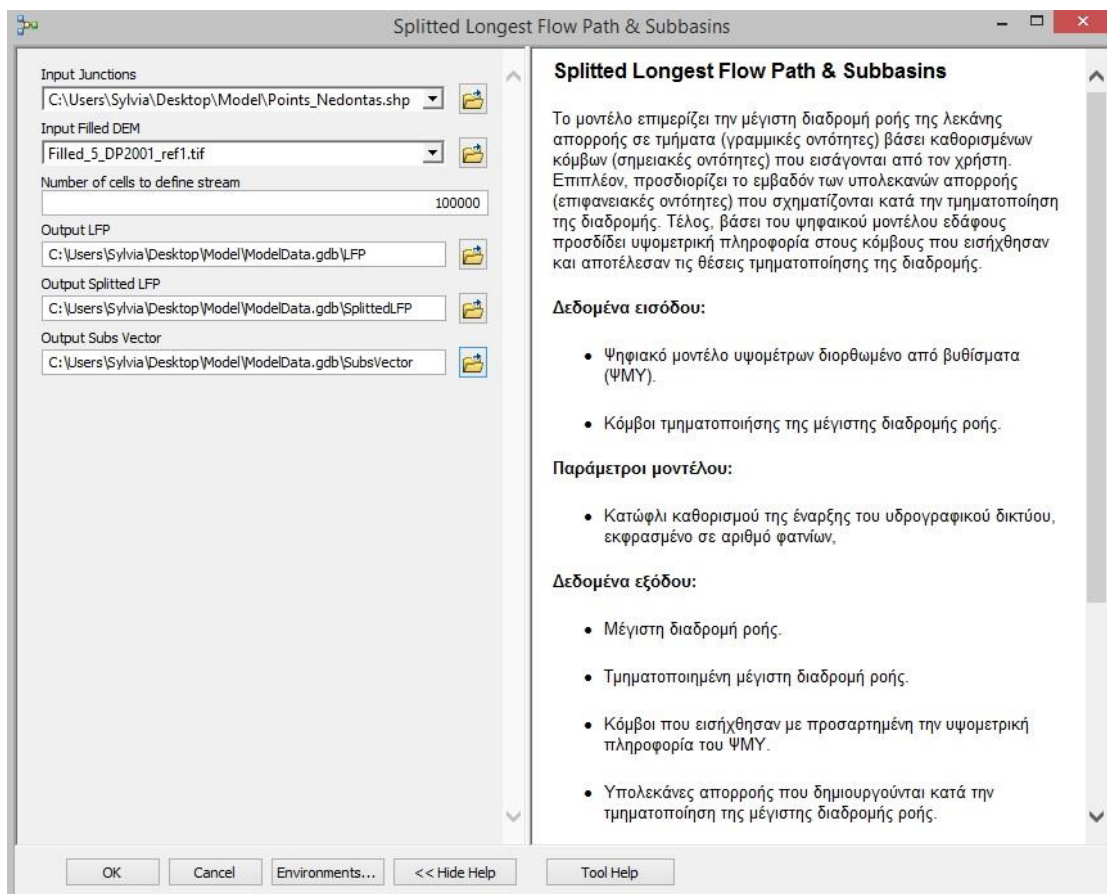
Το μήκος ροής μετριέται κατά μήκος της διεύθυνσης ροής και αναφέρεται στην διαδρομή που θα ακολουθήσει μια σταγόνα που κατακρημνίζεται στην λεκάνη μέχρι το σημείο εξόδου της. Υποθέτοντας μια σταθερή ταχύτητα ροής, το φατνίο με την μεγαλύτερη διαδρομή ροής προς την έξοδο της λεκάνης αντιπροσωπεύει το υδραυλικά πιο απομακρυσμένο σημείο της. Η μέγιστη αυτή διαδρομή έχει ιδιαίτερη σημασία κατά την υδρολογική ανάλυση, καθώς σε συνδυασμό με την ταχύτητα ροής, που είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων, ποσοτικοποιεί το διάστημα που απαιτείται, μέχρι ολόκληρη η λεκάνη να συμβάλλει στην απορροή, που ρέει στην έξοδο. Επομένως, η μέγιστη υδραυλικά διαδρομή αποτελεί ένα μέγεθος, αντιπροσωπευτικό του χρόνου απόκρισης της λεκάνης και συνδέεται έμμεσα με την παροχή σχεδιασμού στο σημείο εξόδου της.

Στο λογισμικό ArcGIS, ο καθορισμός της μέγιστης υδραυλικά διαδρομής ροής ακολουθεί την εξής συλλογιστική: Το μήκος ροής για κάθε φατνίο υπολογίζεται από το άθροισμα των στοιχειωδών αποστάσεων από κέντρο σε κέντρο του κάθε φατνίου, στην διεύθυνση που καθορίζει ο κানাβος της διεύθυνσης ροής (flow direction). Ο υπολογισμός της διαδρομής ροής πραγματοποιείται κατά την κατάντη κατεύθυνση (downstream flow length), οπότε, σε αυτή την περίπτωση, το σημείο εξόδου της λεκάνης θα λάβει μια μέγιστη τιμή και τα σημεία στον υδροκρίτη μηδενικές τιμές, και κατά την ανάντη κατεύθυνση (upstream flow length), όπου το σημείο εξόδου λαμβάνει την τιμή μηδέν και κάποιο σημείο στον υδροκρίτη την μέγιστη αυτή τιμή, που δόθηκε στην έξοδο στον κানাβο της κατάντη

κατεύθυνσης. Το άθροισμα των δύο αυτών κανάβων δημιουργεί ένα πλέγμα με επαυξημένα μήκη ροής, όπου η τιμή σε κάθε φατνίο περιέχει το άθροισμα των αποστάσεων του από την έξοδο και από τον υδροκρίτη. Τα φατνία που έχουν την ίδια μέγιστη τιμή, με αυτή που προσδιορίστηκε από τους δύο κανάβους κατάντη και ανάντη της διαδρομής ροής, βρίσκονται κατά μήκος της μεγαλύτερης διαδρομής ροής στο ΨΜΕ.

4.6. Αυτοματοποιημένη εκτέλεση εντολών μέσω του Model Builder

Η αυτοματοποίηση μιας σειράς διαδικασιών χωρικής ανάλυσης σε ένα ενιαίο μοντέλο μπορεί να επιτευχθεί μέσω της εφαρμογής Model Builder, του λογισμικού ArcGIS, τα πεδία της οποίας φαίνονται στην **Εικόνα 4.8**. Ουσιαστικά, πρόκειται για την δημιουργία ενός εργαλείου χωρικής ανάλυσης, το οποίο ενσωματώνει με την μορφή διαγράμματος (workflow) μια ακολουθία εντολών επεξεργασίας, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από άλλους χρήστες και για άλλα δεδομένα. Στα πλεονεκτήματα της χρήσης του Model Builder αναφέρονται ο εύληπτος τρόπος διαχείρισης δεδομένων και εποπτείας των υπολογιστικών διαδικασιών, η εισαγωγή παραμέτρων και η επισκόπηση της επιρροής τους στο εξαγόμενο προϊόν και, τέλος η μείωση του υπολογιστικού φόρτου, ιδιαιτέρως σε περιπτώσεις αναπαραγωγής του μοντέλου επαναληπτικά.



Εικόνα 4.8. Πεδία συμπλήρωσης του εργαλείου *Splitted Longest Flow Path & Subbasins* στο περιβάλλον ArcGIS.

Η εκτέλεση των διαδοχικών βημάτων που απαιτούνται για την τμηματοποίηση της μέγιστης διαδρομής ροής και τον υπολογισμό της έκτασης των επιμέρους σχηματιζόμενων

υπολεκανών απορροής, αυτοματοποιείται στο εργαλείο Splitted Longest Flow Path & Subbasins, χρησιμοποιώντας το περιβάλλον του Model Builder. Το μεγαλύτερο μέρος του συνίσταται από εντολές υδρολογικής ανάλυσης του ArcHydro Tool, μιας add-on εφαρμογής του ArcGIS (βλ. Παράρτημα I, σελ. 118). Δεδομένα εισόδου του μοντέλου αποτελούν το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων διορθωμένο από βυθίσματα, σε μορφή raster, και οι κόμβοι τμηματοποίησης της μέγιστης διαδρομής ροής, σε μορφή vector (σημειακά στοιχεία). Ως παράμετρος εισόδου ορίζεται ο αριθμός των φατνίων για καθορισμό έναρξης της ροής στο υδρογραφικό δίκτυο, ενώ στα δεδομένα εξόδου του περιλαμβάνονται η μέγιστη διαδρομή ροής, σε δύο γραμμικά αρχεία τύπου vector, υπό συνεχή μορφή και τμηματοποιημένη, και οι σχηματιζόμενες υπολεκάνες απορροής. Ακόμη, κατά την εκτέλεση του εν λόγω εργαλείου, προσδίδεται η υψομετρική πληροφορία του ΨΜΥ, στους κόμβους που εισάγονται από τον χρήστη και αποτελούν τις θέσεις τμηματοποίησης.

Μια ακόμη αυτοματοποίηση που εκπληρώθηκε μέσω του Model Builder αφορά στα βήματα υπολογισμού του συντελεστή παρεμπόδισης για την πιο ανάντη υπολεκάνη, στην οποία συντελείται η επίγεια ροή. Η τιμή του προσδιορίστηκε ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των επιφανειακών οντοτήτων που απαρτίζουν την υπολεκάνη και χαρακτηρίζονται από μια χρήση γης, καθορισμένης τιμής του συντελεστή. Στον **Πίνακα 4.1** γίνεται η αντιστοίχιση των χρήσεων γης καθορισμένου κωδικού, με τον συντελεστή παρεμπόδισης k (m/s), βάσει των τιμών της βιβλιογραφίας του **Πίνακα 2.2** (βλ. Κεφάλαιο 2, σελ. 24).

Πίνακας 4.1. Αντιστοίχιση τιμών συντελεστή παρεμπόδισης με τις χρήσεις γης του Corine Land Cover 2000.

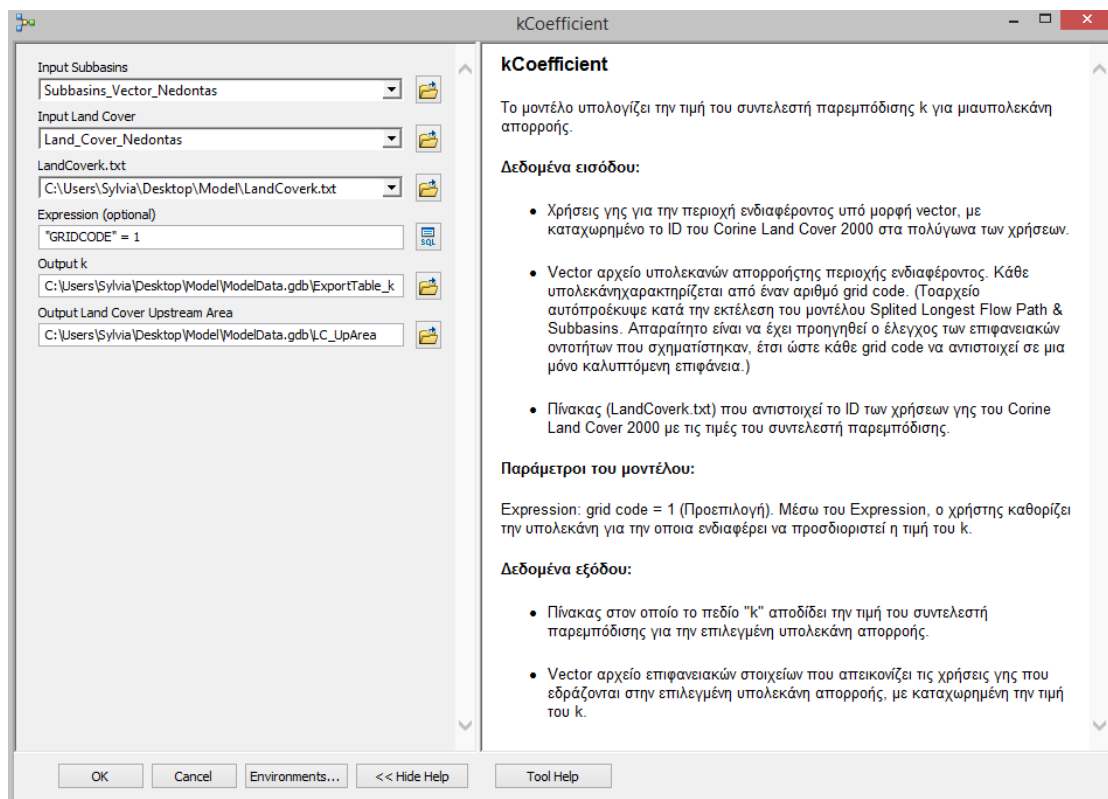
| Κατηγορίες Κάλυψης Corine 2000 | Κωδικός | k (m/s) |
|---|---------|-----------|
| Συνεχής αστική οικοδόμηση | 111 | 6,34 |
| Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση | 112 | 6,22 |
| Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες | 121 | 6,22 |
| Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα | 122 | 6,34 |
| Ζώνες Λιμένων | 123 | 6,34 |
| Αεροδρόμια | 124 | 6,34 |
| Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη | 211 | 1,46 |
| Μόνιμα αρδευόμενη γη | 212 | 2,75 |
| Οπωροφόρα δέντρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς | 222 | 2,75 |
| Ελαιώνες | 223 | 2,75 |
| Βοσκοτόπια | 231 | 2,13 |
| Ετήσιες μόνιμες καλλιέργειες | 241 | 2,75 |
| Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας | 242 | 2,75 |
| Γη καλυπτόμενη από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης | 243 | 1,55 |
| Δάσος πλατύφυλλων | 311 | 1,55 |
| Δάσος κωνοφόρων | 312 | 1,55 |
| Μικτό δάσος | 313 | 0,76 |
| Θάμνοι και χερσότοποι | 322 | 2,13 |
| Σκληροφυλλική βλάστηση | 323 | 1,55 |
| Μεταβατικές δασώσεις – θαμνώδεις εκτάσεις | 324 | 1,55 |
| Απογυμνωμένοι βράχοι | 332 | 3,07 |
| Εκτάσεις με αραιή βλάστηση | 333 | 1,46 |

Ο μέσος όρος της τιμής του k για την ανάντη υπολεκάνη, χρησιμοποιώντας ως βάρη την έκταση των μεμονωμένων χρήσεων, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (4.2)$$

όπου n το πλήθος των πολύγωνων διαφορετικών χρήσεων γης που απαρτίζουν την ανάντη λεκάνη, k ο συντελεστής παρεμπόδισης της ανάντη λεκάνης που συντελείται η επίγεια ροή, A_i τα εμβαδά των διαφορετικών χρήσεων γης (m^2), και k_i οι τιμές του συντελεστή που χαρακτηρίζουν τις επιμέρους χρήσεις γης.

Το σύνολο των διαδοχικών εντολών αυτοματοποιείται στο εργαλείο kCoefficient, τα πεδία συμπλήρωσης του οποίου περιγράφονται στην **Εικόνα 4.9**.



Εικόνα 4.9. Πεδία συμπλήρωσης του εργαλείου kCoefficient στο περιβάλλον του ArcGIS.

Δεδομένα εισόδου του εργαλείου kCoefficient αποτελούν το αρχείο χρήσεων γης της περιοχής ενδιαφέροντος, υπό μορφή vector με καταχωρημένο τον κωδικό των χρήσεων γης του Corine Land Cover 2000, ο Πίνακας 4.1 στον οποίο δίνεται η αντιστοιχία των τιμών του συντελεστή παρεμπόδισης k με τον κωδικό των χρήσεων γης, και οι υπολεκάνες απορροής της περιοχής σε vector μορφή, κάθε μια εκ των οποίων χαρακτηρίζεται από έναν μοναδικό αριθμό grid code. Παράμετρος του μοντέλου επιλέγεται να είναι ο καθορισμός του grid code, δηλαδή του αριθμού της υπολεκάνης για την οποία επιδιώκεται ο προσδιορισμός του k . Πρακτικά, αυτό γίνεται με σκοπό να μπορεί ο χρήστης με

τροποποίηση της παραμέτρου, να υπολογίσει την τιμή του συντελεστή σε οποιαδήποτε λεκάνη επιθυμεί. Με την εκτέλεση του εργαλείου αποδίδονται, ένας πίνακας στον οποίο το πεδίο με το όνομα “ k ” περιλαμβάνεται η τιμή του συντελεστή παρεμπόδισης για την επιλεγμένη υπολεκάνη και ένα vector αρχείο επιφανειακών στοιχείων που απεικονίζει τις χρήσεις γης που εδράζονται στην επιλεγμένη υπολεκάνη, για τυχόν περαιτέρω ανάλυση και εποπτεία από τον χρήστη. Η διαδικασία που εκτελείται (βλ. Παράρτημα I, σελ. 119) περιλαμβάνει την σύνδεση των τιμών του k με τις χρήσεις γης της περιοχής, την απομόνωση των χρήσεων γης της υπολεκάνης για την οποία ενδιαφέρει η τιμή του k , σε ένα vector αρχείο, και τον υπολογισμό της μέσω μιας επεξεργασίας του πίνακα του αρχείου.

5. ΛΕΚΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

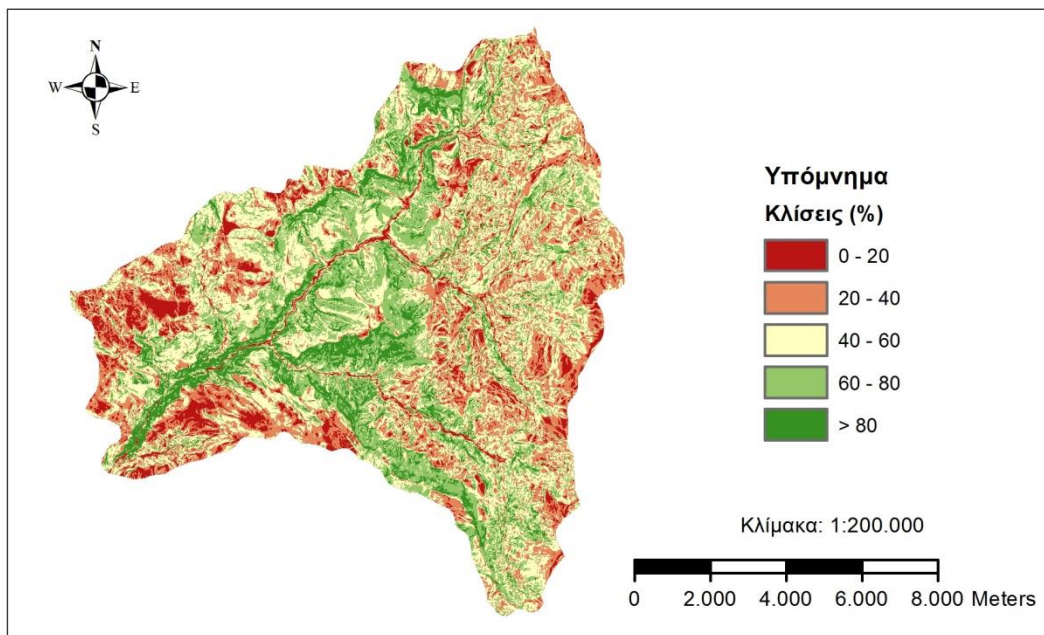
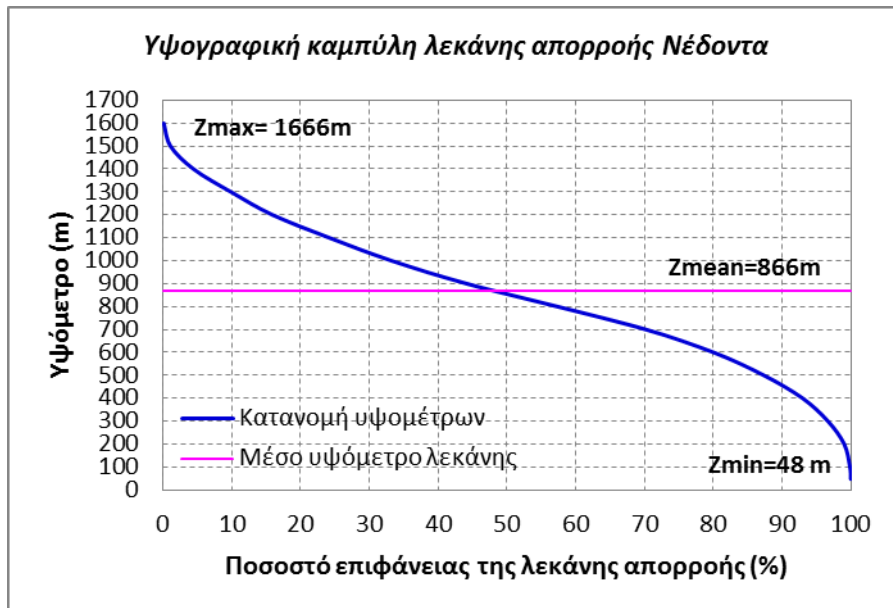
Η λεκάνη απορροής αποτελεί ένα σύστημα μετασχηματισμού των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σε υδρογραφήματα απορροής (άμεση και βασική απορροή) και χαρακτηρίζεται από τα φυσιογραφικά της γνωρίσματα, τα οποία επηρεάζουν την διαδικασία του μετασχηματισμού. Η γνώση των χαρακτηριστικών της λεκάνης είναι αναπόσπαστο κομμάτι της μελέτης απόκρισής της στις υδρομετεωρολογικές διεργασίες, και αναφέρεται στα μορφολογικά (γεωμετρία, ανάγλυφο, υδρογραφικό δίκτυο) και εδαφολογικά χαρακτηριστικά (είδος, σύσταση και ιδιότητες εδαφών), καθώς και τις χρήσεις γης (φυτοκάλυψη, αστική χρήση), που καλύπτουν την έκταση της. Στην συνέχεια, ακολουθεί μια περιγραφή των χαρακτηριστικών αυτών, για κάθε μία από τις λεκάνες απορροής που μελετήθηκαν.

5.1. Λεκάνη απορροής Νέδοντα

Ο ποταμός Νέδοντας ή Νέδωνας ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Πελοποννήσου (GR01), και διέρχεται από την Καλαμάτα, πρωτεύουσας του Νομού Μεσσηνίας. Πηγάζει από τις δυτικές κλιτύες του Ταΰγετου και εκβάλλει στον Μεσσηνιακό Κόλπο, δυτικά του λιμανιού της Καλαμάτας, με συνολικό μήκος 26 km. Στην λεκάνη έχει αναπτυχθεί μετρητικό δίκτυο που αποτελείται από μετεωρολογικούς και υδρομετρικούς σταθμούς. Η διατομή εξόδου της λεκάνης επιλέχθηκε ανάντη της αστικής περιοχής και ειδικότερα στον υδρομετρικό σταθμό Νέδοντα, στο Λατομείο Μπάκα, όπου στα κατάντη του, η διατομή είναι διευθετημένη. Η εν λόγω λεκάνη απορροής ενδείκνυται για μελέτη, καθώς δεν εντοπίζονται έργα που θα μπορούσαν να μεταβάλλουν την υδρολογική της δίαιτα (π.χ. φράγματα, εκτροπές, λιμνοδεξαμενές). Ένας ακόμη παράγοντας ενίσχυσης της επιλογής της είναι το γεγονός ότι η πλημμυρική απορροή είναι κυρίως επιφανειακή και συντελείται μέσω του καλά διαμορφωμένου υδρογραφικού δικτύου, με σχετικά ευθύγραμμες διατομές, τουλάχιστον στις θέσεις χωροθέτησης των υπαρχόντων υδρομετρικών σταθμών. Τα μετεωρολογικά στοιχεία που συλλέγονται από σταθμό του αεροδρομίου στα 6 km δυτικά της Καλαμάτας παρέχουν πληροφορία για το υδατικό δυναμικό της περιοχής, το οποίο χαρακτηρίζεται από βροχοπτώσεις 600 mm στα νότια του Νομού Μεσσηνίας (Φοινικούντα – Μεθώνη), 1500 mm στα ορεινά και 800-1200 mm στις κεντρικές, βόρειες πεδινές και ημιορεινές περιοχές. Τα διαθέσιμα χωρικά δεδομένα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την λεκάνη απορροής, αφορούσαν την υψομετρική πληροφορία, δομημένη σε ένα δίκτυο τετραγωνικού πλέγματος ανάλυσης 5 m, τις χρήσεις γης (Corine 2000), το γεωλογικό υπόβαθρο και τις θέσεις χωροθέτησης των μετρητικών σταθμών.

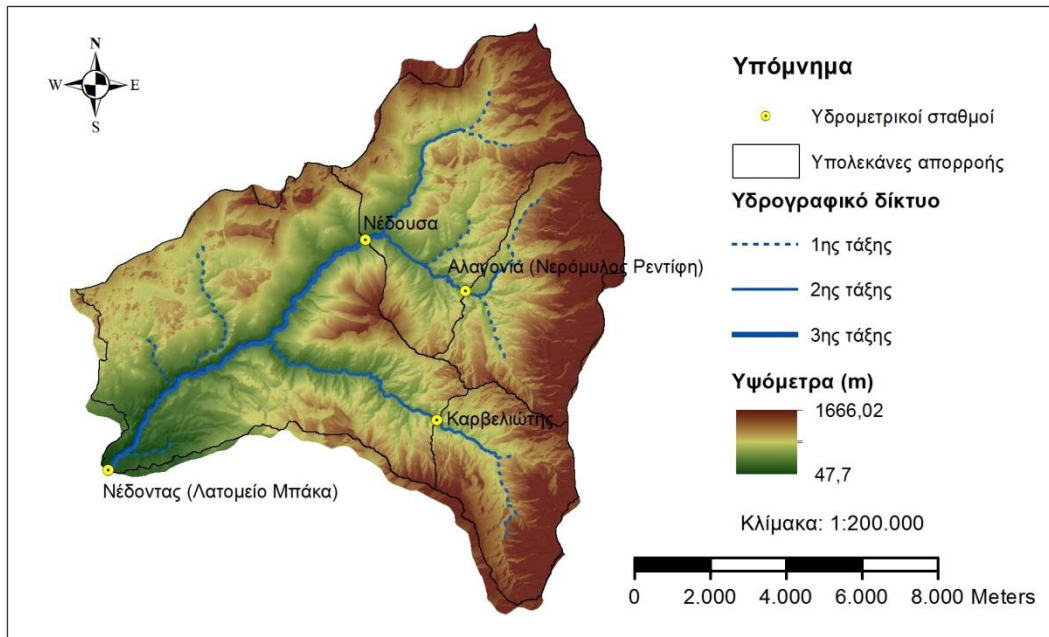
Γεωμετρία – Ανάγλυφο

Η οριοθέτηση της λεκάνης από τον υδροκρίτη της καθορίζει το εμβαδόν της στα 114,8 km². Στην **Εικόνα 5.1** παρουσιάζεται η υψογραφική καμπύλη, με βασικά χαρακτηριστικά το ελάχιστο (48 m), μέσο (863 m) και μέγιστο (1666 m) υψόμετρο. Μια ακόμη παράμετρος που διαμορφώνει το ανάγλυφο της λεκάνης και επηρεάζει τις διεργασίες βροχής-απορροής είναι η κλίση. Όπως παρατηρείται στην **Εικόνα 5.2**, η λεκάνη χαρακτηρίζεται από έντονες κλίσεις, με μία μέση τιμή της τάξης του 49%.



Υδρογραφικό δίκτυο

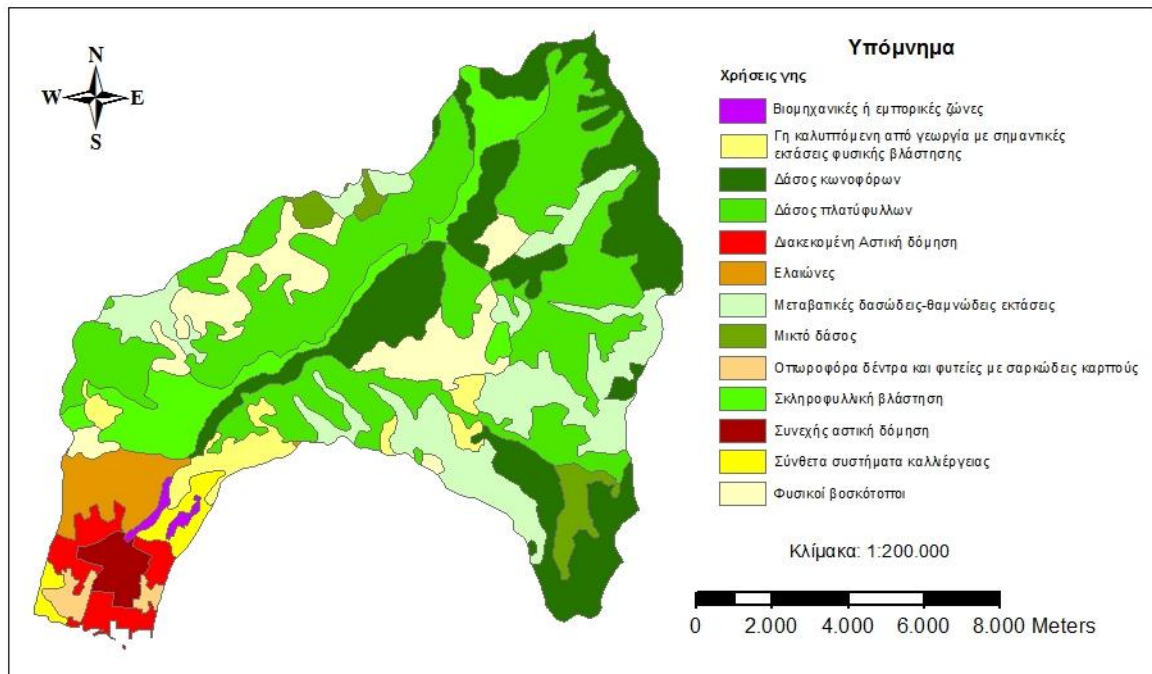
Στο υδρογραφικό δίκτυο του Νέδοντα αναπτύσσονται τρεις κύριοι παραπόταμοι (Νέδουσα, ρέμα Αλαγονίας, Καρβελιώτης). Οι δύο πρώτοι σχηματίζουν τον άνω ρου του ποταμού, ενώ ο τρίτος διαρρέει το νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης (**Εικόνα 5.3**).



Εικόνα 5.3. Υδρογραφικό δίκτυο και υδρομετρικοί σταθμοί της λεκάνης του Νέδοντα.

Χρήσεις γης

Το ψηφιακό μοντέλο των χρήσεων γης προήλθε από το Corine Land Cover 2000, λόγω έλλειψης πιο πρόσφατων δεδομένων στον ελληνικό χώρο. Στην **Εικόνα 5.4** παρουσιάζονται οι χρήσεις γης για την υπό μελέτη λεκάνη.



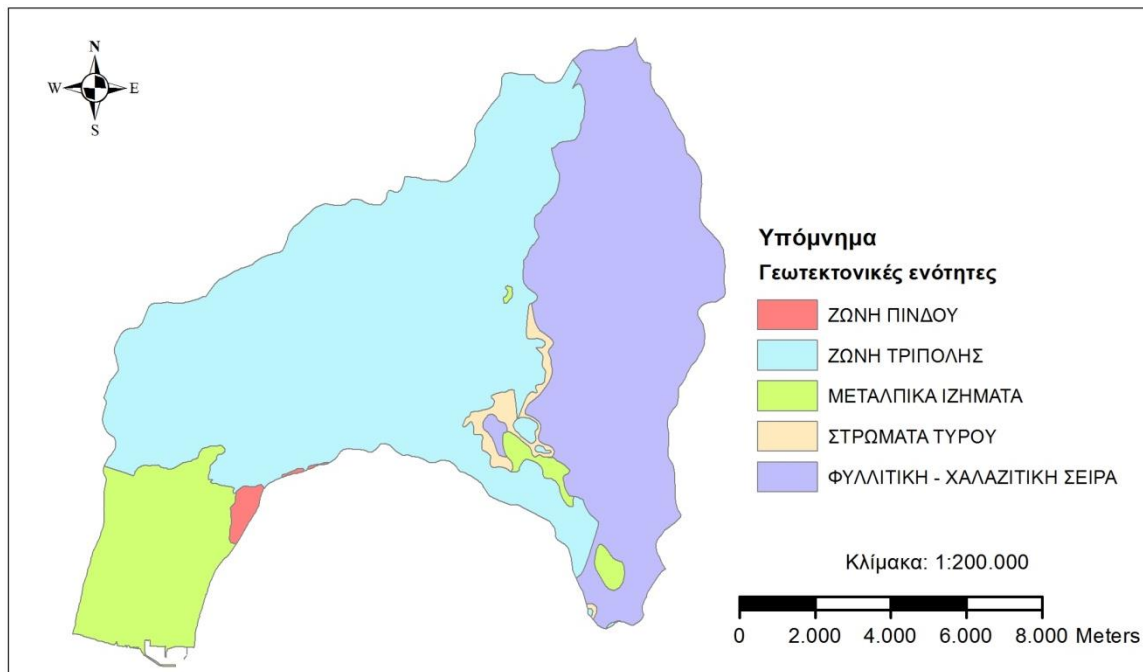
Εικόνα 5.4. Χρήσεις γης στην λεκάνη του Νέδοντα.

Γεωλογία

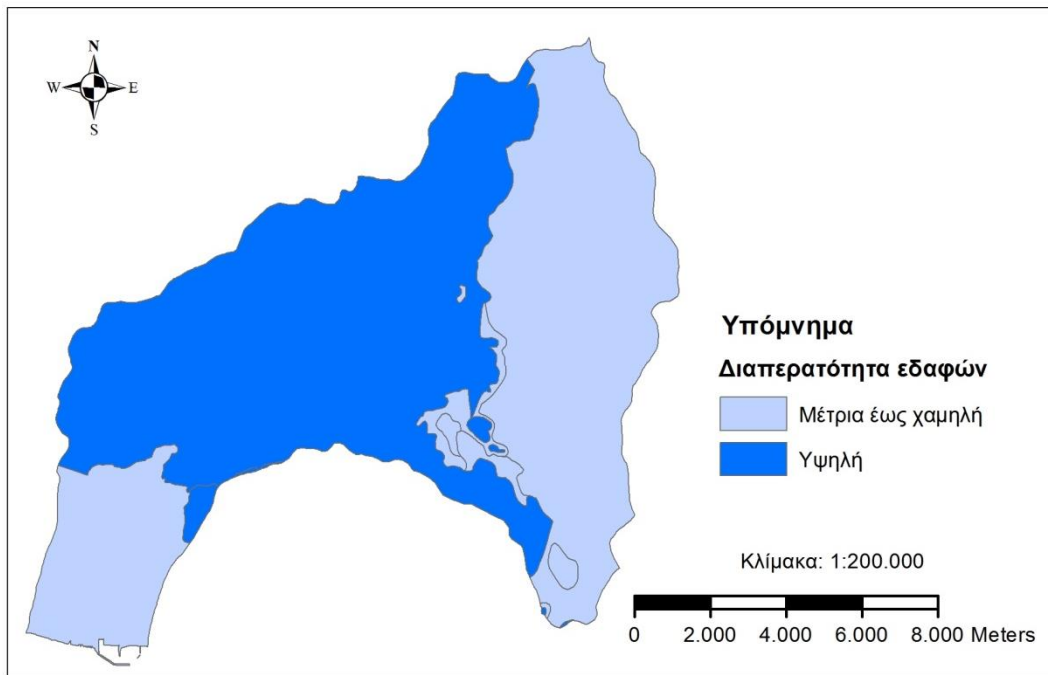
Στο πεδινό και ημιορεινό ανάγλυφο της λεκάνης, το γεωλογικό υπόβαθρο σχετίζεται με τις γεωτεκτονικές ενότητες Τρίπολης και Πίνδου, καθώς και τα στρώματα Τύρου και

Μεταλλικά, ενώ το ορεινό της μέτωπο δομείται από σχηματισμούς φυλλιτικής–χαλαζιτικής σειράς (**Εικόνα 5.5**). Βάσει της σύνδεσης των γεωτεκτονικών ενοτήτων με την ηλικία και την σύσταση των πετρωμάτων, στο μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης κυριαρχεί η ύπαρξη ασβεστολιθικών σχηματισμών, ενώ στο ορεινό τμήμα συναντώνται ανθρακικά ιζήματα (Πέρμιου, Κατώτερου Τριαδικού) και μικριτικοί ασβεστόλιθοι εναλλασσόμενοι με αργιλικούς σχιστόλιθους. Ως πορώδες μέσο, το ασβεστολιθικό πέτρωμα είναι επιρρεπές στην διάβρωση λόγω της βροχόπτωσης και του χιονιού, κυρίως κατά μήκος της κύριας μισγάγγειας και των παραποτάμων, ενώ παράλληλα ευνοεί τον εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων.

Στην **Εικόνα 5.6** παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση του ρυθμού διήθησης των εδαφών σε υψηλό (Κατηγορία Α), σε μέσο έως μικρό ρυθμό (Κατηγορίες Β και C) και σε πολύ μικρό ρυθμό (Κατηγορία D). Λόγω της μικρής έκτασης που καταλαμβάνουν οι κατηγορίες Β και C, πραγματοποιήθηκε ενοποίηση τους (Ζωγάκης, 2013).



Εικόνα 5.5. Γεωλογικοί σχηματισμοί της λεκάνης του Νέδοντα.



Εικόνα 5.6. Διαπερατότητα γεωλογικών σχηματισμών της λεκάνης του Νέδοντα.

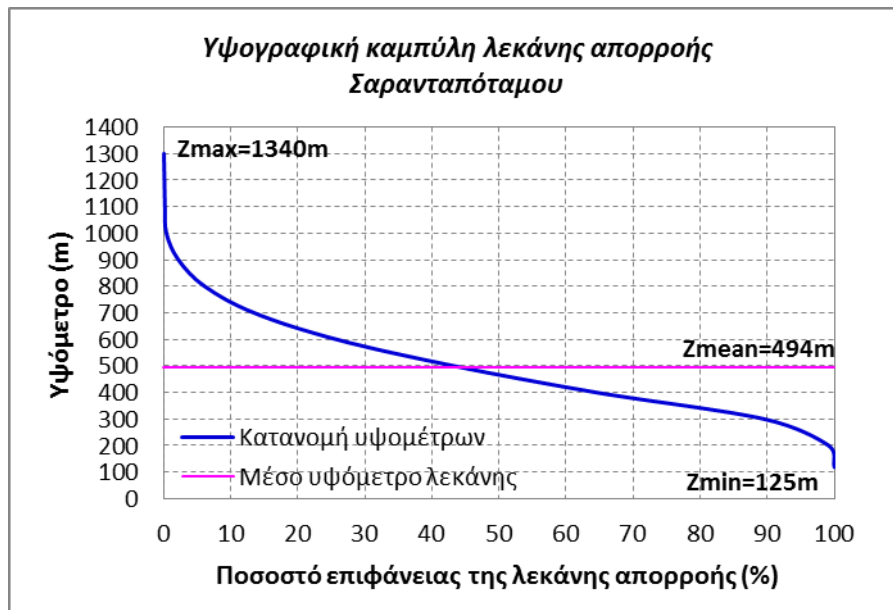
5.2. Λεκάνη απορροής Σαρανταπόταμου

Ο Σαρανταπόταμος ή Ελευσίνιος Κηφισός, που ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Αττικής (GR06), διασχίζει την κοιλάδα της Οινόης και το Θριάσιο Πεδίο, και εκβάλλει στον κόλπο της Ελευσίνας, διαρρέοντας ένα συνολικό μήκος 43 km. Η συνολική έκταση της λεκάνης είναι 310 km² και ορίζεται περιμετρικά από τα όρη Πατέρας και Κιθαιρώνας, στα δυτικά και βορειοδυτικά, αντίστοιχα, και από το όρος Πάστρα και την Πάρνηθα, στα βόρεια και ανατολικά, αντίστοιχα. Η περιοχή μελέτης ορίζεται στο ανάντη τμήμα της λεκάνης του Σαρανταπόταμου, στο οποίο δεν παρατηρείται αστική ανάπτυξη. Η περιοχή διαιρείται σε δύο υπολεκάνες απορροής, τη μία ανάντη της θέσης του υδρομετρικού σταθμού της Οινόης και την άλλη ανάντη της θέσης υδρομέτρησης στη Γύρα Στεφάνης (*Εικόνα 5.7*). Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής της ευρύτερης περιοχής του Θριασίου, κυμαίνεται από 300 mm έως 400 mm ετησίως, ωστόσο στα ανάντη ορεινά τμήματα είναι αρκετά μεγαλύτερο (600 mm). Οι ημέρες υετού κυμαίνονται από 50 έως 100, ενώ το ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 17°C και 19°C, ανάλογα την απόσταση από την θάλασσα και το υψόμετρο (Κουτσογιάννης & Μαμάσης, 2001). Για την μελέτη, διατέθηκαν ένα ΨΜΥ, χωρικής ανάλυσης 25 m, το γεωλογικό βάθρο, το μοντέλο χρήσεων γης Corine 2000, καθώς και η σημειακή πληροφορία χωροθέτησης των υδρομετρικών σταθμών.

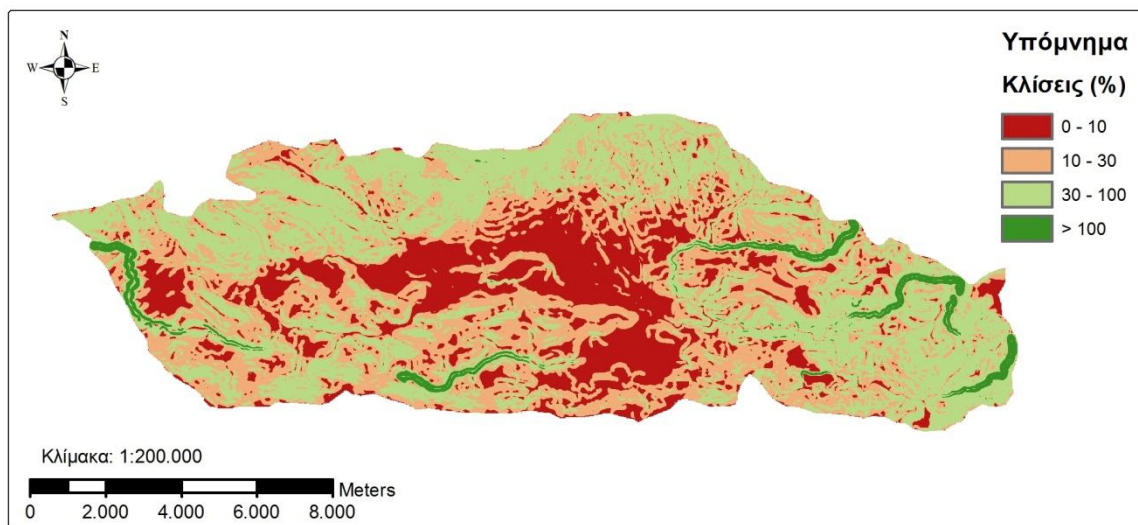
Γεωμετρία – Ανάγλυφο

Η ανάντη λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου που μελετάται έχει έκταση 143,7 km² και χαρακτηρίζεται από ομαλή τοπογραφία με ήπιες κλίσεις και ένα μέσο υψόμετρο 493,5 m. Στην *Εικόνα 4.7* εμφανίζεται η κατανομή των υψομέτρων στην λεκάνη μέσω της υψογραφικής καμπύλης, ενώ στην *Εικόνα 4.8* παρουσιάζεται το ψηφιακό μοντέλο κλίσης της. Στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης, οι κλίσεις κυμαίνονται από 0-30%, και στα ανάντη τμήματα από 30-100%, ενώ εντοπίζονται και λίγες εκτάσεις με κλίσεις μεγαλύτερες του

100%, σε περιοχές που εμφανίζονται φυσικές κοιλότητες του εδάφους. Η μέση κλίση της λεκάνης υπολογίστηκε στα 27%.



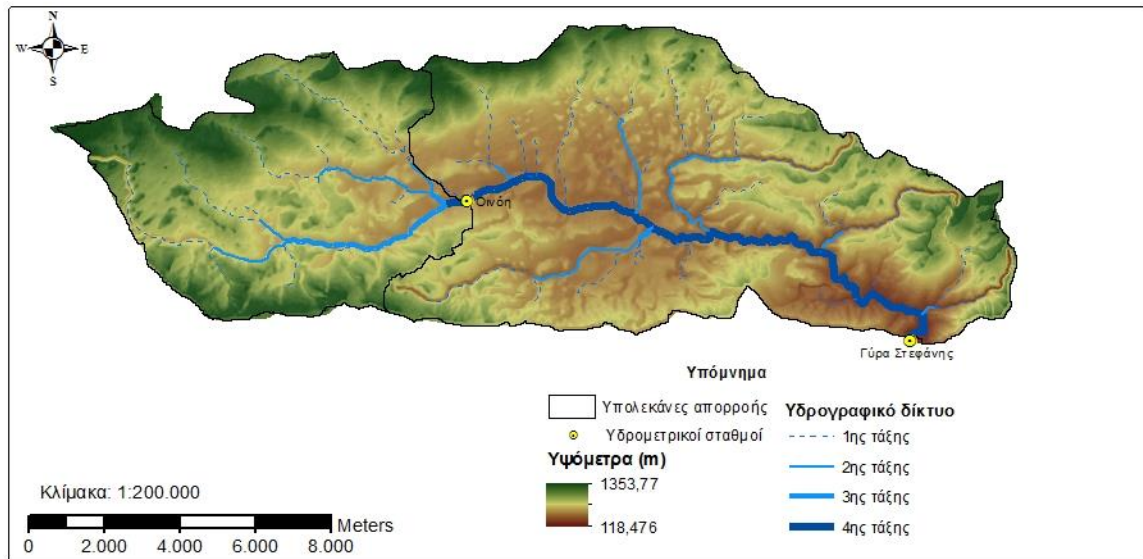
Εικόνα 5.7. Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης του Σαρανταπόταμου.



Εικόνα 5.8. Ψηφιακό μοντέλο κλίσεων της λεκάνης του Σαρανταπόταμου.

Υδρογραφικό δίκτυο

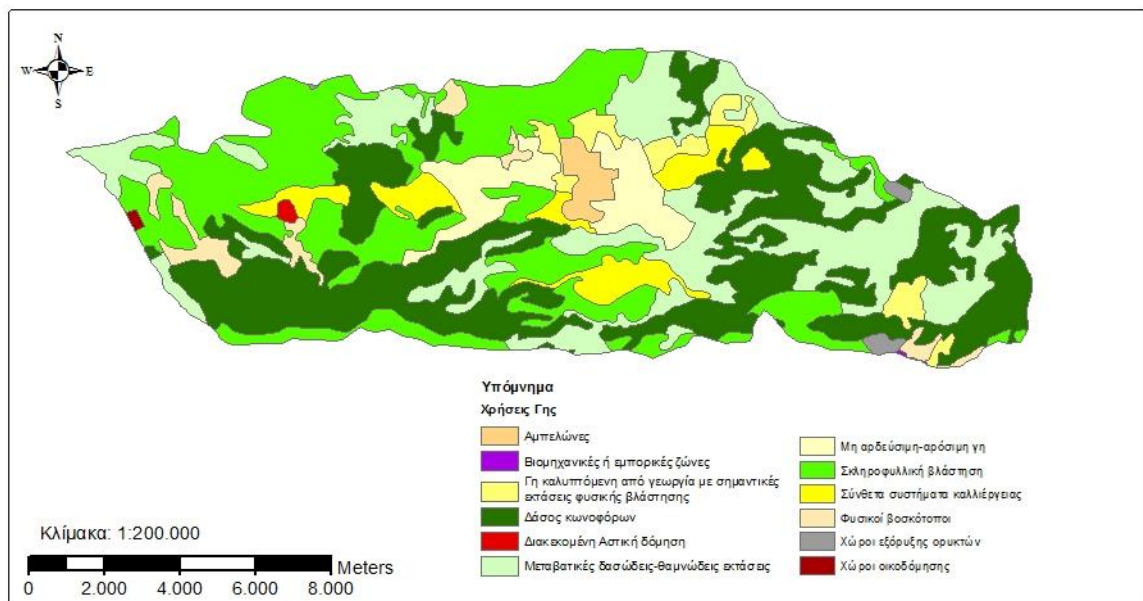
Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης, αν και εμφανίζει υψηλή πυκνότητα, αποτελείται από εποχιακής ροής χείμαρρους, ενώ γενικότερα η περιοχή έχει πληγεί στο παρελθόν από πλημμυρικά επεισόδια. Το δίκτυο καθορίζεται για κατώφλι έναρξης του υδατορεύματος, το 1 km² έκταση ανάντη λεκάνης και διαμορφώνεται σε τέσσερις τάξεις, όπου φαίνεται στην *Εικόνα 5.9*.



Εικόνα 5.9. Υδρογραφικό δίκτυο και υδρομετρικοί σταθμοί της λεκάνης του Σαρανταπόταμου.

Χρήσεις γης

Ομοίως με πριν, και για την λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου χρησιμοποιήθηκε η γεωπληροφορία του Corine Land Cover 2000 και οι χρήσεις γης παρουσιάζονται στην **Εικόνα 5.10**.

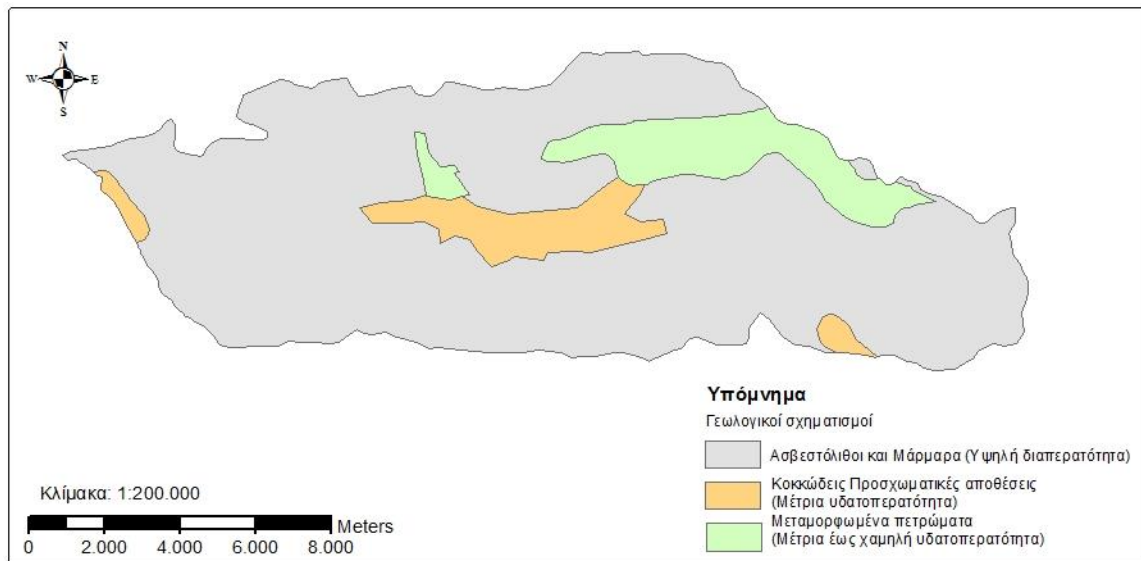


Εικόνα 5.10. Χρήσεις γης στην λεκάνη του Σαρανταπόταμου.

Γεωλογία

Στην υπό μελέτη λεκάνη εντοπίζονται κυρίως ασβεστολιθικοί σχηματισμοί, οι οποίοι υπόκεινται σε καρστική διάβρωση λόγω της κυκλοφορίας και δράσης του νερού (διάλυση του ανθρακικού ασβεστίου) στα διάκενά της. Δεδομένης της κατείδυσης του επιφανειακού νερού μέσω των φυσικών κοιλοτήτων (καρστ), η απορροή της λεκάνης χαρακτηρίζεται ως χειμαρρική ή εφήμερη, δηλαδή δεν υπάρχει βασική απορροή στην λεκάνη και το υδατόρευμα παρουσιάζει ροή μετά από κάποιο γεγονός καταγίδας. Οι

καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι προσδίδουν την ιδιότητα της υψηλής περατότητας στα εδάφη, ενώ οι ασβεστολιθικοί φακοί, οι αργιλικοί σχιστόλιθοι και οι ψαμμίτες ορίζουν τμήματα της λεκάνης, μέτριας και μικρής διαπερατότητας (**Εικόνα 5.11**).



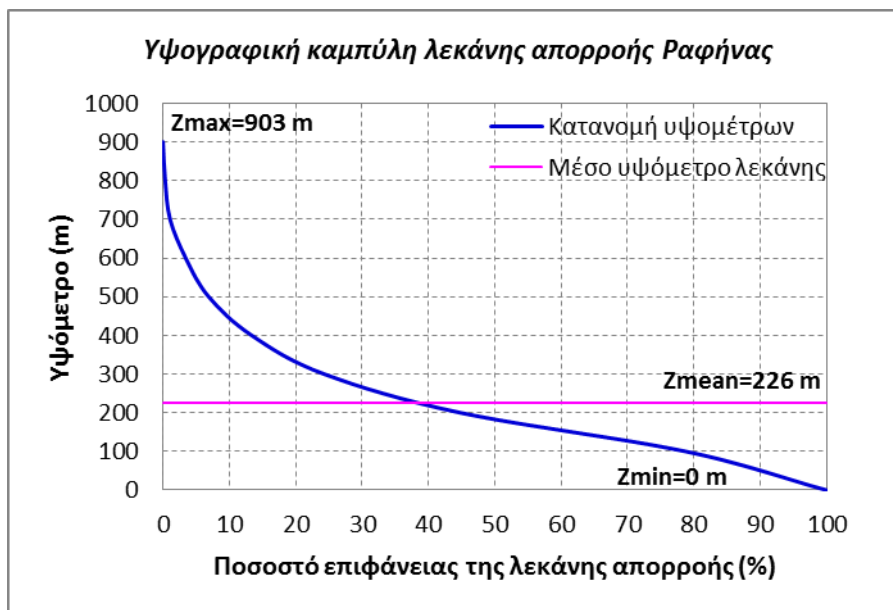
Εικόνα 5.11. Γεωλογικοί σχηματισμοί της λεκάνης του Σαρανταπόταμου.

5.3. Λεκάνη απορροής ρέματος Ραφήνας

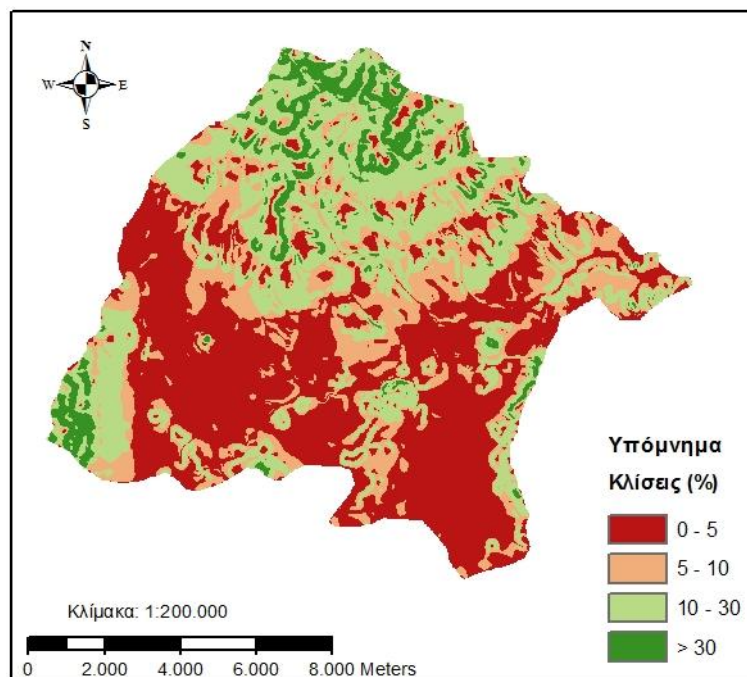
Η λεκάνη απορροής του ρέματος Ραφήνας, που ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Αττικής (GR06), οριοθετείται στα βόρεια και βορειοανατολικά από το Πεντελικό όρος, στα δυτικά και νοτιοδυτικά από τον Υμηττό και στα νότια από τους λόφους Μπούρα και Πετροκορφή. Το κυρίως υδάτινο σώμα της λεκάνης είναι το ρεύμα της Ραφήνας, το οποίο γίνεται αποδέκτης ρεμάτων έντονης κλίσης από την Πεντέλη και ήπιας κλίσης από το πεδινό τμήμα των Σπάτων και αφού διευθετηθεί κοντά στην έξοδο, εκβάλλει στον Νότιο Ευβοϊκό Κόλπο. Γενικότερα, η περιοχή εμφανίζει μέση έως υψηλή επικινδυνότητα σε πλημμυρικά γεγονότα, λόγω των ήπιων κλίσεων και της οικιστικής ανάπτυξης της λεκάνης, καθιστώντας την αντιπλημμυρική προστασία, ανάγκη αδήριτη και επιβεβλημένη. Η καταστροφή του φυτικού ιστού λόγω πυρκαγιών και η μετατροπή των χρήσεων γης σε αστικό περιβάλλον, έχει αυξήσει την πλημμυρική διακινδύνευση, μειώνοντας σημαντικά τους χρόνους υδρολογικής απόκρισης. Η πλημμυρική απορροή της περιοχής είναι κυρίως επιφανειακή μέσω των υδατορευμάτων, τα οποία στην πλειοψηφία τους είναι αδιευθέτητα πλην τμημάτων στα οποία εντοπίζονται τεχνικά έργα και βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή κατοικίες (Μπαριάμης, 2013). Ως προς τα μετεωρολογικά στοιχεία της ευρύτερης περιοχής, αναφέρεται ότι το μέσο ετήσιο ύψος βροχής είναι περίπου 400 mm, ενώ το μέσο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος κυμαίνεται από 11 °C τον χειμώνα και 27 °C το καλοκαίρι. Για την μελέτη της λεκάνης χρησιμοποιήθηκαν το ΨΜΥ, χωρικής ανάλυσης 25 m, οι χρήσεις γης σε διανυσματική μορφή, και η χωροθέτηση των υδρομετρικών σταθμών Λυκόρεμα, Ντράφι, Πικέρμι και Ραφήνα.

Γεωμετρία – Ανάγλυφο

Κατόπιν πλήρωσης των βυθισμάτων προέκυψε το διορθωμένο ΨΜΥ, του οποίου η υψογραφική καμπύλη της **Εικόνας 5.12**, απέδωσε την κατανομή υψομέτρων της λεκάνης. Η συνολική έκταση της λεκάνης προσδιορίστηκε στα 123,3 km², το μέσο υψόμετρο της στα 224 m, ενώ το ελάχιστο στα 0 m της ακτογραμμής και το μέγιστο στα 902 m. Τέλος, όσον αφορά τις κλίσεις στην λεκάνη, παρατηρείται από το ψηφιακό μοντέλο της **Εικόνας 5.13**, ότι το μεγαλύτερο τμήμα της χαρακτηρίζεται από ομαλή τοπογραφία με κλίσεις έως 10% και 10-30%, ενώ σε ορισμένες περιοχές στα ανάντη εντοπίζονται μεγαλύτερες του 30%. Η μέση κλίση της διαμορφώνεται σε περίπου 10%.



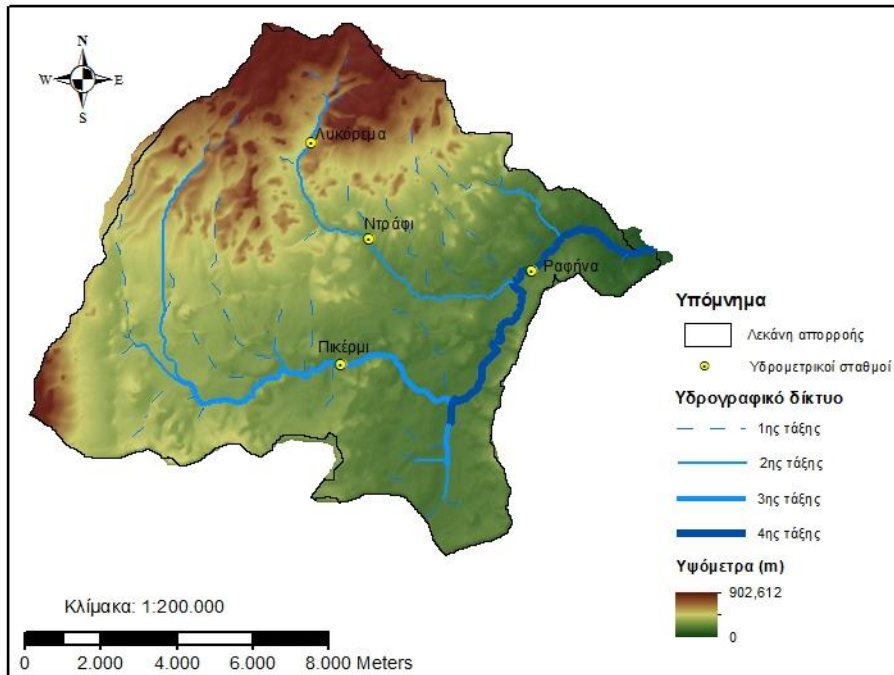
Εικόνα 5.12. Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης του ρέματος Ραφήνας.



Εικόνα 5.13. Ψηφιακό μοντέλο κλίσεων της λεκάνης του ρέματος Ραφήνας.

Υδρογραφικό δίκτυο

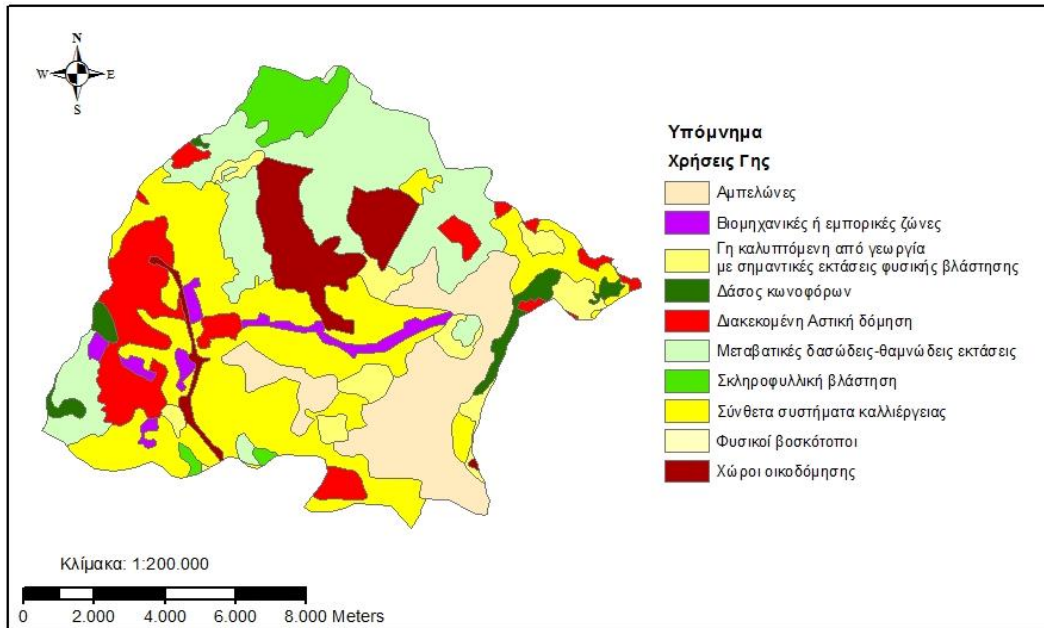
Το υδρογραφικό δίκτυο είναι αρκετά πυκνό στα ανάντη της λεκάνης, όπου το ανάγλυφο είναι πιο έντονο, ενώ λαμβάνοντας υπόψη ως κατώφλι έναρξης του υδρογραφικού δικτύου το 1 km², η ταξινόμηση κατά Strahler καθορίζει την 4^η ως μέγιστη τάξη του δικτύου (*Εικόνα 5.14*).



Εικόνα 5.14. Υδρογραφικό δίκτυο και υδρομετρικοί σταθμοί στη λεκάνης του ρέματος Ραφήνας.

Χρήσεις γης

Στην *Εικόνα 5.15* παρουσιάζονται οι χρήσεις που αναπτύσσονται στη λεκάνης. Όπως διαπιστώνεται, αν και το μεγαλύτερο ποσοστό της έκτασης αναφέρεται σε φυσική βλάστηση και σύνθετα συστήματα καλλιέργειας, εντούτοις σημαντικό μέρος της λεκάνης, κυρίως στα πεδινά τμήματα, καταλαμβάνουν και οι χώροι οικοδόμησης, με αστική δόμηση και βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες.



Εικόνα 5.15. Χρήσεις γης στην λεκάνη του ρέματος Ραφήνας.

Γεωλογία

Ο γεωλογικός χάρτης της **Εικόνας 5.16** δείχνει ότι το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής συντίθεται από σχηματισμούς της αυτόχθονης ενότητας Αλμυροπόταμου–Αττικής και Άνω–Μειοκαινικές αποθέσεις. Όπως παρατηρείται, το βόρειο τμήμα της λεκάνης δομείται από σχιστολιθικούς σχηματισμούς (αδιαπέρατοι), γενέσιους (διαπερατοί) και σε ορισμένα μικρά τμήματα από μάρμαρα (διαπερατοί σχηματισμοί) και το κεντρικό τμήμα από κροκαλοπαγείς σχηματισμούς, που μεταβαίνουν σε λιμναίους (μάργες, αμμούχοι άργιλοι, πηλός), προχωρώντας προς τα νότια (ημιπερατοί). Στα δυτικά, πλησίον του Υμηττού, παρατηρείται η εμφάνιση μαρμάρων, ενώ κατά μήκος της κοίτης του ρέματος, συναντώνται αλλουβιακές ποτάμιες αποθέσεις. Το μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης χαρακτηρίζεται από ημιπερατά πετρώματα, ενώ λόγω τεκτονικής δραστηριότητας στην περιοχή, οι σχιστολιθικοί σχηματισμοί έχουν υποστεί ρηγματώση, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η υδατοπερατότητά της και να ευνοείται η διάβρωση.



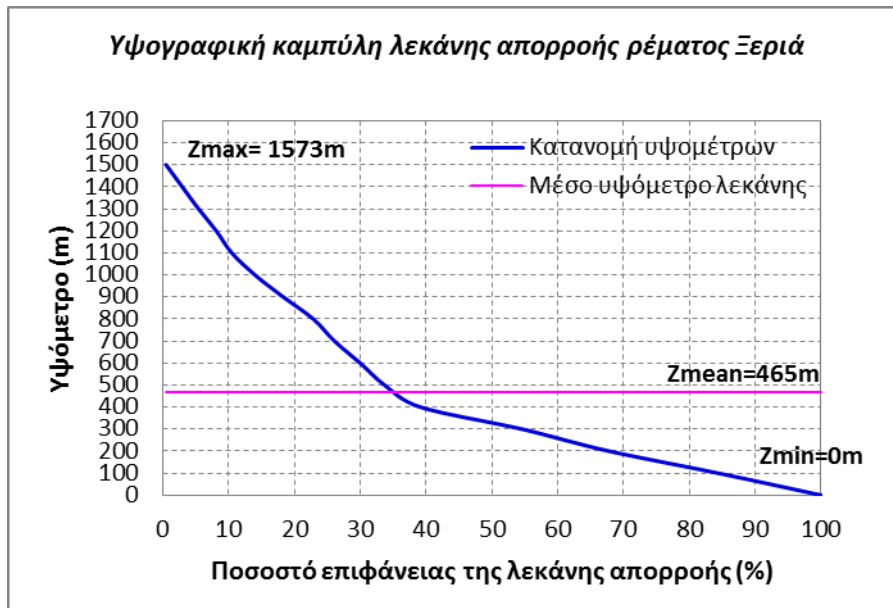
Εικόνα 5.16. Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ρέματος Ραφήνας (Πηγή: Αλωνιστιώτη, 2011).

5.4. Λεκάνη απορροής χειμάρρου Ξεριά

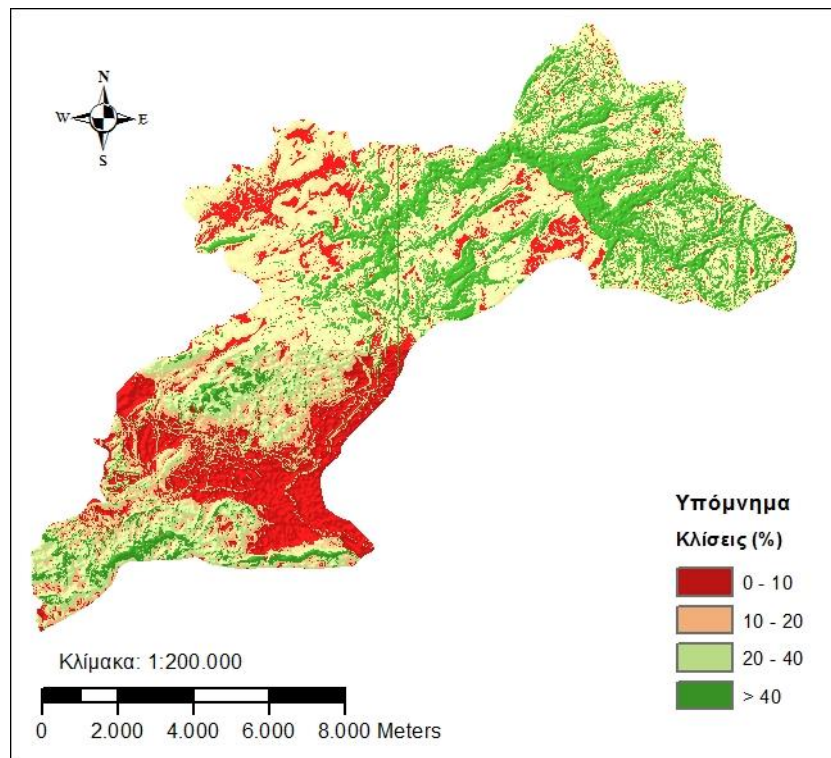
Η λεκάνη απορροής του χειμάρρου Ξεριά (ή Ξηριά), που ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (GR08), πηγάζει από την οροσειρά του Πηλίου, με υψόμετρο 1445 m και εκβάλλει στον Παγασητικό Κόλπο, δυτικά της πόλης του Βόλου, πρωτεύουσας του Νομού Μαγνησίας. Γενικότερα, στον νομό υπάρχουν αρκετοί χείμαρροι και ρέματα (Πλατανόρεμα, Κραυσίνδωνας, Άναυρος, κλπ.), καθώς και πηγές μεγάλης παροχής, των οποίων τα ύδατα χρησιμοποιούνται για ύδρευση και άρδευση. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι στην ευρύτερη περιοχή του Βόλου, παρατηρείται το πρόβλημα της υφαλμύρωσης, το οποίο οφείλεται σε υπεράντληση νερού για αρδευτικούς και υδρευτικούς σκοπούς, ενώ η χρήση λιπασμάτων και νιτρικών υποβαθμίζει την υπόγεια υδροφορία και προκαλεί περιστασιακά το φαινόμενο του ευτροφισμού στον Παγασητικό Κόλπο. Ακόμη, στο ρέμα του Ξεριά παρατηρείται ρύπανση από υγρά απόβλητα βιομηχανικών μονάδων, καθώς και νιτρικών, φθοριούχων και βρωμιούχων ιόντων, που επιβαρύνει και άλλους χείμαρρους και ρέματα της περιοχής (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2001). Το κλίμα επηρεάζεται από την γειτνίαση με το Αιγαίο και βάσει μετεωρολογικών στοιχείων η μέση μηνιαία θερμοκρασία είναι 14,6 °C, με ψυχρότερο μήνα τον Ιανουάριο και θερμότερο τον Ιούλιο. Όσον αφορά τα βροχομετρικά χαρακτηριστικά, το ύψος βροχής κυμαίνεται από 400-600 mm στις πεδινές περιοχές, ενώ στα ορεινά και ημιορεινά του Πηλίου από 600-1200 mm. Στην περιοχή εντοπίζονται περιοχές ευάλωτες σε πλημμυρικά φαινόμενα, λόγω και της χειμαρρικής συμπεριφοράς των ρεμάτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι πλημμύρες του Δεκεμβρίου, το 2009, όπου στον βροχομετρικό σταθμό της Μακρυνίτσας, σε υψόμετρο 850 m, καταγράφηκαν 486 mm από τις 9/12 έως τις 12/12/2009.

Γεωμετρία – Ανάγλυφο

Για την λεκάνη απορροής του ρέματος Ξεριά, πρωτογενές δεδομένο αποτέλεσε το ΨΜΕ, χωρικής ανάλυσης 5 m, από το οποίο προσδιορίστηκε το μέγιστο, μέσο και ελάχιστο υψόμετρο της λεκάνης στα 1.573 m, 465 m, 0 m, αντίστοιχα, κατόπιν διόρθωσης των βυθισμάτων. Η συνολική έκταση της λεκάνης εκτιμήθηκε σε 111,5 km². Η υψογραφική της καμπύλη, που απεικονίζεται στην **Εικόνα 5.17** δείχνει ότι ανάντη του μέσου υψόμετρου το ανάγλυφο είναι αρκετά απότομο, διαμορφώνοντας έντονη μορφολογική κλίση, η οποία εξομαλύνεται προχωρώντας στα κατόπτη. Βάσει του ψηφιακού μοντέλου κλίσεων (**Εικόνα 5.18**), σημαντικό μέρος της λεκάνης χαρακτηρίζεται από κλίσεις της τάξης του 10%, καθορίζοντας μια μέση κλίση περίπου 6%, ενώ σε αρκετά τμήματα η κλίση ξεπερνά το 20% και σε ορισμένες περιπτώσεις το 40% σε ημιορεινές και ορεινές περιοχές της λεκάνης.



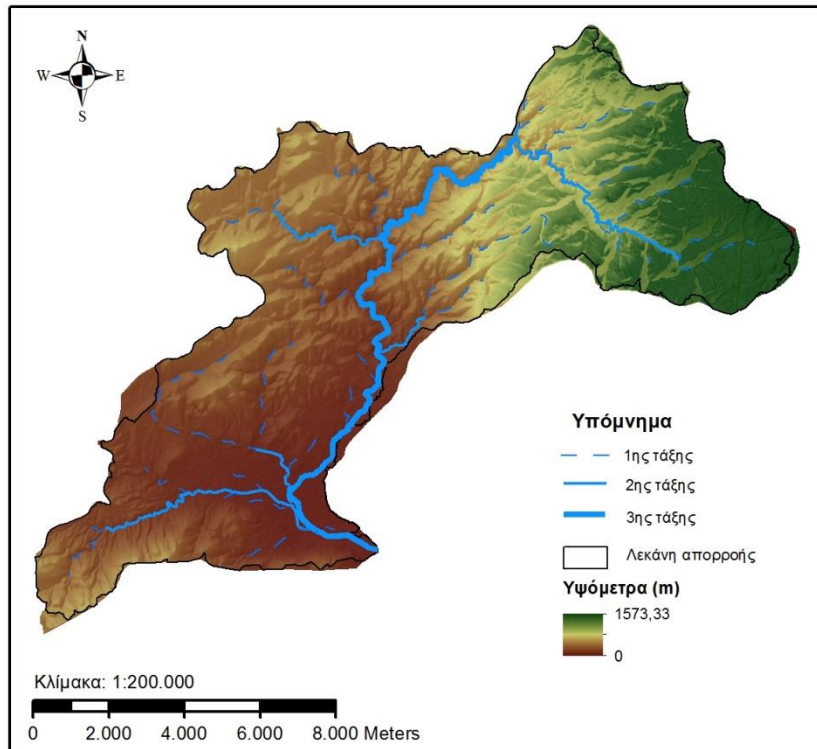
Εικόνα 5.17. Υψογραφική καμπύλη της λεκάνης του ρέματος Ξεριά.



Εικόνα 5.18. Ψηφιακό μοντέλο κλίσεων της λεκάνης του ρέματος Ξεριά.

Υδρογραφικό δίκτυο

Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής είναι αρκετά πυκνό, παρόλ' αυτά τα ρέματα δεν είναι συνεχούς ροής, αλλά συνδέονται με έντονα φαινόμενα χειμαρρικότητας. Ορίζοντας ως κατώφλι έναρξης του υδρογραφικού δικτύου μια λεκάνη αποστράγγισης, έκτασης 1 km², σχηματίζεται, σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Strahler, ένα 3^{ης} τάξεως δίκτυο, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 5.19*.



Εικόνα 5.19. Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης του ρέματος Ξεριά.

Χρήσεις γης

Στο ορεινό τμήμα της λεκάνης κυριαρχεί η δασική βλάστηση (περιλαμβάνεται και μέρος του καταφύγιου άγριας ζωής Σαρακηνός – Καλιακούδα στην κοινότητα Μακρυνίτσας), ενώ στο ημιορεινό τμήμα της αναπτύσσονται κυρίως καλλιεργήσιμες εκτάσεις, βοσκότοποι και σε μικρό ποσοστό οικιστικές περιοχές. Ακόμη, το πεδινό τμήμα αποτελείται από καλλιεργούμενες εκτάσεις, αστικές περιοχές και βιομηχανικές ζώνες (Α΄ ΒΙ.ΠΕ. Βόλου). Στην περιοχή του Βόλου εντοπίζονται και κάποια ανενεργά λατομεία, στα οποία δεν έχει πραγματοποιηθεί περιβαλλοντική αποκατάσταση, με αποτέλεσμα την πρόκληση έντονης αισθητικής υποβάθμισης του τοπίου.

Γεωλογία

Γεωτεκτονικά, η περιοχή ανήκει στην Πελαγονική ζώνη, κύριο δομικό στοιχείο της οποίας αποτελούν τα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα, τα οποία δεν είναι ομογενή αλλά αποτελούνται και από άλλες ενότητες πετρωμάτων. Το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο συνίσταται από γνευσιομένους γρανίτες στους βαθύτερους ορίζοντές του, μαρμαρυγικούς σχιστόλιθους, φυλλίτες, μάρμαρα και σποραδικές εμφανίσεις ασβεστολιθικών πετρωμάτων και φλύσχη στους ανώτερους ορίζοντες και από αλλούβια ολοκαίνου στα παράλια, και οφθαλμογενεύσιους, γνεύσιους, σχιστόλιθους και αμφιβολίτες (Παλαιζωϊκού – Τριαδικού) στο κεντρικό τμήμα της οροσειράς του Πηλίου, απ' όπου πηγάζει ο χείμαρρος Ξεριάς.

Ως προς την υδατοπερατότητα των εδαφών πρέπει να αναφερθεί ότι το μεγάλο ετήσιο ύψος βροχής, οι χιονοπτώσεις, τα πετρώματα και η πυκνή βλάστηση δημιουργούν ευνοϊκές προϋποθέσεις για την εμφάνιση πολυάριθμων πηγών, από τις οποίες γίνεται υδροληψία σε όλα τα δημοτικά διαμερίσματα και τους οικισμούς που βρίσκονται εντός της περιοχής. Ο

αριθμός των πηγών με ικανοποιητική παροχή ($> 35 \text{ m}^3/\text{h}$) είναι σημαντικός και η δίαιτά της είναι σχετικά σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ενώ στις πεδινές εκτάσεις, εντοπίζονται και αρκετές γεωτρήσεις, που στοχεύουν στην ικανοποίηση των αυξημένων απαιτήσεων, κυρίως του γεωργικού τομέα (N.A.M., 2005).

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

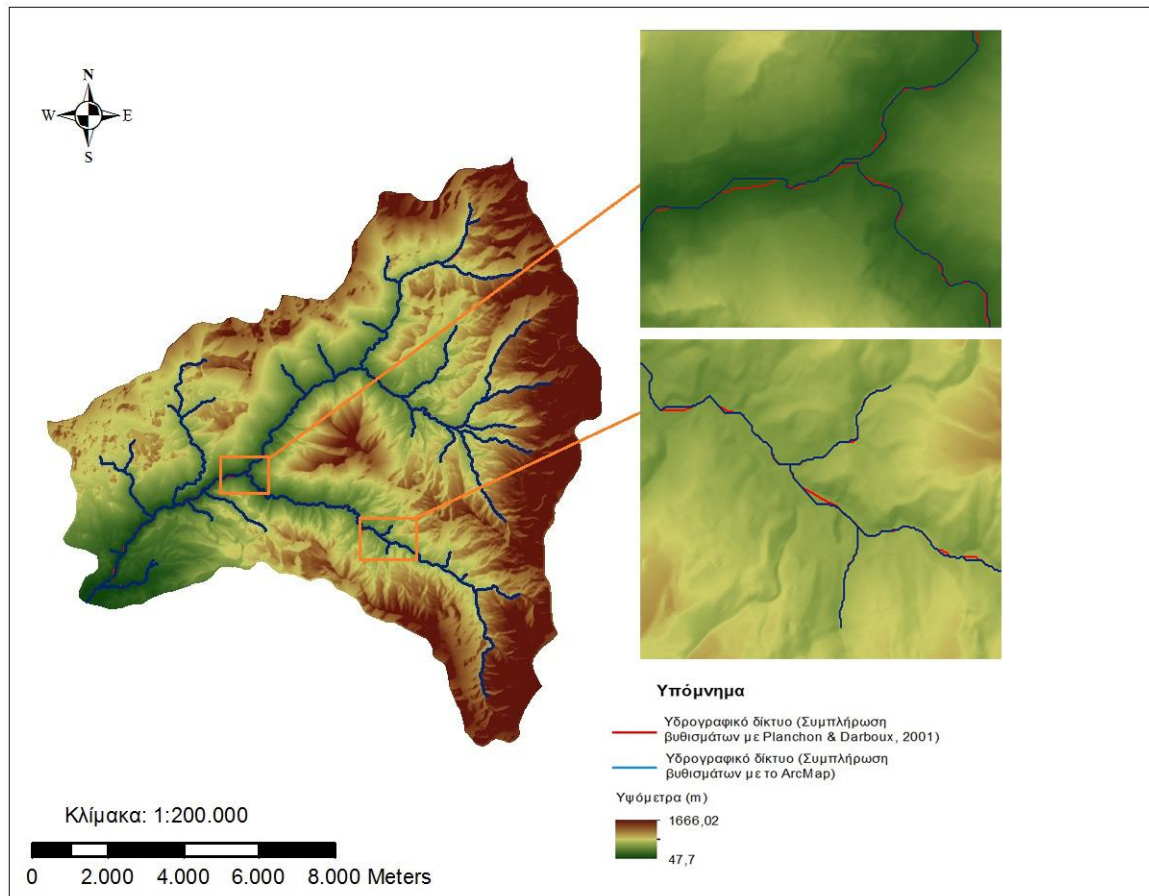
Στο παρόν κεφάλαιο εφαρμόζεται η μεθοδολογία υπολογισμού των χρόνων απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής σε κάθε λεκάνη. Αναγκαία προϋπόθεση της υλοποίησης αυτής είναι η διεξαγωγή της γεωμορφομετρικής ανάλυσης σε κάθε ΨΜΥ για την δόμηση των τοπολογικών σχέσεων, διαδικασία που περιγράφεται λεπτομερώς για κάθε μια από τις λεκάνες μελέτης. Η ενότητα ολοκληρώνεται με την διατύπωση ορισμένων παρατηρήσεων στα αποτελέσματα, τα οποία επισυνάπτονται συγκεντρωτικά υπό μορφή χαρτών στο Παράρτημα Ι.

6.1. Λεκάνη απορροής Νέδοντα

6.1.1. Διερεύνηση αλγορίθμων συμπλήρωσης βυθισμάτων στο ΨΜΥ

Στο στάδιο προεπεξεργασίας του ΨΜΥ της λεκάνης απορροής του Νέδοντα, κρίθηκε σκόπιμη η σύγκριση των λογισμικών SAGA GIS και ArcGIS ως προς τους αλγορίθμους συμπλήρωσης των βυθισμάτων, με στόχο την ανάδειξη ενδεχόμενων ζητημάτων που ανακύπτουν κατά την χρήση τους. Με δεδομένο το ΨΜΥ, εφαρμόζεται η διαδικασία διόρθωσης των κοιλοτήτων, μέσω των αλγορίθμων των Planchon & Darboux (2001), του SAGA GIS και του εργαλείου Fill του ArcGIS. Στην σύγκριση των δύο διορθωμένων ΨΜΥ, δεν εντοπίζονται διαφορές ως προς τα στατιστικά χαρακτηριστικά των υψόμετρων (μέγιστο, ελάχιστο, μέσο υψόμετρο και τυπική απόκλιση), ωστόσο συγκρίνοντας τις διαφορές των τιμών των δύο μοντέλων, διαπιστώνεται ότι τα υψόμετρα από το αλγόριθμο του SAGA GIS προέκυψαν μεγαλύτερα από του ArcGIS. Αν και η απόκλισή τους είναι πολύ μικρή (έως 0,1 m), παρατηρείται ότι εντοπίζεται κυρίως στην κοίτη, και αυτό δικαιολογείται καθώς ο αλγόριθμος του ArcGIS έχει την τάση να υποεκτιμά το υψόμετρο του βυθίσματος και να δημιουργεί πιο επίπεδες επιφάνειες εκεί όπου διορθώνει το βύθισμα, σε αντίθεση με τον αλγόριθμο του SAGA GIS που προσδίδει μια ήπια κλίση στην επιφάνεια του βυθίσματος. Το γεγονός αυτό, επηρεάζει την διαδρομή της ροής.

Στη σύγκριση των υδρογραφικών δικτύων, με εφαρμογή του αλγορίθμου μονής κατεύθυνσης D8, παρατηρείται ότι στο ΨΜΥ με διορθωμένα τα βυθίσματα μέσω του SAGA GIS, ανιχνεύεται καλύτερα η κοίτη των ρεμάτων και δημιουργούνται πιο πολλά «σπασίματα» στο δiάνυσμα της κοίτης, σε αντίθεση με το δίκτυο του ΨΜΥ με διορθωμένα τα βυθίσματα μέσω του ArcGIS, στο οποίο σχηματίζονται πιο ευθύγραμμα τμήματα (**Εικόνα 6.1**). Τα εν λόγω συμπεράσματα, δεν φαίνεται να είναι στατιστικά σημαντικά για το μοντέλο ανάλυσης 5 m της λεκάνης του Νέδοντα, όμως σε μικρότερες χωρικές αναλύσεις, της τάξης των 25 m και 50 m, όπου η αύξηση της ελάχιστης επιφανειακής μονάδας εξομαλύνει σημαντικά την υψομετρική πληροφορία, πιθανόν να πρέπει να ληφθούν υπόψη για την ανίχνευση των μικρομεταβολών του υψομέτρου. Τέλος, αναφέρεται ότι σε μια σύγκριση των αλγορίθμων πολλαπλής και μονής κατεύθυνσης ροής, δεν προέκυψαν σημαντικές διαφορές στην διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου για την εν λόγω λεκάνη και δεδομένου ότι στην ανάλυση ενδιαφέρει η μέγιστη διαδρομή ροής, επιλέχθηκε η χρήση του αλγορίθμου D8.



Εικόνα 6.1. Σύγκριση των αλγορίθμων συμπλήρωσης των βυθισμάτων του SAGA GIS (Planchon & Darboux, 2001) και του ArcGIS για την λεκάνη του Νέδοντα.

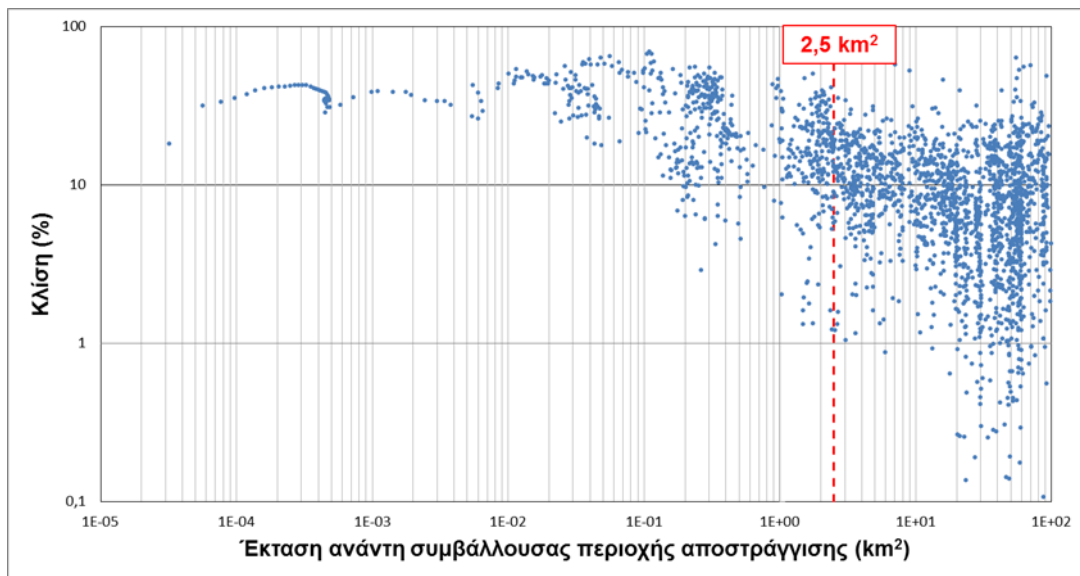
Επισημαίνεται ότι για τις υπόλοιπες λεκάνες απορροής της μελέτης (Σαρανταπόταμου, ρέματος Ραφήνας και Ξεριά), η διόρθωση των ΨΜΥ πραγματοποιήθηκε μέσω του SAGA GIS, λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω συμπεράσματα των συγκρίσεων στην λεκάνη του Νέδοντα. Ακόμη, η διαδρομή της ροής προσδιορίστηκε μέσω του αλγορίθμου D8, με σκοπό την αυτοματοποίηση των βημάτων επεξεργασίας στο Model Builder.

Καθορισμός ανάντη λεκάνης υπό την θεώρηση συνθηκών επίγειας ροής

Για την λεκάνη απορροής του Νέδοντα, λόγω αδυναμίας αντικειμενικού προσδιορισμού του σημείου έναρξης του υδρογραφικού δικτύου, ο καθορισμός του κατωφλίου ροής να έγινε προσεγγιστικά, μέσω της ερμηνείας του γραφήματος τοπικής κλίσης συναρτήσεως της έκτασης της ανάντη συμβάλλουσας περιοχής, σύμφωνα με την προτεινόμενη τεχνική των McNamara *et al.* (2006). Στο γράφημα, ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την έκταση της ανάντη συμβάλλουσας λεκάνης απορροής, που αντιστοιχεί σε κάθε σημείο-φατνίο κατά μήκος της μέγιστης υδραυλικά διαδρομής ροής, ενώ ο κατακόρυφος άξονας αποδίδει την τοπική κλίση του αντίστοιχου σημείου-φατνίου. Για τους δύο άξονες χρησιμοποιείται η λογαριθμική κλίμακα, πρώτον διότι η εξίσωση δύναμης που περιγράφει την σχέση των δύο μεγεθών απεικονίζεται ως ευθεία γραμμή σε λογαριθμικό διάγραμμα, και δεύτερον επειδή βελτιώνεται η γραφική οπτικοποίηση, μέσω ενίσχυσης της απόδοσης των μικρότερων τιμών έκτασης ανάντη λεκάνης, και περιορισμού των μεγαλύτερων τιμών που αντιστοιχούν

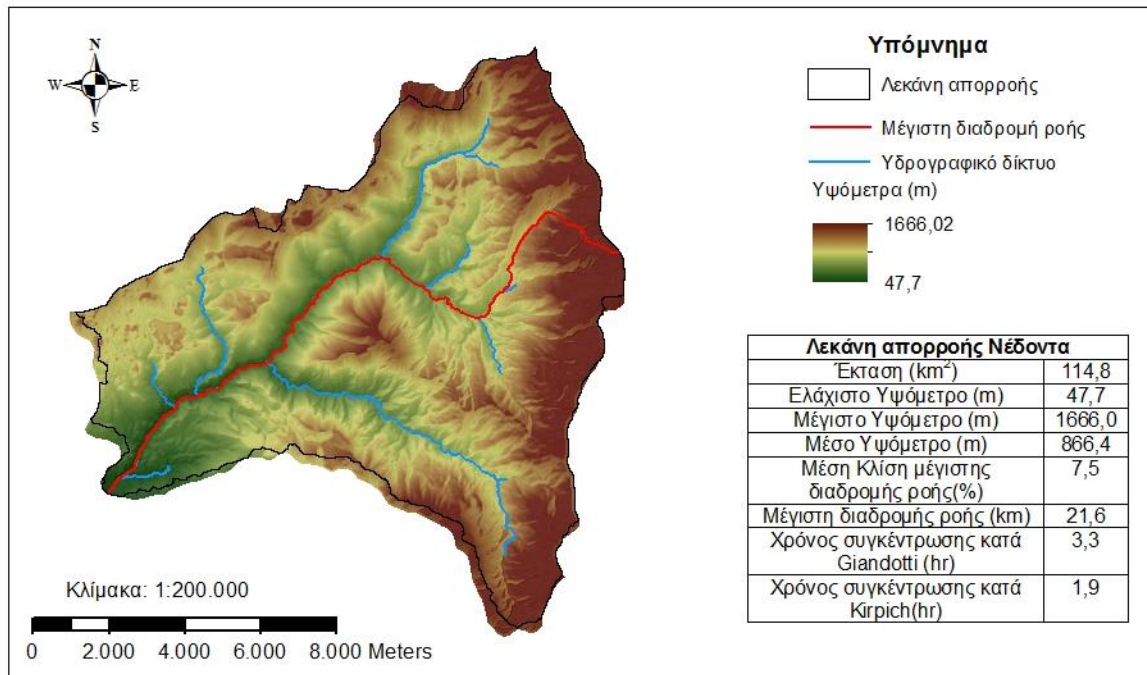
στα κατάντη, όπου οι γεωμορφολογικές διαδικασίες δεν παρουσιάζουν έντονες αλλαγές. Σύμφωνα με το **Διάγραμμα 6.1**, η καμπή της γραμμής τάσης εντοπίζεται για έκταση λεκάνης απορροής περίπου $2,5 \text{ km}^2$. Έτσι, επιλέγεται η έναρξη της ροής του υδρογραφικού δικτύου, να οριστεί προσεγγιστικά σε αυτή την ανάντη έκταση, για την οποία θεωρείται ότι επικρατούν επίγειες συνθήκες ροής του νερού. Ο συντελεστής παρεμπόδισης εκτιμάται σε $1,55 \text{ m/s}$, καθώς η κυριαρχούσα χρήση αφορά δασική κάλυψη.

Επιπρόσθετα, λαμβάνοντας υπόψη ότι η γεωλογία της ανάντη έκτασης διαμορφώνει εδάφη με μέτριους έως μικρούς ρυθμούς διήθησης και ότι σε μικρή απόσταση στα κατάντη παρατηρείται η ύπαρξη υδρομετρικού σταθμού, που υποδηλώνει μόνιμη ροή στην θέση, φαίνεται η επιλογή του σημείου να είναι προσεγγιστικά ορθή.



Διάγραμμα 6.1. Γράφημα τοπικής κλίσης – έκτασης ανάντη συμβάλλουσας περιοχής αποστράγγισης στην μέγιστη υδραυλικά διαδρομή ροής, για την λεκάνη απορροής του Νέδοντα.

Στην **Εικόνα 6.2**, παρουσιάζεται η μέγιστη υδραυλικά διαδρομή ροής πάνω στο υδρογραφικό δίκτυο, ενώ επισυνάπτονται συγκεντρωτικά ορισμένες βασικές παράμετροι της λεκάνης. Η γεωμετρία της λεκάνης και το καλά διαμορφωμένο υδρογραφικό δίκτυο ευνοούν την συγκέντρωση της απορροής στην έξοδο. Επιπλέον, το μεγάλο μέσο υψόμετρο, ως δείκτης του απότομου ανάγλυφου της λεκάνης, προκαλεί γρήγορη απόκριση. Ο χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti εκτιμάται στις 3 hr περίπου, και διαφέρει σχεδόν κατά μια ώρα από τον χρόνο κατά Kirpich (2 hr).



Εικόνα 6.2. Υδρογραφικό δίκτυο και μέγιστη διαδρομή ροής της λεκάνης του Νέδοντα.

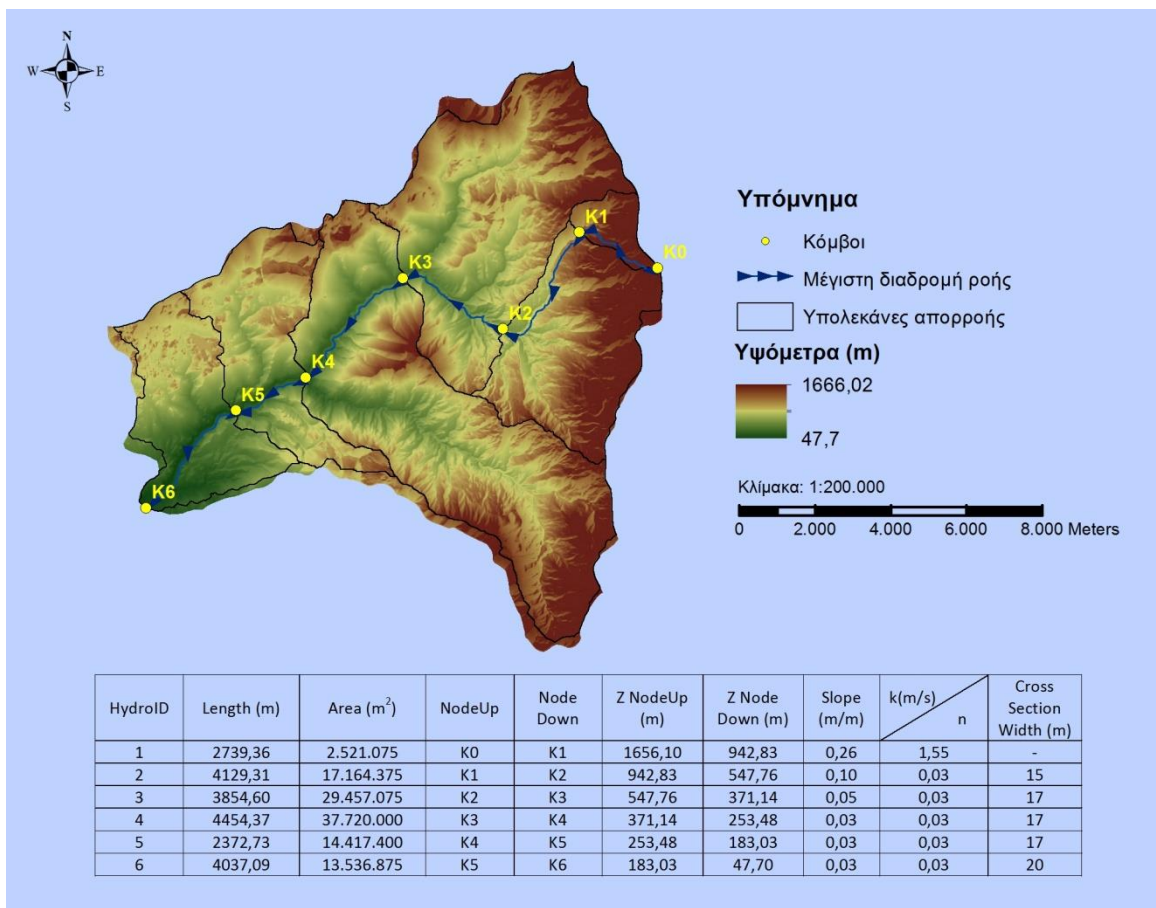
Καθορισμός υδραυλικών χαρακτηριστικών

Για τον προσδιορισμό των διατομών κατά μήκος της υδραυλικά μέγιστης διαδρομής ροής αξιοποιήθηκαν τα στοιχεία οριζοντιογραφικής και υψομετρικής αποτύπωσης πλησίον των υδρομετρικών σταθμών Αλαγονίας και Νέδοντα (Λατομείο Μπάκα). Η πληροφορία αυτή αποτελεί προϊόν επίγειων τοπογραφικών αποτυπώσεων στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ (Κούσης κ.ά., 2012), το οποίο αφορούσε στην ανάπτυξη ενός εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων για την εκτίμηση των πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα. Η οριοθέτηση της διατομής έγινε σύμφωνα με τον Ν.4258/2014 (ΦΕΚ Α 94/14-4-2014), σχετικά με την διαδικασία οριοθέτησης και ρύθμισης θεμάτων για τα υδατορεύματα, σύμφωνα με τον οποίο η όχθη του ποταμού διαμορφώνεται από την γραμμή που ενώνει τα άνω άκρα κάθε πρανούς της κοίτης (φρύδι), όπου εκείνη αποτελεί διακριτό μορφολογικό στοιχείο του περιβάλλοντος του υδατορεύματος.

Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία που ακολουθήθηκε αφορούσε στην προβολή στο ΨΜΥ, ορισμένων σημείων που αποτυπώνονταν ως στάσεις στο σχέδιο της οριζοντιογραφίας, κι αυτό προκειμένου να οριοθετηθεί η περιοχή για την οποία παρείχε πληροφορία το σχέδιο και κατόπιν, συμπλήρωση του πλάτους της διατομής στο τμήμα της μέγιστης διαδρομής ροής, που το αφορούσε. Έτσι, καθορίστηκε το πλάτος της διατομής στα 20 m και 15 m για τα τμήματα ανάντη των σταθμών του Νέδοντα (Λατομείο Μπάκα) και της Αλαγονίας, αντίστοιχα. Για τα ενδιάμεσα τμήματα ορίστηκε μια τιμή πλάτους της τάξης των 17 m, διότι ήταν δύσκολο να χρησιμοποιηθεί η αντίστοιχη πληροφορία από το ΨΜΥ, επειδή στην πλειονότητα των τμημάτων διαμορφώνονταν επίπεδη τοπογραφία σε μεγάλο εύρος εκατέρωθεν της κοίτης. Τέλος, όσον αφορά τον συντελεστή τραχύτητας Manning, διατηρήθηκε η τιμή 0,03 στην διαδρομή ροής στο υδατόρευμα, καθώς δεν υπάρχει επένδυση κάποιου τμήματος.

6.1.2. Δεδομένα εξόδου από το GIS – Εφαρμογή της μεθοδολογίας

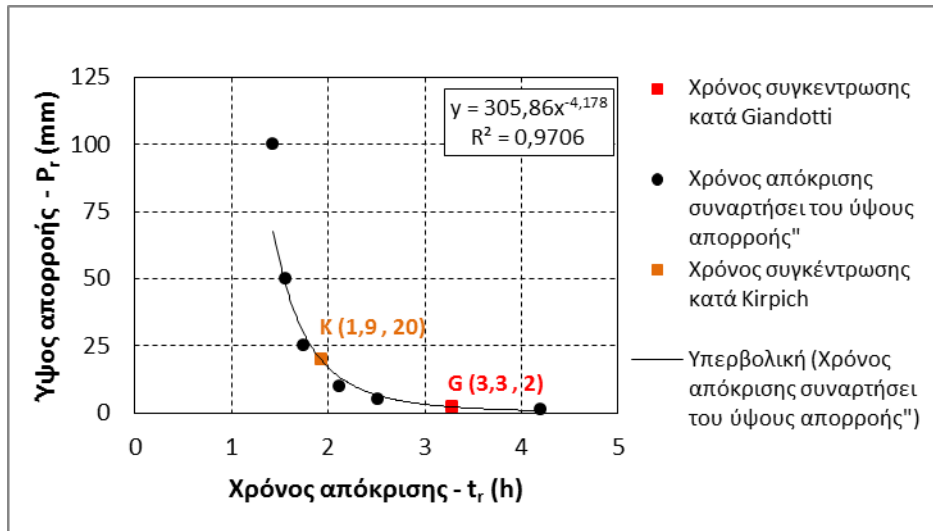
Η εφαρμογή των εργαλείων του Model Builder και οι τοπολογικές σχέσεις των δεδομένων αναπαρίσταται στην **Εικόνα 6.3**. Βάσει της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, υπολογίστηκαν οι χρόνοι απόκρισης της λεκάνης για μεταβλητό ύψος απορροής. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον **Πίνακα 6.1** και η προβολή τους στο **Διάγραμμα 6.2** αναδεικνύοντας μια σχέση δύναμης μεταξύ του χρόνου απόκρισης και του ύψους απορροής, με συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0,97$. Υπό την θεώρηση ότι η εξίσωση της γραμμής τάσης αποτελεί μια ένδειξη της μεταβολής του χρόνου συναρτήσει του ύψους για την εν λόγω λεκάνη, η προβολή των χρόνων συγκέντρωσης των σχέσεων Giandotti και Kirpich, φαίνεται να αντιστοιχεί σε ύψη απορροής 2 mm και 20 mm, αντίστοιχα. Στο **Διάγραμμα 6.3** προβάλλονται οι τιμές του χρόνου απόκρισης συναρτήσει της παροχής αιχμής στην έξοδο της λεκάνης. Όπως διαπιστώνεται οι δύο μεταβλητές, χρόνος απόκρισης και παροχή εξόδου, συνδέονται με μια σχέση δύναμης με υψηλό συντελεστή προσδιορισμού $R^2=0,98$.



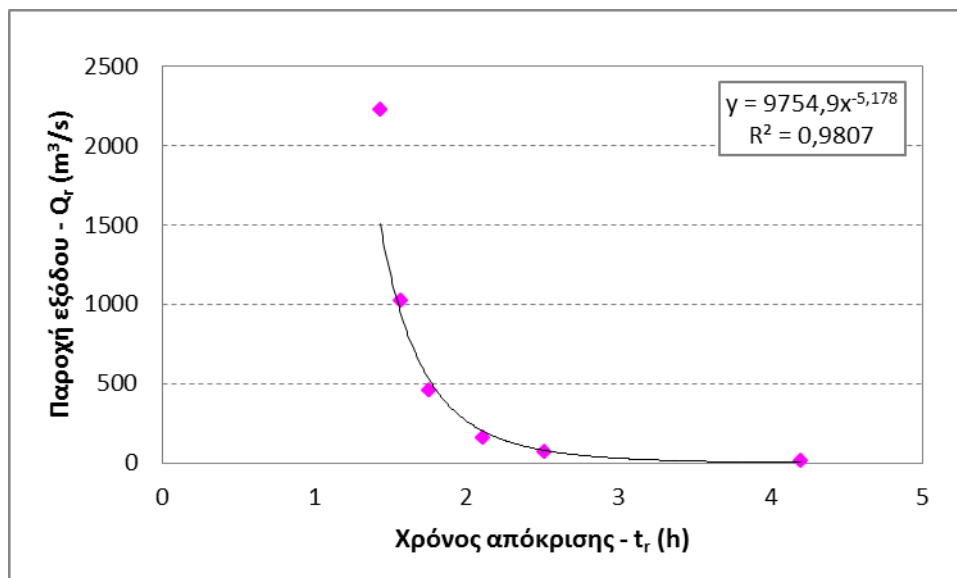
Εικόνα 6.3. Δεδομένα εξόδου από το περιβάλλον GIS της λεκάνης του Νέδοντα.

Πίνακας 6.1. Αποτελέσματα υπολογισμού του χρόνου απόκρισης και της παροχής στην έξοδο για μεταβλητό ύψος απορροής στην λεκάνη του Νέδοντα.

| Χρόνος απόκρισης t_r (hr) | Ύψος απορροής P_r (mm) | Παροχή στην έξοδο Q_r (m ³ /s) |
|-----------------------------|--------------------------|---|
| 4,2 | 1 | 7,6 |
| 2,5 | 5 | 63,4 |
| 2,1 | 10 | 151,0 |
| 1,8 | 25 | 455,2 |
| 1,6 | 50 | 1.017,9 |
| 1,4 | 100 | 2.224,2 |



Διάγραμμα 6.2. Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής για την λεκάνη του Νέδοντα.

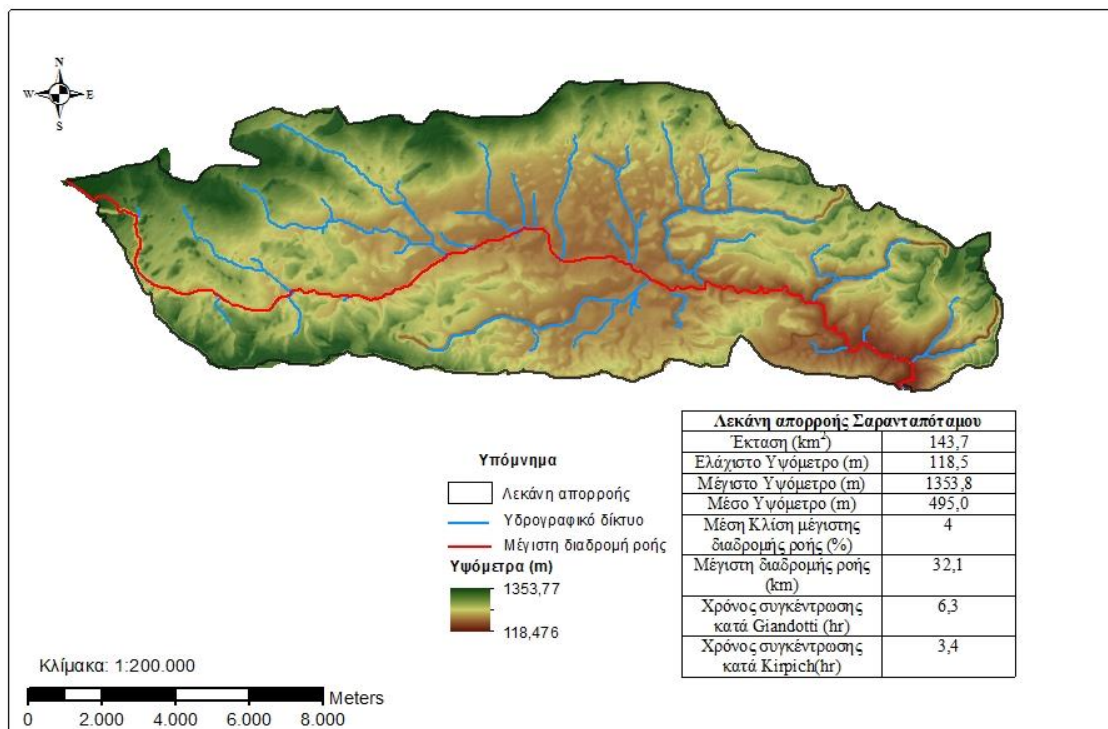


Διάγραμμα 6.3. Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσει της παροχής εξόδου για την λεκάνη του Νέδοντα.

6.2. Λεκάνη απορροής Σαρανταπόταμου

Καθορισμός ανάντη λεκάνης υπό την θεώρηση συνθηκών επίγειας ροής

Η έκταση της ανάντη λεκάνης αποστράγγισης, στην οποία θεωρείται ότι η ροή είναι επιφανειακή, ορίστηκε από το σημείο τομής της μέγιστης υδραυλικά διαδρομής και του υδρογραφικού δικτύου για κατώφλι 1 km². Η επιλογή αυτή αποτελεί μια προσέγγιση, καθώς το σύνολο της λεκάνης χαρακτηρίζεται από χειμναρική ή εφήμερη ροή και ο καθορισμός της ακριβούς έναρξης του υδρογραφικού δικτύου είναι δυσεπίτευκτος. Η ανάντη έκταση διαμορφώθηκε στα 2 km² και ο συντελεστής παρεμπόδισης της στα 1,56 m/s, καθώς πέρα από τη δασική κάλυψη εντοπίζονται και φυσικοί βοσκότοποι που μειώνουν την τραχύτητα του εδάφους. Στην **Εικόνα 6.4** παρουσιάζεται η μέγιστη διαδρομή ροής σε σχέση με το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης, ενώ όπως διαπιστώνεται από τον επισυναπτόμενο χάρτη, η ήπια εξομάλυνση της τοπογραφίας προς τα κατάντη διαμορφώνει τον χρόνο συγκέντρωσης κατά Giandotti στις 6,3 hr.



Εικόνα 6.4. Υδρογραφικό δίκτυο και μέγιστη διαδρομή ροής της λεκάνης του Σαρανταπόταμου.

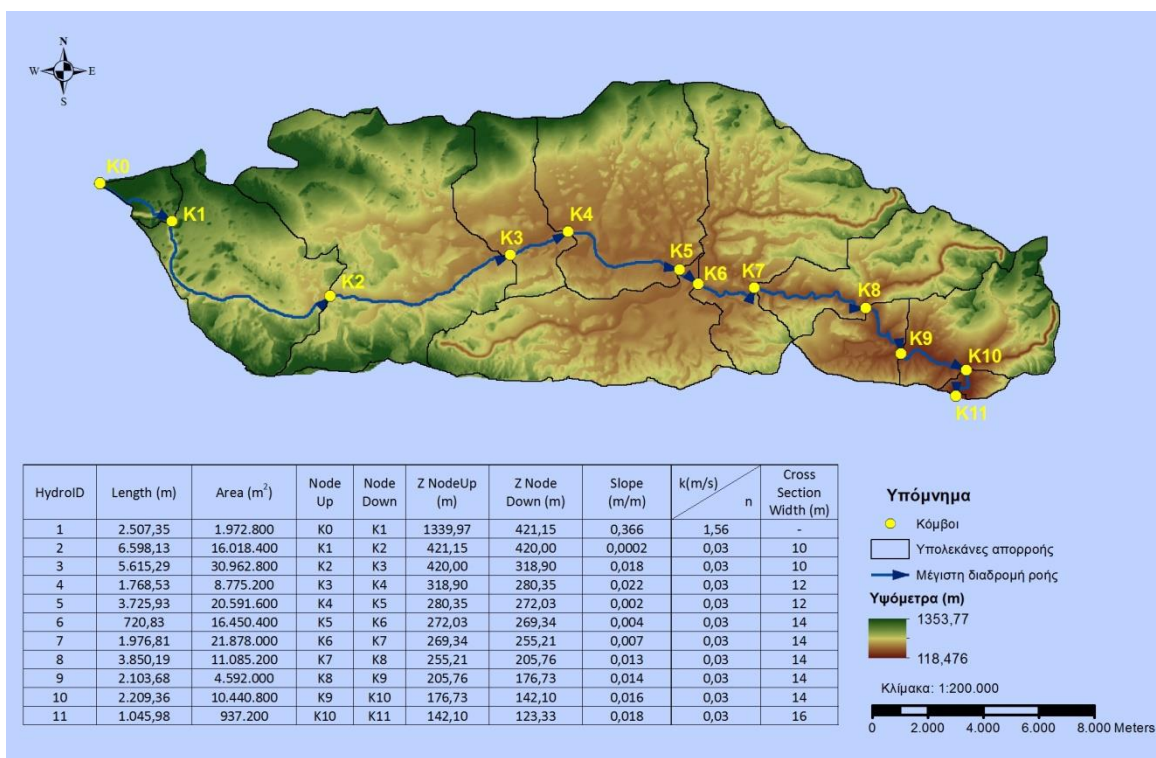
Καθορισμός υδραυλικών χαρακτηριστικών

Στην λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου, τα πλάτη των διατομών κατά μήκος της μέγιστης διαδρομής ροής, προσδιορίστηκαν ομοίως όπως και στην λεκάνη του Νέδοντα, αξιοποιώντας τη διαθέσιμη οριζοντιογραφική αποτύπωση του έργου ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ (Κούσης κ.ά., 2012). Πιο συγκεκριμένα, στον υδρομετρικό σταθμό Γύρα Στεφάνης, η διατομή είναι οκταγωνική και η κοίτη πλήρως διευθετημένη με πλάτη ανάντη 14 m και κατάντη 16 m, ενώ στον σταθμό της Οινόης, η διατομή είναι ορθογωνική, με πλάτη ανάντη και κατάντη, 10 m και 12 m, αντίστοιχα. Στα ενδιάμεσα των δύο σταθμών τμήματα, διατηρήθηκαν κατά προσέγγιση, πλάτη διατομών της τάξης των 12 m και 14 m, καθώς δεν

υπήρχε περαιτέρω πληροφορία, λόγω και της αδρής ανάλυσης του ΨΜΥ. Στον συντελεστή Manning δόθηκε μια μέση τιμή 0,03, καθώς δεν εντοπίζεται κάποια επένδυση της διατομής, με εξαίρεση τους δύο κιβωτοειδείς οχετούς (διέλευση της όχθης μέσω διάβασης) στις θέσεις των υδρομετρικών σταθμών, που ωστόσο έχουν ελάχιστο μήκος σε σχέση με την συνολική διαδρομή ροής.

6.2.1. Δεδομένα εξόδου από το GIS – Εφαρμογή της μεθοδολογίας

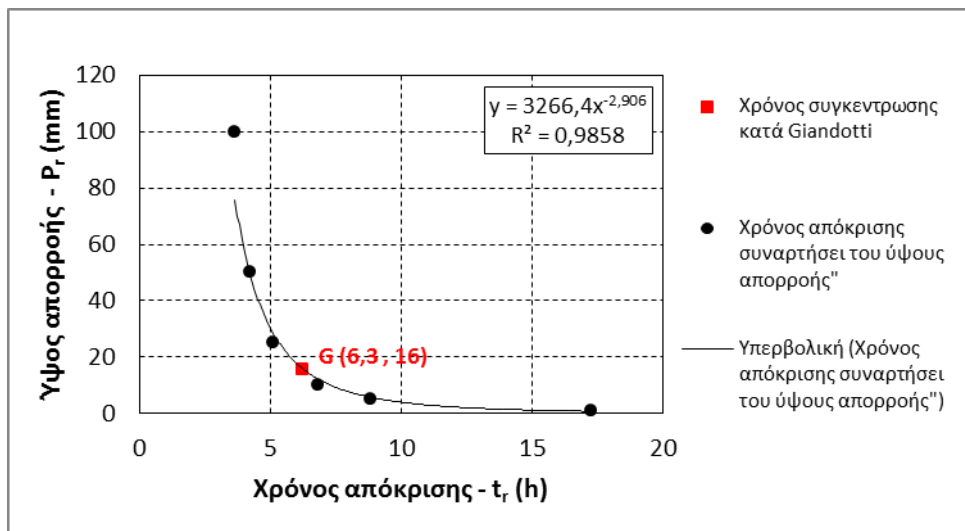
Χτίζοντας τις τοπολογικές σχέσεις μεταξύ των τμημάτων, στα οποία διαιρέθηκε η μέγιστη διαδρομή ροής της λεκάνης, δημιουργείται η **Εικόνα 6.5**, οι πληροφορίες της οποίας αποτελούν δεδομένα για τον προσδιορισμό του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής (**Πίνακας 6.2**). Από το **Διάγραμμα 6.4 & 6.5** προκύπτει μια σχέση δύναμης μεταξύ χρόνου απόκρισης και ύψους απορροής και χρόνου απόκρισης και παροχή αιχμής, όπως και στην λεκάνη του Νέδοντα. Το εύρος μεταβολής του χρόνου είναι από 4 hr έως 17 hr, για ύψη απορροής από 100 mm έως 1 mm. Στο **Διάγραμμα 6.4**, ο χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti αντιστοιχεί στα 16 mm, ενώ ο χρόνος κατά Kirpich φαίνεται να αποτελεί εξωκείμενο σημείο.



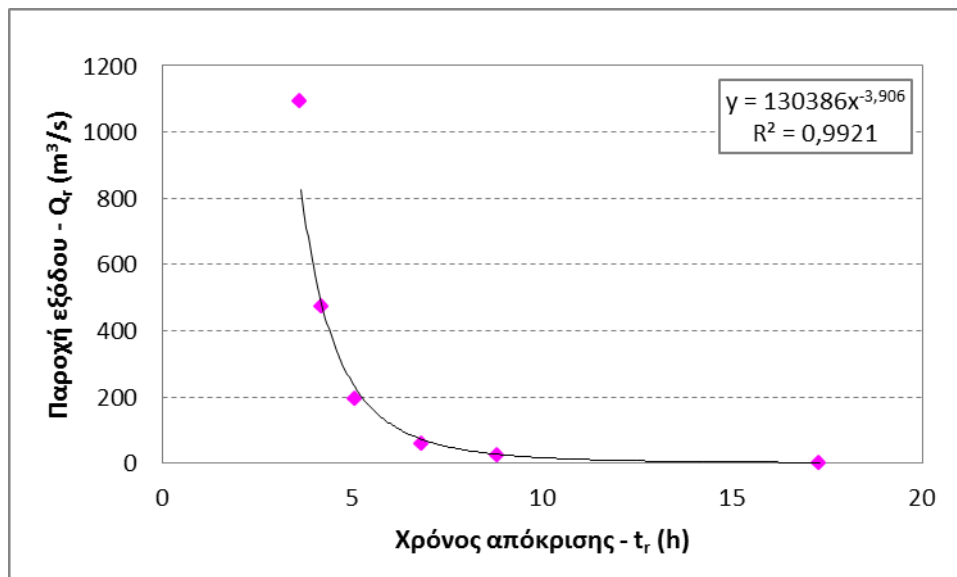
Εικόνα 6.5. Δεδομένα εξόδου από το περιβάλλον GIS της λεκάνης του Σαρανταπόταμου.

Πίνακας 6.2. Αποτελέσματα υπολογισμού του χρόνου απόκρισης και της παροχής στην έξοδο για μεταβλητό ύψος απορροής στην λεκάνη του Σαρανταπόταμου.

| Χρόνος απόκρισης t_r (hr) | Ύψος απορροής P_r (mm) | Παροχή στην έξοδο Q_r (m ³ /s) |
|-----------------------------|--------------------------|---|
| 17,3 | 1 | 2,3 |
| 8,8 | 5 | 22,6 |
| 6,8 | 10 | 58,3 |
| 5,1 | 25 | 196,0 |
| 4,2 | 50 | 471,5 |
| 3,7 | 100 | 1.092,2 |



Διάγραμμα 6.4. Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής για την λεκάνη του Σαρανταπόταμου.



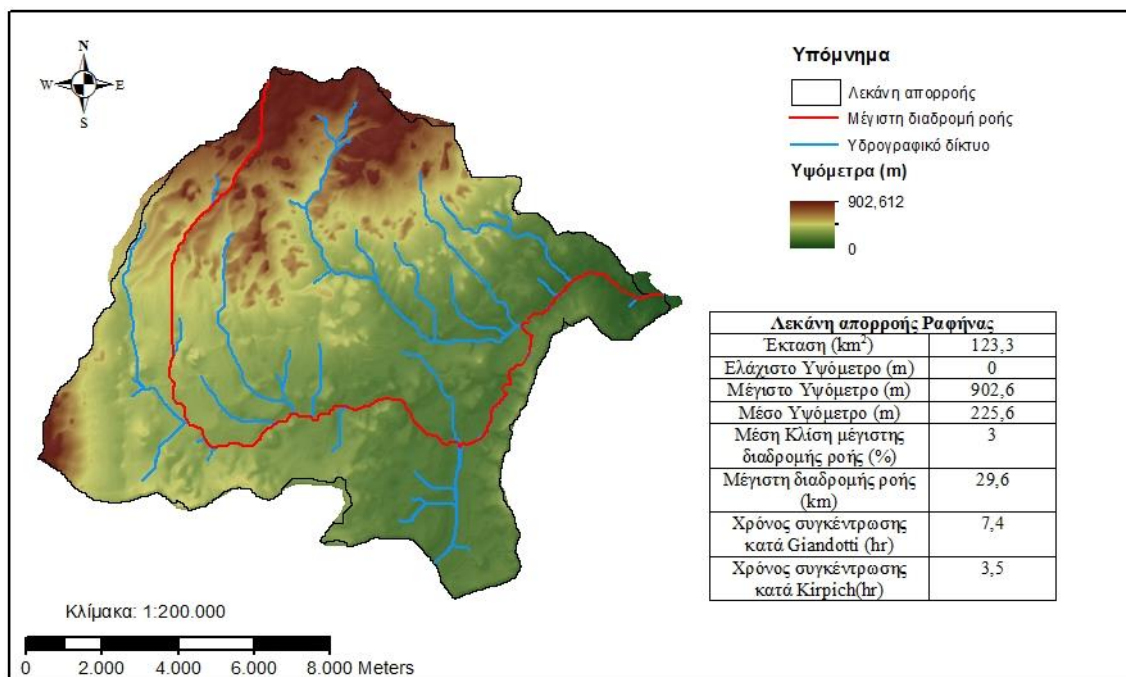
Διάγραμμα 6.5. Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσει της παροχής εξόδου για την λεκάνη του Σαρανταπόταμου.

6.3. Λεκάνη απορροής Ραφήνας

Καθορισμός ανάντη λεκάνης υπό την θεώρηση συνθηκών επίγειας ροής

Το ανάντη τμήμα της λεκάνης απορροής του ρέματος της Ραφήνας συνίσταται από μεταβατικές δασώδεις – θαμνώδεις εκτάσεις χαμηλής κάλυψης, διαμορφώνοντας τον συντελεστή παρεμπόδισης στα 1,55 m/s. Λαμβάνοντας υπόψη ότι στο βόρειο τμήμα της λεκάνης το γεωλογικό υπόβαθρο περιλαμβάνει διαπερατούς, αδιαπέρατους και ημιπερατούς σχηματισμούς με κατεύθυνση από βορρά προς νότο, ο μηχανισμός επίγειας ροής θεωρείται ότι συγκλίνει σε διαμορφωμένες υδάτινες επιφάνειες στο σημείο έναρξης των ημιπερατών σχηματισμών. Η επιλογή του εν λόγω σημείου έναρξης οριοθετεί μια ανάντη έκταση περίπου 1 km², κατάντη της οποίας διαμορφώνεται το υδρογραφικό δίκτυο.

Στην **Εικόνα 6.6** απεικονίζεται το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του ρέματος Ραφήνας και η μέγιστη διαδρομή ροής. Σύμφωνα με την σχέση Giandotti, ο χρόνος συγκέντρωσης είναι σχετικά μεγάλος και συνδέεται με μικρές ταχύτητες ροής καθώς μεγάλο μήκος της διαδρομής ροής αναπτύσσεται σε ήπιες κλίσεις, και αναμένεται να επιδράσει στην μορφή του υδρογραφήματος, αποδίδοντας πιο εξομαλυμένες πλημμυρικές παροχές αιχμής..

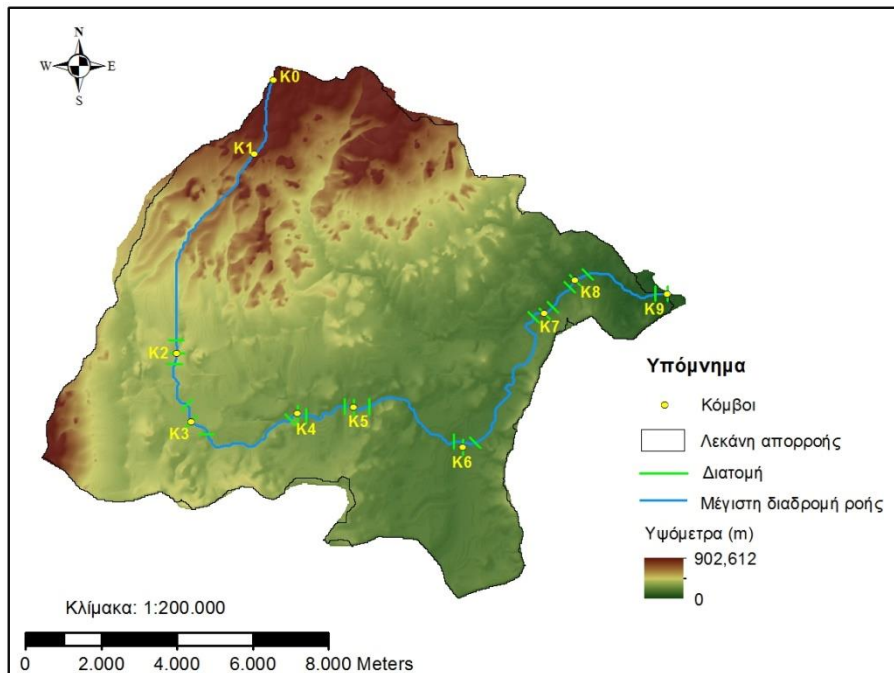


Εικόνα 6.6. Υδρογραφικό δίκτυο και μέγιστη διαδρομή ροής της λεκάνης του ρέματος Ραφήνας.

Καθορισμός υδραυλικών χαρακτηριστικών

Για την λεκάνη απορροής του ρέματος Ραφήνας, λόγω της αδρής ανάλυσης του ΨΜΕ, η επιλογή του πλάτους των διατομών στηρίχθηκε κυρίως σε μετρήσεις διατομών από την εφαρμογή του Κτηματολογίου. Ο καθορισμός του πλάτους ήταν εφικτός σε επιλεγμένους κόμβους της μέγιστης διαδρομής ροής, καθώς οι διατομές είτε ήταν διαμορφωμένες είτε ήταν επενδυμένες. Το πλάτος σε κάθε επιμέρους τμήμα της μέγιστης διαδρομής ροής προσδιορίστηκε ως η μέση τιμή των διατομών των κόμβων του τμήματος, ο σχεδιασμός

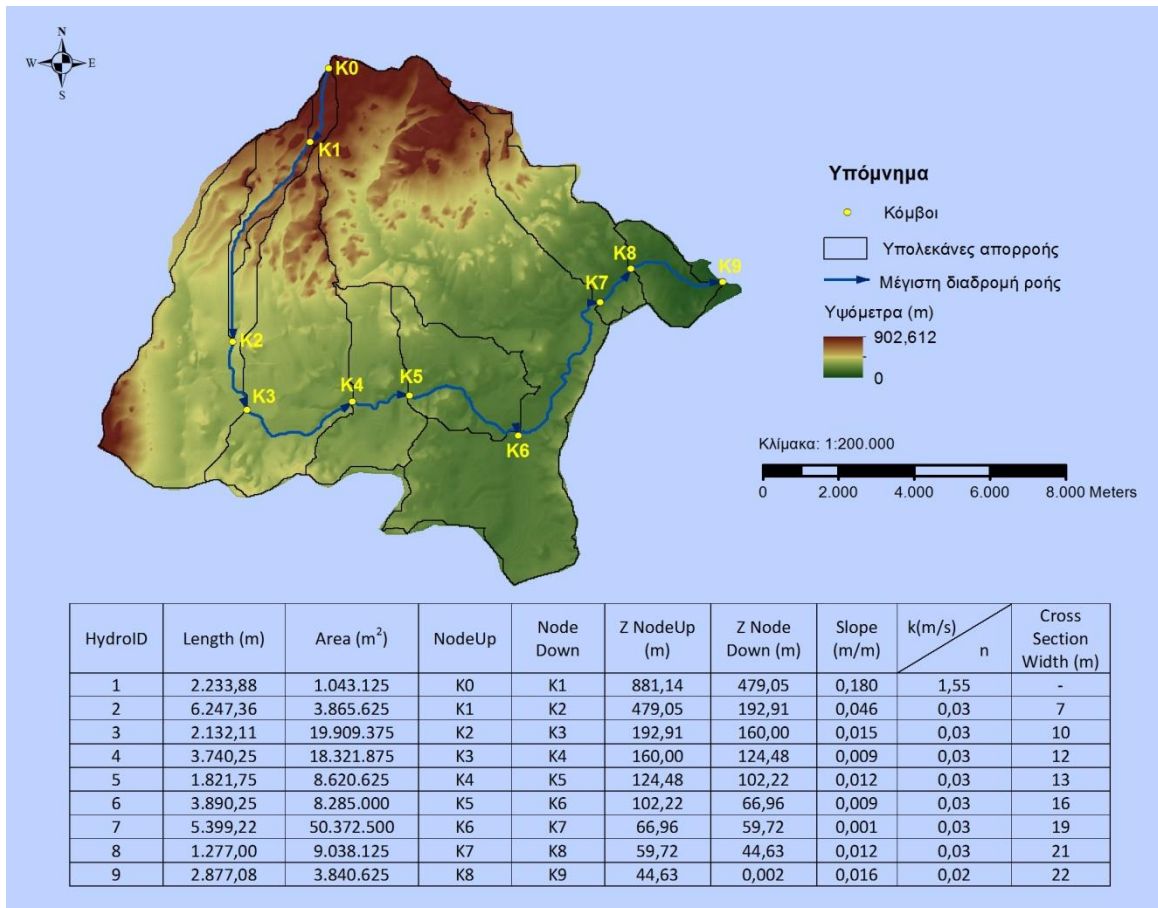
των οποίων έγινε μέσω του HEC-GeoRAS (*Εικόνα 6.7*). Ακόμη, αξιοποιήθηκε και η πληροφορία που αφορά την ορθογωνική διατομή πλάτους 21,6 m στον υδρομετρικό σταθμό της Ραφήνας (Παγάνα, 2012). Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι στους κόμβους K2 έως K9, η προσέγγιση του πλάτους της διατομής ήταν δυνατή, λόγω αναγνώρισης της κοίτης του ρέματος στον ορθοφωτοχάρτη. Ωστόσο ανάντη του κόμβου K2, η πληροφορία της κοίτης χανόταν, και επομένως διατηρήθηκε προσεγγιστικά το πλάτος της διατομής του κόμβου K2. Για τον συντελεστή τραχύτητας επιλέχθηκε η τιμή 0,03, με εξαίρεση το τελευταίο κατάντη τμήμα της μέγιστης διαδρομής ροής, στο οποίο δόθηκε η τιμή 0,02, λόγω του σημαντικού μήκους επένδυσης της διατομής.



Εικόνα 6.7. Σχεδίαση διατομών σε επιλεγμένους κόμβους της μέγιστης διαδρομής ροής της λεκάνης του ρέματος Ραφήνας.

6.3.1. Δεδομένα εξόδου από το GIS – Εφαρμογή της μεθοδολογίας

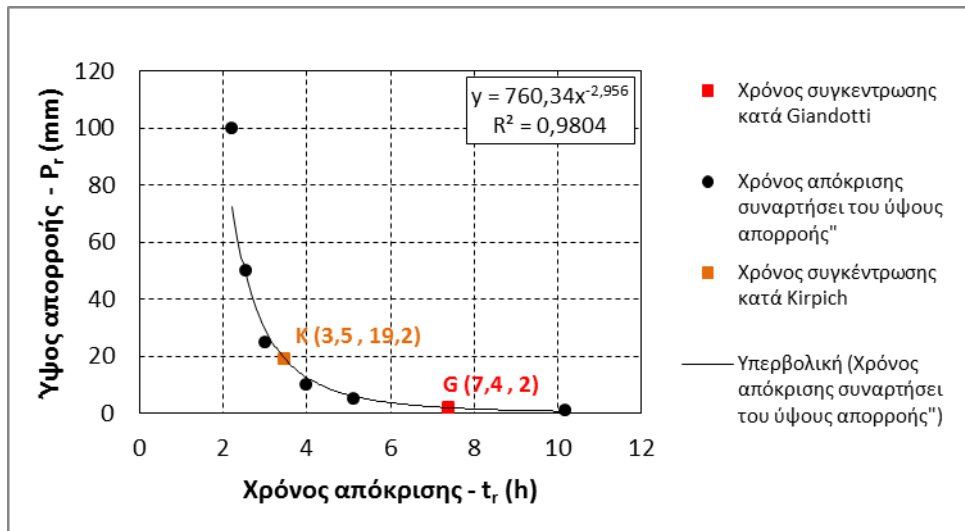
Στην *Εικόνα 6.8* παρουσιάζονται τα δεδομένα που εξήχθησαν από το λογισμικό του ArcGIS, με πλήρως καθορισμένες τις τοπολογικές τους σχέσεις. Στο *Διάγραμμα 6.6* προβάλλονται οι τιμές του *Πίνακα 6.3*, που συνοψίζει τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας προσδιορισμού του χρόνου απόκρισης της λεκάνης. Η σχέση του χρόνου συναρτήσεως του ύψους απορροής παρουσιάζει την τυπική σχέση δύναμης, για την οποία προκύπτει πολύ υψηλός συντελεστής προσδιορισμού ($R^2=0,98$). Η προβολή των χρόνων συγκέντρωσης από τις εμπειρικές σχέσεις Giandotti και Kirpich υποδηλώνει μια αντιστοιχία ύψους απορροής 2,0 mm και 19,2 mm, αντίστοιχα. Επίσης, σχέση δύναμης με υψηλό συντελεστή προσαρμογής ($R^2=0,99$), συνδέει την παροχή αιχμής στην διατομή εξόδου της λεκάνης και τον χρόνο απόκρισης, όπως παρουσιάζεται στο *Διάγραμμα 6.7*.



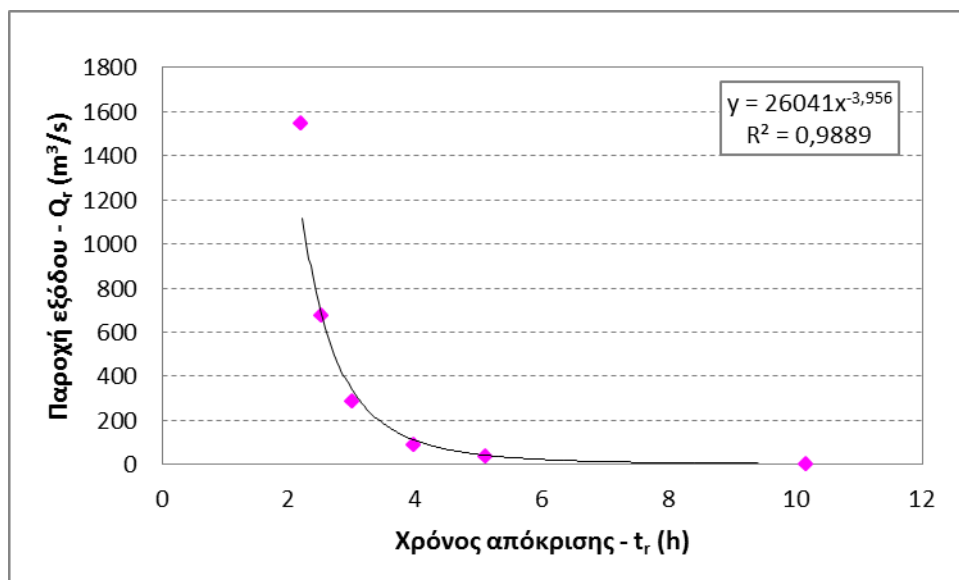
Εικόνα 6.8. Δεδομένα εξόδου από το περιβάλλον GIS της λεκάνης του ρέματος Ραφήνας.

Πίνακας 6.3. Αποτελέσματα υπολογισμού του χρόνου απόκρισης και της παροχής στην έξοδο για μεταβλητό ύψος απορροής στην λεκάνη του ρέματος Ραφήνας.

| Χρόνος απόκρισης t_r (hr) | Ύψος απορροής P_r (mm) | Παροχή στην έξοδο Q_r (m ³ /s) |
|-----------------------------|--------------------------|---|
| 10,2 | 1 | 3,4 |
| 5,1 | 5 | 33,4 |
| 4,0 | 10 | 85,8 |
| 3,0 | 25 | 283,9 |
| 2,5 | 50 | 674,2 |
| 2,2 | 100 | 1.545,8 |



Διάγραμμα 6.6. Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσεως του ύψους απορροής για την λεκάνη του ρέματος Ραφήνας.



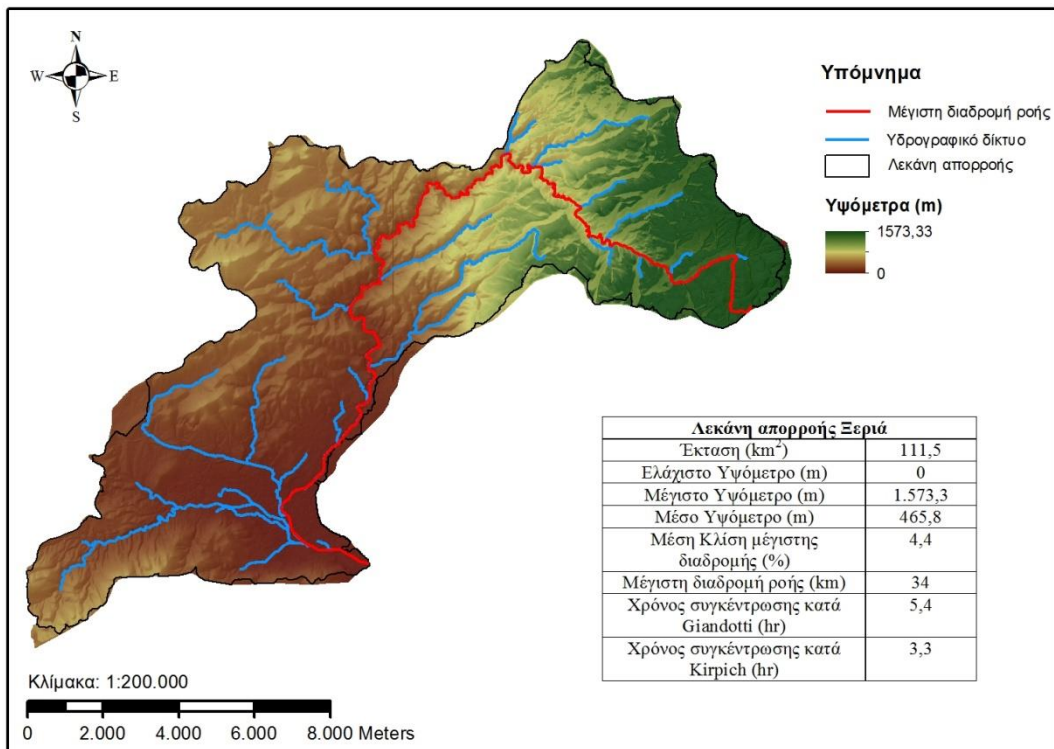
Διάγραμμα 6.7. Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσεως της παροχής εξόδου για την λεκάνη του ρέματος Ραφήνας.

6.4. Λεκάνη απορροής Ξεριά

Καθορισμός ανάντη λεκάνης υπό την θεώρηση συνθηκών επίγειας ροής

Το φυσικό έδαφος του ανάντη τμήματος της λεκάνης του ρέματος Ξεριά χαρακτηρίζεται από μέτρια διαπερατότητα, με αποτέλεσμα ο μηχανισμός επίγειας ροής να μην είναι τόσο προφανής. Για τον λόγο αυτό, γίνεται η θεώρηση ότι η δισδιάστατη ροή αρχίζει να συγκεντρώνεται σε μισγάγγειες, για έκταση 1 km^2 . Το σημείο τομής του υδρογραφικού δικτύου (σηματιζόμενου με κατώφλι 1 km^2) με την μέγιστη διαδρομή ροής, ορίζει την έκταση της ανάντη λεκάνης στα 3 km^2 , στην οποία θεωρούνται συνθήκες επίγειας ροής. Ο συντελεστής παρεμπόδισης για την εν λόγω έκταση επιλέγεται στα $1,55 \text{ m/s}$, καθώς η κυρίαρχη κάλυψη γης είναι δασική.

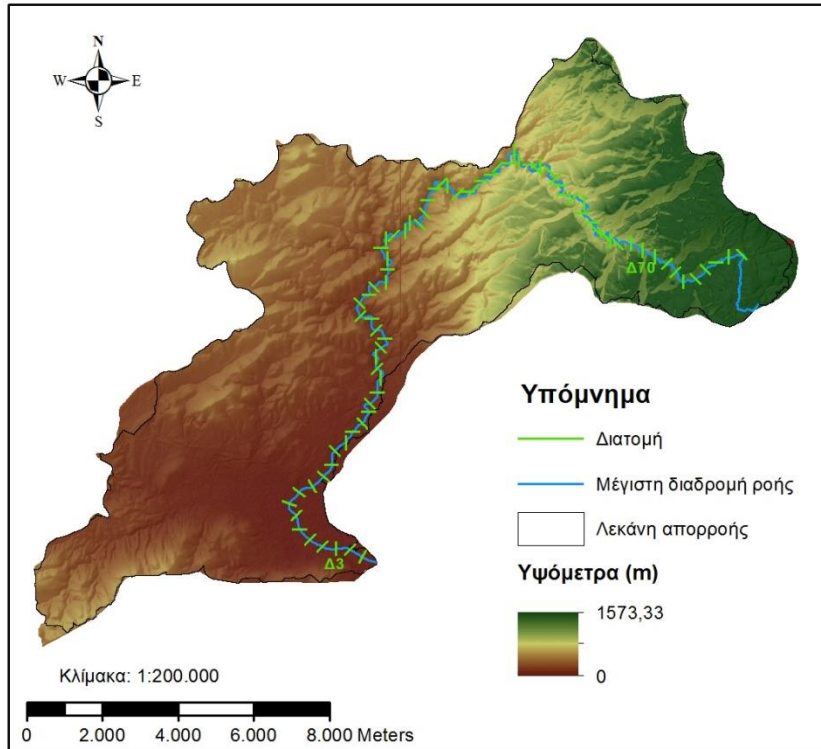
Ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης κατά Giandotti εκτιμάται σε 5,4 hr. Το σχήμα της λεκάνης διαμορφώνεται από μακρόστενη γεωμετρία, μεγάλου μήκους διαδρομής ροής και έντονης ελικοειδούς μορφής, και από ήπιο ανάγλυφο στο μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης, επιβραδύνοντας τις διαδικασίες απόκρισης (**Εικόνα 6.9**). Επιπλέον, το μέσο υψόμετρο επηρεάζει σημαντικά τον υπολογισμό του χρόνου στην σχέση Giandotti, καθώς είναι χαμηλό και μη αντιπροσωπευτικό της τοπογραφίας της λεκάνης, διότι ανάντη αυτού κυριαρχούν έντονες κλίσεις που αναμένεται να επιταχύνουν την απόκριση.



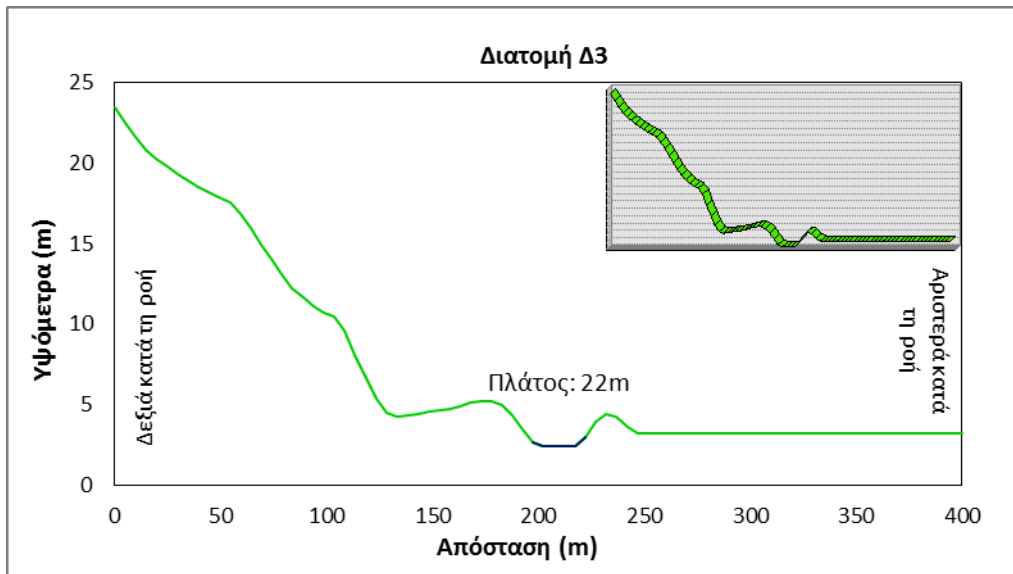
Εικόνα 6.9. Υδρογραφικό δίκτυο και μέγιστη διαδρομή ροής της λεκάνης του Ξεριά.

Καθορισμός υδραυλικών χαρακτηριστικών

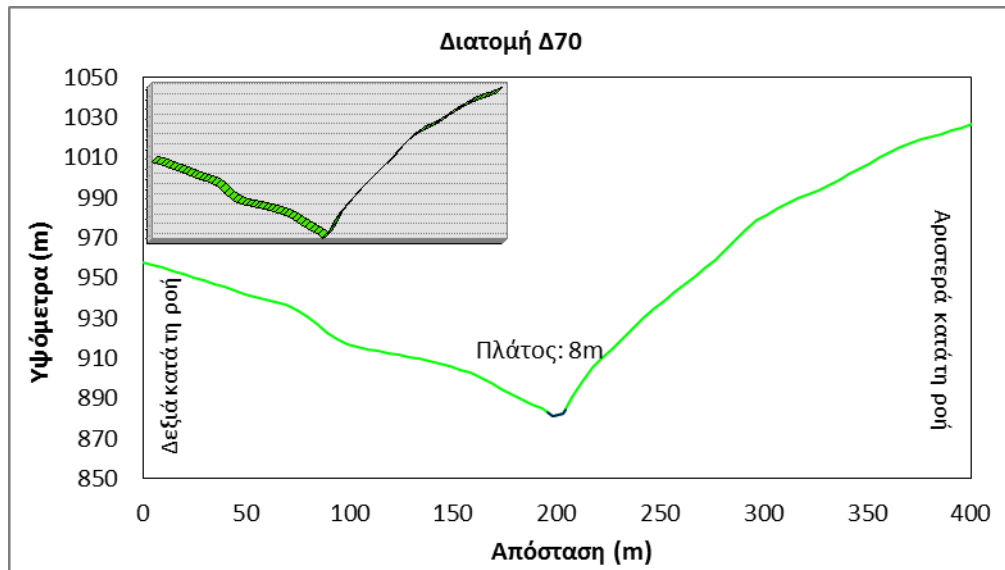
Για τον προσδιορισμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών κατά μήκος της μέγιστης υδραυλικής διαδρομής ροής, συνολικού μήκους 34 km, και, ειδικότερα, στο τμήμα όπου θεωρείται ροή στο υδατόρευμα, κατασκευάστηκαν διατομές στο ΨΜΥ μέσω του εργαλείου Construct XS Cutline του HEC-GeoRAS, ανά 400 m και με ένα πλάτος 400 m. Όπου χρειάστηκε, έγινε πύκνωση των διατομών, ώστε να βελτιωθεί η προσέγγιση του πλάτους (**Εικόνα 6.10 & Διάγραμμα 6.8 & 6.9**). Μέσω του εργαλείου Interpolate Shape του ArcToolbox, έγινε παρεμβολή της υψομετρικής πληροφορίας του ΨΜΥ ανάλυσης 5 m στις διατομές, ενώ ο τελικός καθορισμός του πλάτους, στην πλειονότητα των διατομών, συμπληρώθηκε και από προσεγγιστική μετρητική πληροφορία του φωτομωσαϊκού ορθοφωτοχάρτη, της εφαρμογής του Κτηματολογίου. Το πλάτος της διατομής κάθε επιμέρους τμήματος της μέγιστης διαδρομής ροής ορίστηκε ως ο μέσος όρος των διατομών του τμήματος, συμπεριλαμβανομένων και των διατομών των κόμβων που το οριοθετούν. Για τον συντελεστή τραχύτητας επιλέχθηκε η τιμή 0,03, με εξαίρεση τα δύο πλέν κατάντη τμήματα, ανάντη της εκβολής του ποταμού, στα οποία δόθηκε η τιμή 0,02, λόγω του ότι η διατομή είναι επενδυμένη με σκυρόδεμα.



Εικόνα 6.10. Σχεδίαση διατομών κατά μήκος της μέγιστης διαδρομής ροής της λεκάνης του ρέματος Ξεριά.



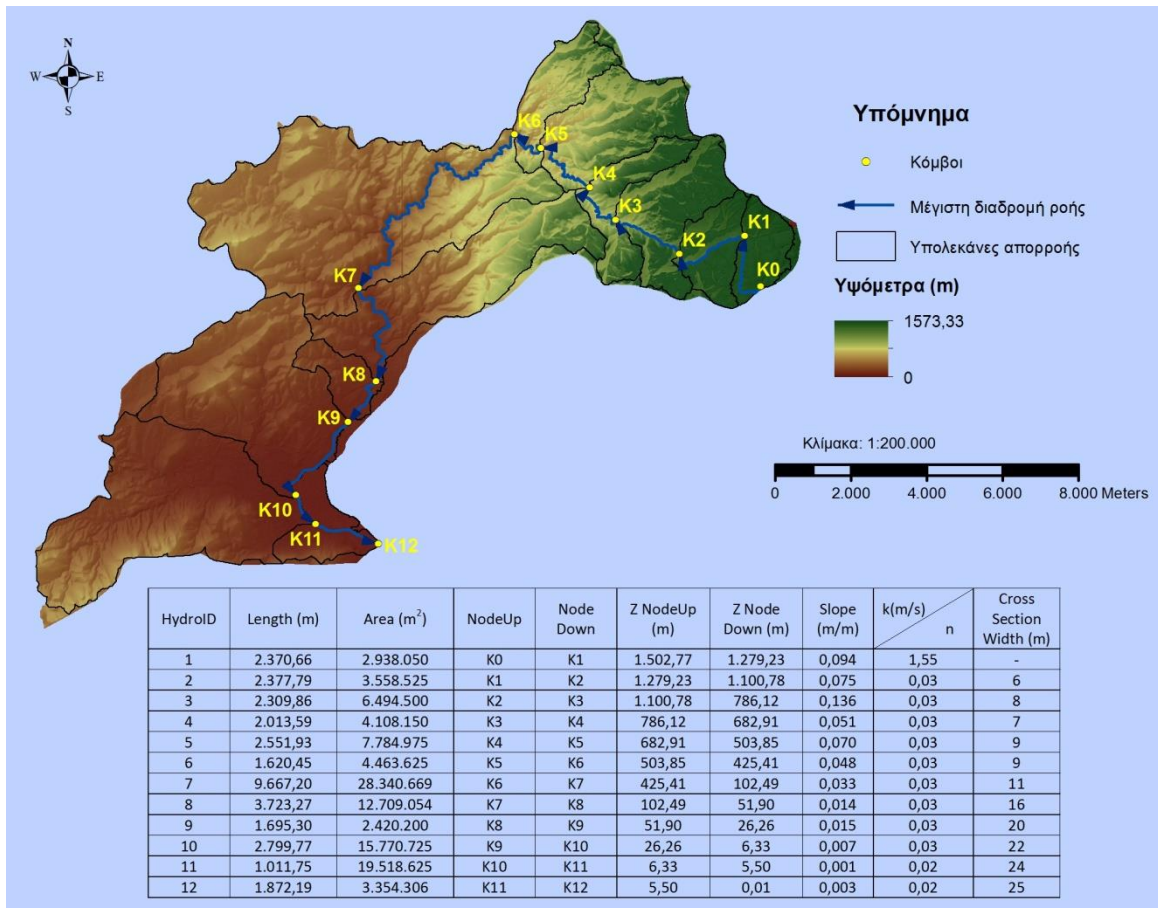
Διάγραμμα 6.8. Παράδειγμα προσδιορισμού του πλάτους της διατομής Δ3.



Διάγραμμα 6.9. Παράδειγμα προσδιορισμού του πλάτους της διατομής Δ70.

6.4.1. Δεδομένα εξόδου από το GIS – Εφαρμογή της μεθοδολογίας

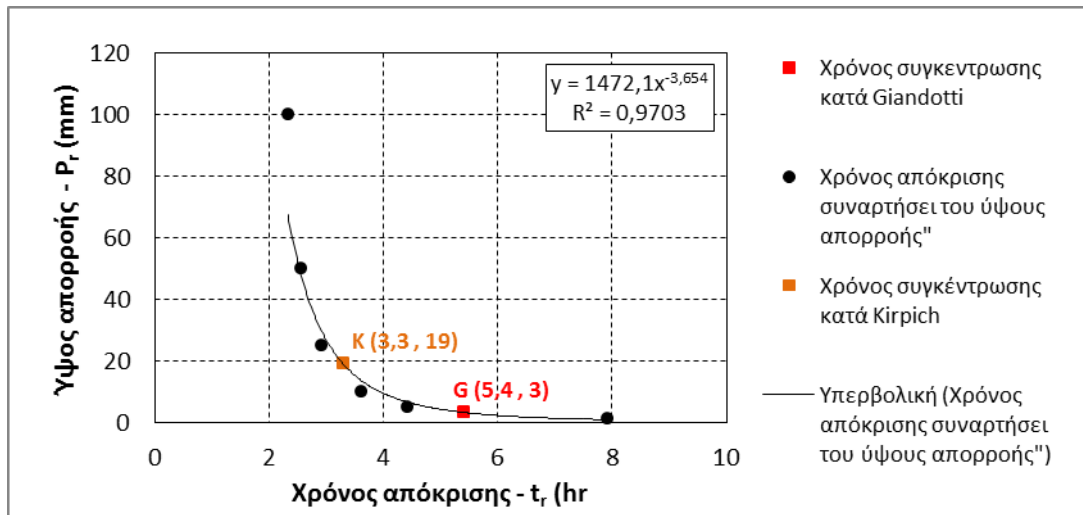
Από την ανωτέρω ανάλυση εκτιμήθηκαν τα δεδομένα εξόδου της μεθοδολογίας, τα οποία επισυνάπτονται συγκεντρωτικά στην **Εικόνα 6.11**, για τον υπολογισμό του χρόνου απόκρισης συναρτήσεως του ύψους απορροής (**Πίνακας 6.4**). Όπως διαπιστώνεται από το **Διάγραμμα 6.10**, ο χρόνος μεταβάλλεται με το ύψος απορροής, διαμορφώνοντας μια υπερβολική γραμμική τάση, με βάση την οποία οι χρόνοι συγκέντρωσης κατά Giandotti και Kirpich αντιστοιχούν σε ένα ύψος απορροής 3 mm και 19 mm, αντίστοιχα. Τέλος, όπως και στις υπόλοιπες υπό μελέτη λεκάνες, έτσι και στην λεκάνη του Ξεριά, η παροχή αιχμής και ο χρόνος απόκρισης συνδέονται με μια σχέση δύναμης (**Διάγραμμα 6.11**).



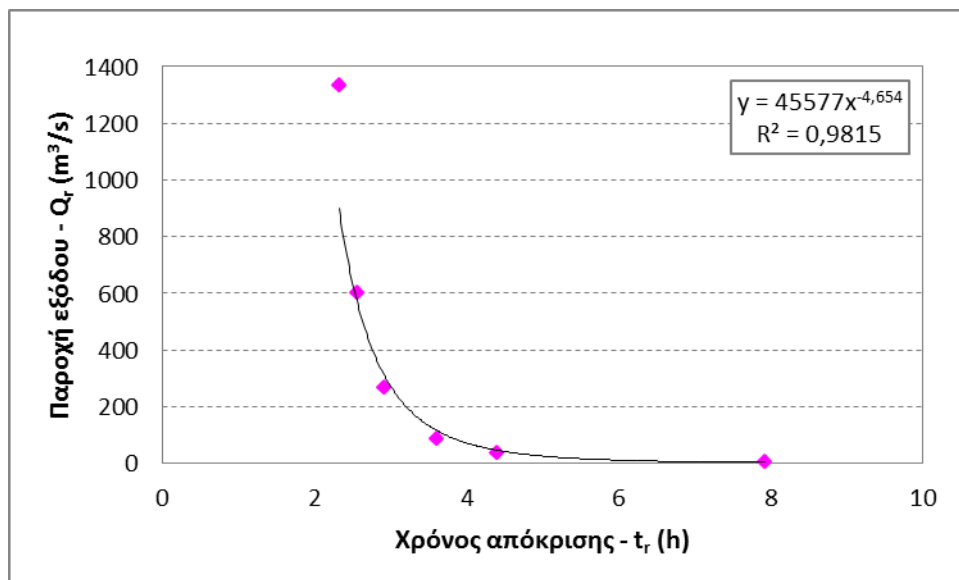
Εικόνα 6.11. Δεδομένα εξόδου από το περιβάλλον GIS της λεκάνης του Ξεριά.

Πίνακας 6.4. Αποτελέσματα υπολογισμού του χρόνου απόκρισης και της παροχής στην έξοδο για μεταβλητό ύψος απορροής στην λεκάνη του Ξεριά.

| Χρόνος απόκρισης t_r (hr) | Ύψος απορροής P_r (mm) | Παροχή στην έξοδο Q_r (m ³ /s) |
|-----------------------------|--------------------------|---|
| 7,9 | 1 | 3,9 |
| 4,4 | 5 | 35,1 |
| 3,6 | 10 | 85,7 |
| 2,9 | 25 | 265,5 |
| 2,6 | 50 | 603,1 |
| 2,3 | 100 | 1332,2 |



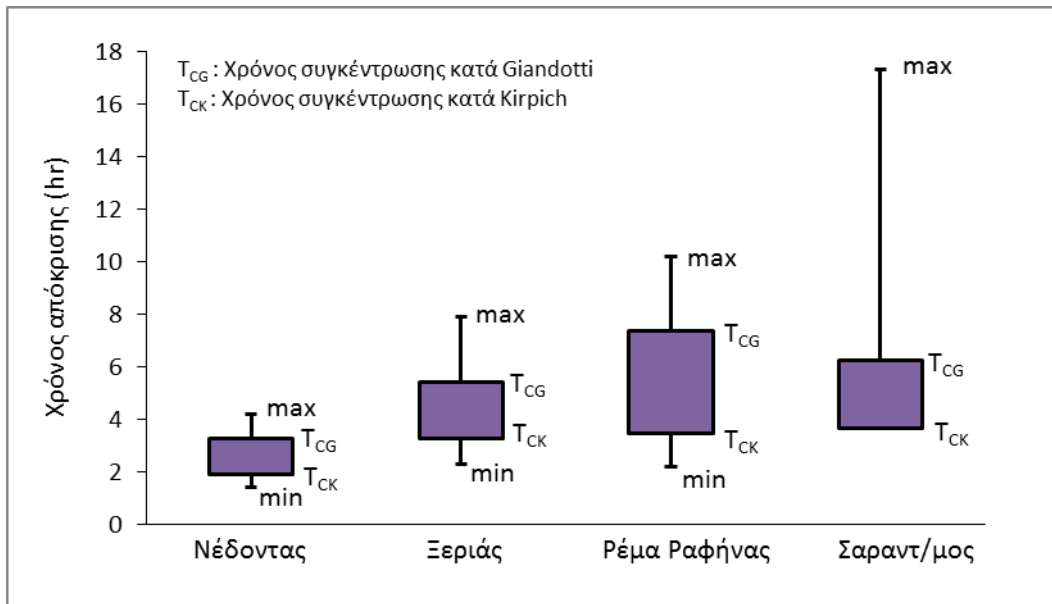
Διάγραμμα 6.10. Μεταβολή χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής για την λεκάνη του Ξεριά.



Διάγραμμα 6.11. Μεταβολή χρόνου απόκρισης συναρτήσει της παροχής εξόδου για την λεκάνη του Ξεριά.

6.5. Αποτελέσματα - Σχολιασμός

Στη συνέχεια συζητώνται ορισμένα πορίσματα που ανακύπτουν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων εφαρμογής της μεθοδολογίας, στις υπό εξέταση λεκάνες απορροής. Ένας εύληπτος τρόπος γραφικής απεικόνισης της διακύμανσης των τιμών μιας τυχαίας μεταβλητής είναι η δημιουργία διαγράμματος πλαισίου (box plot). Στο **Διάγραμμα 6.12** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των τεσσάρων λεκανών, μέσω της μορφής box plot, όπου διακρίνονται οι ακραίες τιμές (min, max) των χρόνων απόκρισης, καθώς και οι τιμές των χρόνων συγκέντρωσης κατά Giandotti και Kiriach, σε σχέση με το οριοθετούμενο εύρος των εκτιμώμενων τιμών.



Διάγραμμα 6.12. Box plots με το εκτιμώμενο εύρος τιμών του χρόνου απόκρισης για τις υπό μελέτη λεκάνες απορροής.

Όπως, διαπιστώνεται από το *Διάγραμμα 6.12*, η μεταβλητότητα των εκτιμώμενων χρόνων είναι μεγαλύτερη στις περιπτώσεις λεκανών απορροής, που περιέχουν μεγάλο ποσοστό εκτάσεων ήπιων κλίσεων, λόγω επίδρασης της αποθηκευτικότητας της λεκάνης και του υδατορεύματος. Ακόμη, είναι εμφανές ότι η σχέση του Giandotti εκτιμά σημαντικά μεγαλύτερους (περίπου διπλάσιους) χρόνους συγκέντρωσης σε σχέση με την εξίσωση Kirpich, και το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι δύο εμπειρικές σχέσεις χρησιμοποιούν διαφορετικό δείκτη για να εκφράσουν την επίδραση του αναγλύφου στο χρόνο απόκρισης της λεκάνης. Η απόκλιση του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti από την σχέση του Kirpich είναι αισθητά μικρότερη για την λεκάνη απορροής του Νέδοντα, που χαρακτηρίζεται από έντονες κλίσεις και ταχεία απόκριση, και μεγαλύτερη στην λεκάνη του ρέματος Ραφήνας, η οποία εμφανίζει την μεγαλύτερη ετερογένεια κλίσεων και μεγάλο ποσοστό επίπεδων επιφανειών σε σχέση με τις υπόλοιπες λεκάνες. Επομένως, η διαφορά των δύο χρόνων γίνεται πιο σημαντική σε λεκάνες με πιο ήπια τοπογραφία, όπου η μικρότερη διαφορά του μέσου υψομέτρου από το υψόμετρο εξόδου θα επιμηκύνει τον χρόνο συγκέντρωσης κατά Giandotti σε σχέση με την διαφορά της μέσης κλίσης από τον υδροκρίτη έως την έξοδο, που λαμβάνεται υπόψη στην εκτίμηση του χρόνου κατά Kirpich.

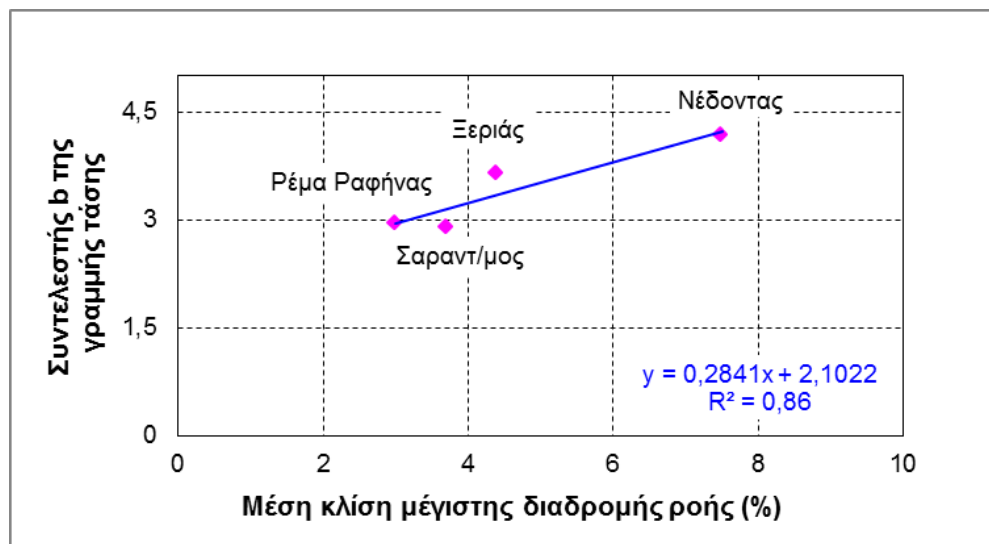
Από την εφαρμογή της μεθοδολογίας υπολογισμού του χρόνου απόκρισης συναρτήσεως του ύψους απορροής στις τέσσερις περιοχές μελέτης (*Διαγράμματα 6.2, 6.4, 6.6 & 6.10*) προκύπτει ότι οι δύο μεταβλητές είναι πολύ καλά συσχετισμένες, μέσω μιας σχέσης της μορφής $P_r = a t_r^{-b}$, με $a, b > 0$. Από την μορφή της συνάρτησης (υπερβολική γραμμή τάσης) προκύπτει ότι για πολύ υψηλά ύψη απορροής, P_r , παρατηρείται μια κατακόρυφη ασυμπτωτική συμπεριφορά του χρόνου απόκρισης, t_r , δηλαδή για $P_r \rightarrow \infty$, $t_r \rightarrow t_0$. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι τίθεται ένα ελάχιστο όριο στο χρόνο συγκέντρωσης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υδρολογικό σχεδιασμό έργων πολύ μεγάλης περιόδου επαναφοράς, για τα οποία τίθεται πολύ υψηλές απαιτήσεις ασφάλειας. Όμοιο συμπέρασμα προκύπτει και από την σχέση δύναμης της μορφής $Q_r = a' t_r^{-b'}$, με $a', b' > 0$, που συσχετίζει

τον χρόνο απόκρισης με την παροχή αιχμής (*Διαγράμματα 6.3, 6.5, 6.7 & 6.11*) και αναδεικνύει ότι για μεγάλες περιόδους επαναφοράς, ο χρόνος συγκέντρωσης συγκλίνει σε μια σταθερή τιμή.

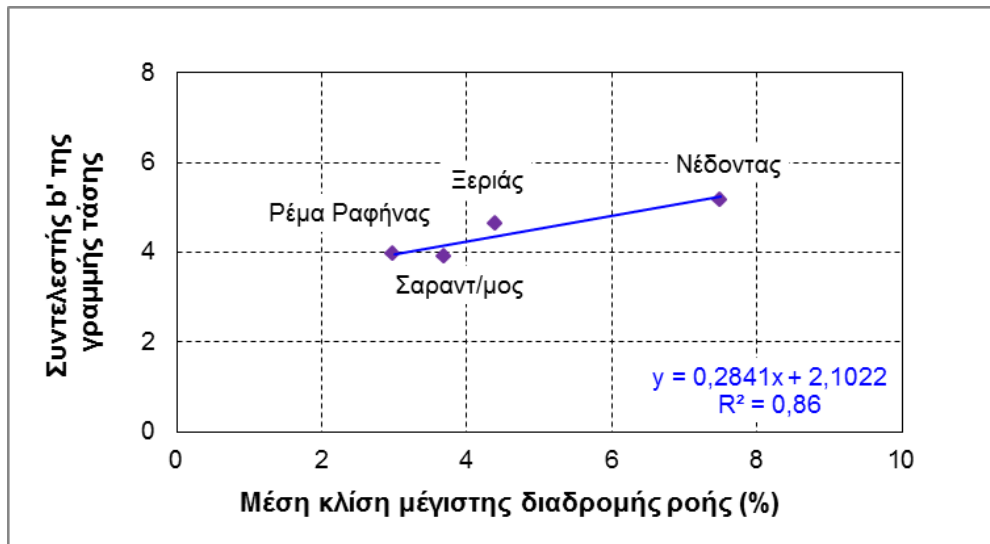
Από τα διαγράμματα διασποράς στις λεκάνες απορροής Νέδοντα, Ραφήνας και Ξεριά, φαίνεται ότι οι χρόνοι συγκέντρωσης κατά Giandotti και Kirpich αντιστοιχούν σε ύψη απορροής της τάξης των 2 mm και 20 mm, αντίστοιχα. Στον Σαρανταπόταμο, ο χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti αντιστοιχεί σε σημαντικά μεγαλύτερο ύψος απορροής (15 mm), ενώ ο χρόνος κατά Kirpich δεν αντιστοιχεί σε κανένα σημείο του διαγράμματος διασποράς, αποτελεί δηλαδή εξωκείμενο σημείο (outlier). Η ασυνέπεια αυτή οφείλεται προφανώς στις ιδιαιτερότητες της λεκάνης, οι οποίες έχουν εντοπιστεί και σε πρόσφατες αναλύσεις παρατηρημένων πλημμυρικών γεγονότων (Ευστρατιάδης κ.ά., 2014).

Επιχειρώντας μια πρώτη ερμηνεία των συντελεστών a , b και a' , b' των γραμμών τάσης $P_T = a t_T^{-b}$ και $Q_T = a' t_T^{-b'}$, αντίστοιχα, από τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής, προέκυψαν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα. Ειδικότερα, φαίνεται ότι οι εκθέτες b και b' συνδέονται γραμμικά με την μέση κλίση της μέγιστης διαδρομής ροής, και μάλιστα με την ίδια γραμμική εξίσωση υψηλής συσχέτισης (*Διάγραμμα 6.13 & 6.14*). Από την άλλη πλευρά, υπάρχει μια προφανής αύξηση της τιμής των συντελεστών a και a' συναρτήσει του μήκους της μέγιστης διαδρομής ροής (*Διάγραμμα 6.15 & 6.16*). Ωστόσο, επειδή οι τιμές που αντιστοιχούν στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου είναι μη αντιπροσωπευτικές, δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

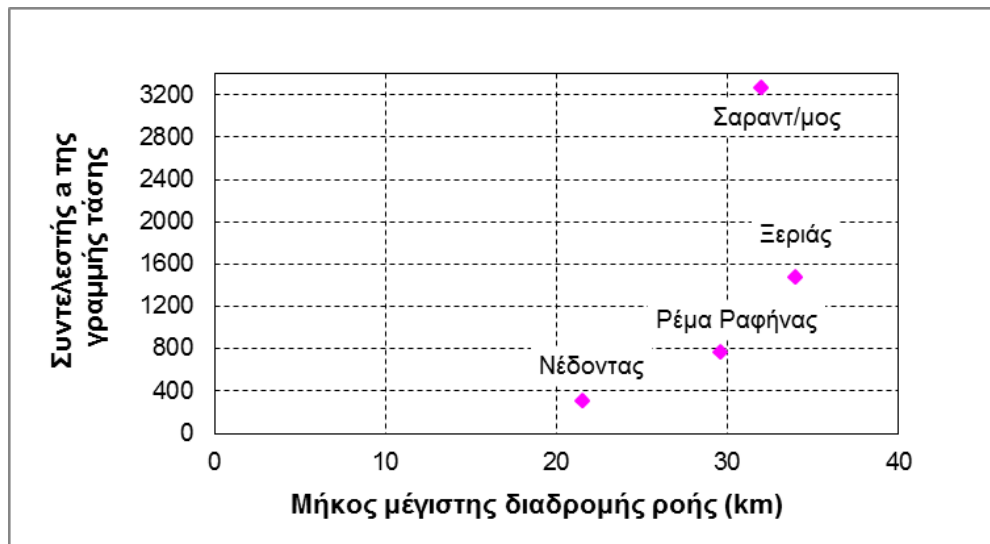
Είναι προφανές ότι προκειμένου να καταρτιστούν στατιστικά συνεπείς περιοχικές σχέσεις για την εκτίμηση της σχέσης μεταβολής του χρόνου συγκέντρωσης συναρτήσει των παραπάνω γεωμορφομετρικών μεγεθών, θα πρέπει να επαναληφθούν οι υπολογισμοί για ένα μεγαλύτερο δείγμα λεκανών, με ποικιλία γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών.



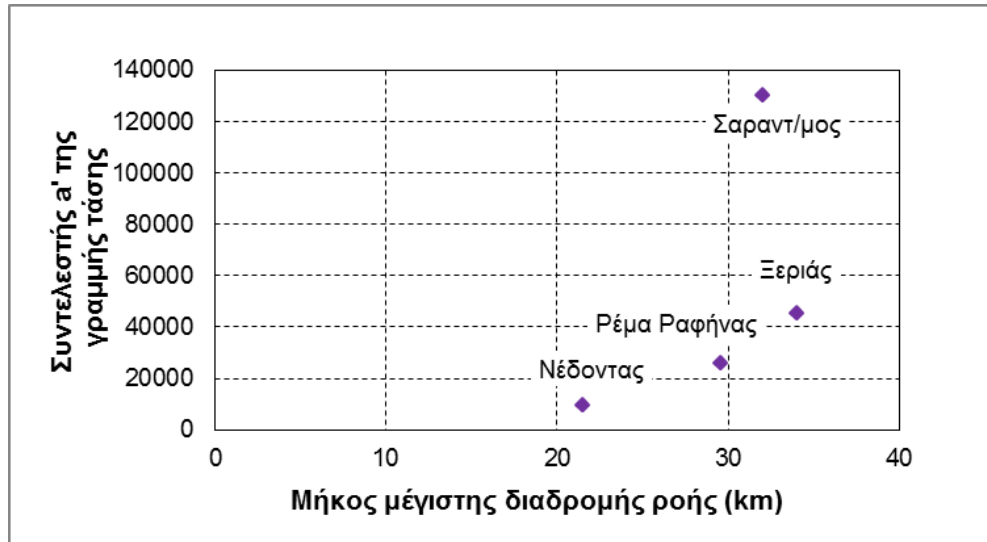
Διάγραμμα 6.13. Γραμμική τάση μεταβολής συντελεστή b γραμμών τάσης $P_T = a t_T^{-b}$ συναρτήσει της μέσης κλίσης της μέγιστης διαδρομής ροής των υπό εξέταση λεκανών απορροής.



Διάγραμμα 6.14. Γραμμική τάση μεταβολής συντελεστή b' γραμμών τάσης $Q_T = a' t_T^{-b'}$ συναρτήσει της μέσης κλίσης της μέγιστης διαδρομής ροής των υπό εξέταση λεκανών απορροής.



Διάγραμμα 6.15. Απεικόνιση μεταβολής συντελεστή a γραμμών τάσης $P_T = a t_T^{-b}$ συναρτήσει του μήκους της μέγιστης διαδρομής ροής των υπό εξέταση λεκανών απορροής.



Διάγραμμα 6.16. Απεικόνιση μεταβολής συντελεστή α' γραμμών τάσης $Q_r = a' t_r^{-b'}$ συναρτήσει του μήκους της μέγιστης διαδρομής ροής των υπό εξέταση λεκανών απορροής.

7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

7.1. Σκοπός και μεθοδολογία

Η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί μια διαδικασία αξιολόγησης και ποσοτικοποίησης της επίδρασης της αβεβαιότητας των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου στο παραγόμενο προϊόν. Προσδίδει ένα είδος στοχαστικού χαρακτήρα στο προσδιοριστικό πλαίσιο της μοντελοποίησης, καθώς εξετάζει τον αντίκτυπο που θα έχει η μεταβολή μιας μόνο παραμέτρου τη φορά στον εξεταζόμενο αποτέλεσμα. Η ανάλυση ευαισθησίας είναι ένα σημαντικό εργαλείο, που συμβάλλει στην κατανόηση των εσωτερικών παραμέτρων του μοντέλου και υποδεικνύει προσεκτική συλλογή και ανάλυση δεδομένων από τον χρήστη, σε περιπτώσεις μεγάλης ευαισθησίας κάποιας παραμέτρου εισόδου. Έχει ευρύ πεδίο εφαρμογής και στόχων, που περιλαμβάνουν δοκιμές ευρωστίας των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου, ανίχνευση σφαλμάτων και διόρθωση ή αφαίρεση δεδομένων εισόδου, καθώς και την αναζήτηση του πεδίου ορισμού των παραμέτρων εισόδου προς ικανοποίηση κάποιου κριτηρίου που βελτιστοποιεί το εξαγόμενο αποτέλεσμα (μέθοδος Monte Carlo).

Στην παρούσα εργασία η ανάλυση ευαισθησίας υλοποιείται με τη μορφή σεναρίων, και στοχεύει στην κατανόηση των σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου του μοντέλου και την διερεύνηση της συμπεριφοράς του στο ενδεχόμενο κάποιας αλλαγής. Η πιο απλή μέθοδος εφαρμογής της ανάλυσης ευαισθησίας είναι η μεταβολή μιας και μόνο παραμέτρου τη φορά (“once at a time”) μέσα σε ένα δεδομένο διάστημα, π.χ. μέγιστο και ελάχιστο όριο μεταβολής, στο οποίο έχει φυσικό νόημα η παράμετρος, και κατόπιν η εφαρμογή του μοντέλου στα όρια αυτά, ώστε να προσδιοριστεί η φύση και η έκταση της μεταβολής του αποτελέσματος. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι γενικότερα, η εν λόγω απλουστευμένη διαδικασία δεν λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου του μοντέλου, καθώς δεν ερευνά την ταυτόχρονη μεταβολή τους.

Οι μεταβλητές εισόδου που επιλέχθηκε να διερευνηθούν μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας του μοντέλου σε ένα εύρος μεταβολής $\pm 20\%$ είναι οι εξής:

- το πλάτος της ορθογωνικής διατομής, b
- ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning, n
- ο συντελεστής παρεμπόδισης επίγειας ροής, k

Επισημαίνεται ότι αυτές οι παράμετροι θεωρήθηκε κρίσιμο να εξεταστούν σε ένα πλαίσιο ανάλυσης της ευαισθησίας του μοντέλου, καθώς είναι αυτές που διέπονται από πολλαπλές πηγές αβεβαιότητας, οι οποίες οφείλονται σε σφάλματα μέτρησης, απουσία πληροφορίας πεδίου και ανεπαρκή κατανόηση των μηχανισμών λειτουργίας τους.

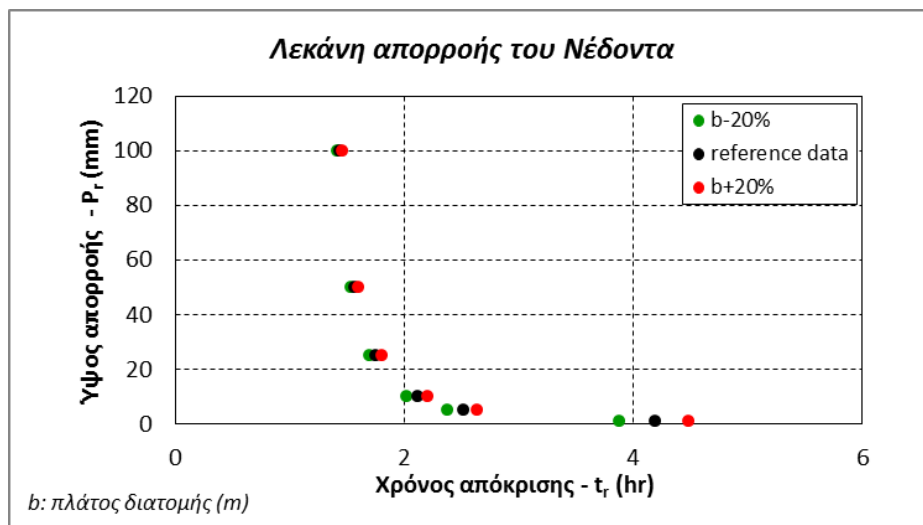
7.2. Ανάλυση μεταβολής πλάτους ορθογωνικής διατομής

Κατά την αύξηση του πλάτους της διατομής, το εμβαδόν της έχει την τάση να αυξηθεί, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ταχύτητα ροής του νερού και κατ' επέκταση να επιβραδύνεται ο χρόνος ταξιδιού ροής. Η μεταβολή που υφίσταται η παράμετρος του χρόνου έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της παροχής αιχμής που εκτιμάται με την ορθολογική μέθοδο.

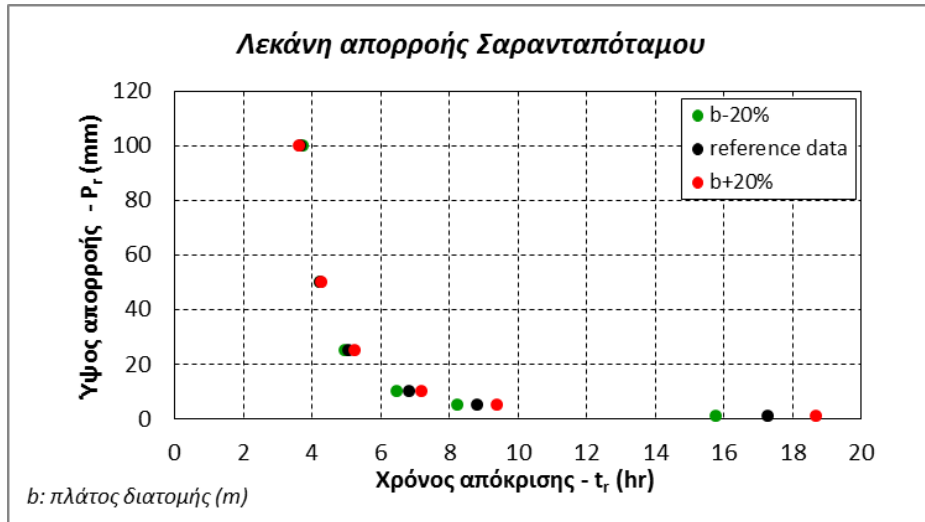
Αντίθετα, με τη μείωση του πλάτους, δημιουργείται επιτάχυνση της ροής στο υδατόρευμα και επομένως αύξηση των παροχών εξόδου στους κόμβους και επιτάχυνση του χρόνου απόκρισης.

Στο πλέον ανάντη τμήμα της μέγιστης διαδρομής ροής, στο οποίο θεωρούνται συνθήκες επίγεια ροής, το πλάτος της διατομής δεν αποτελεί δεδομένο εισόδου, επομένως τα αντίστοιχα μεγέθη εξόδου (ταχύτητα, χρόνος, παροχή) διατηρούνται σταθερά. Το γεγονός ότι η παροχή εξόδου του πλέον ανάντη τμήματος αποτελεί την παροχή εισόδου του νερού στο υδατόρευμα βάσει της οποίας πραγματοποιείται ο προσδιορισμός του βάθους ροής (μέσω βελτιστοποίησης της Σχ. 3.11) και δεδομένου ότι το πλάτος της διατομής μειώνεται ή αυξάνεται, το βάθος ροής έχει την τάση να ακολουθεί αντίθετη μεταβολή. Ωστόσο, αυτή η συμπεριφορά του εν λόγω μεγέθους δεν δύναται να μεταβάλλει το εμβαδόν της διατομής, το οποίο ακολουθεί την κατεύθυνση μεταβολής του πλάτους.

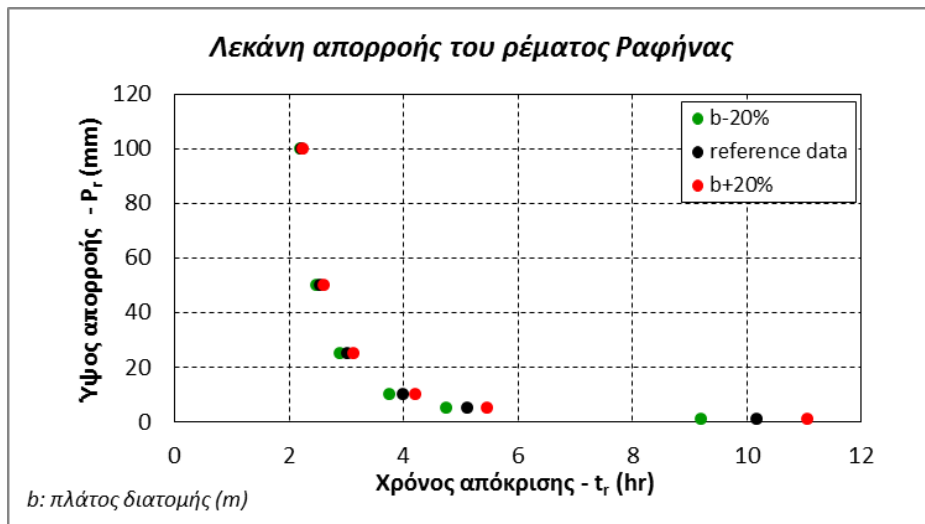
Από τα *Διαγράμματα 7.1, 7.2, 7.3 & 7.4* που απεικονίζουν τα αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας του μοντέλου στο πλάτος της διατομής στις περιοχές μελέτης, διαπιστώνεται ότι για υψηλά ύψη απορροής, που αντιστοιχούν σε μεγάλες περιόδους επαναφοράς, η μεταβολή της εξεταζόμενης παραμέτρου δεν επηρεάζει πρακτικά τον χρόνο απόκρισης της λεκάνης στο αντίστοιχο επεισόδιο βροχής. Η επισήμανση αυτή είναι ιδιαίτερος σημαντική, καθώς υποδηλώνει ότι με την επιλογή μιας υψηλής περιόδου επαναφοράς καταιγίδας σχεδιασμού, η εκτίμηση του χρόνου απόκρισης δεν επηρεάζεται από την ακριβή γνώση του πλάτους της διατομής.



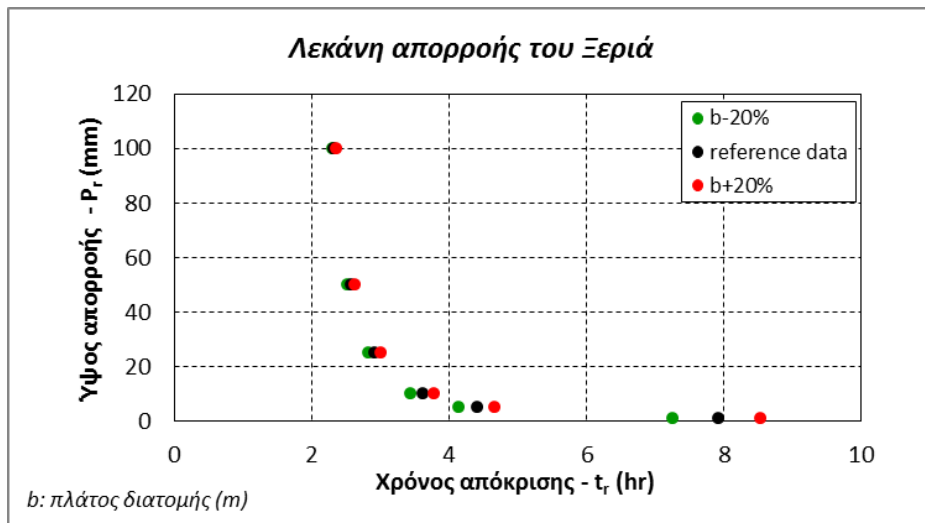
Διάγραμμα 7.1. Ανάλυση ευαισθησίας πλάτους διατομής για την λεκάνη απορροής του Νέδοντα.



Διάγραμμα 7.2. Ανάλυση ευαισθησίας πλάτους διατομής για την λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου.



Διάγραμμα 7.3. Ανάλυση ευαισθησίας πλάτους διατομής για την λεκάνη απορροής του ρέματος Ραφήνας.

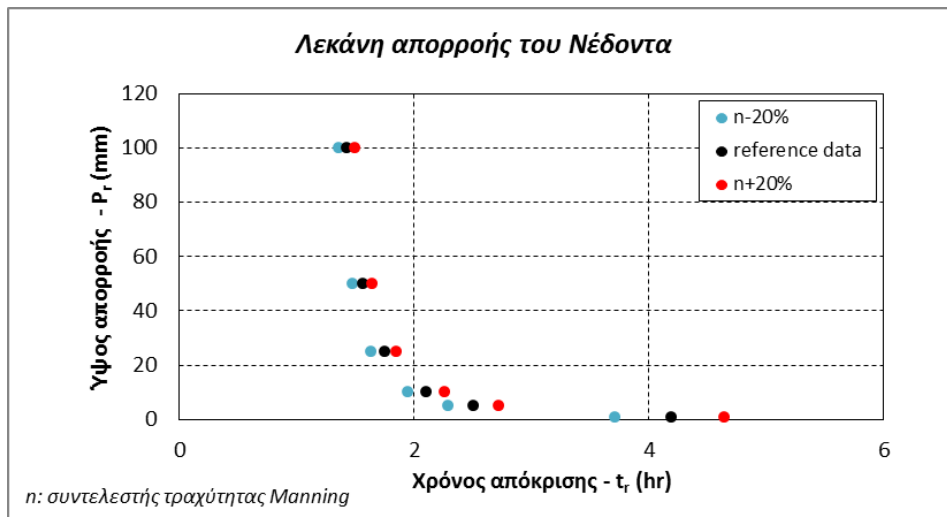


Διάγραμμα 7.4. Ανάλυση ευαισθησίας πλάτους διατομής για την λεκάνη απορροής του ρέματος Ξεριά.

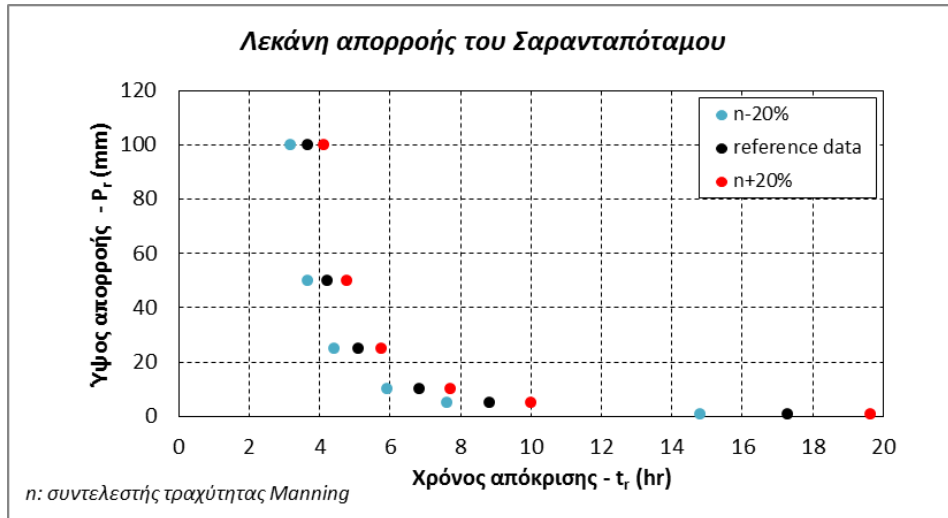
7.3. Ανάλυση μεταβολής συντελεστή τραχύτητας κατά Manning

Ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning, που εκφράζει την αντίσταση στην ροή, προφανώς εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κοίτης. Αν και στην πραγματικότητα είναι μια μεταβλητή, κατά την εφαρμογή της εξίσωσης Manning κατά κανόνα θεωρείται σταθερή, καθώς είναι δύσκολη η ποσοτικοποίηση των παραγόντων που την επηρεάζουν. Με την αύξηση της τραχύτητας του υλικού της κοίτης, μεγαλώνει η αντίσταση στην ροή, με αποτέλεσμα την μείωση της ταχύτητας ροής και της παροχής και αύξηση της διάρκειας ταξιδιού του πλημμυρικού κύματος. Όπως διαπιστώνεται από τα *Διαγράμματα 7.5, 7.6, 7.7 & 7.8*, η επίδραση της αβεβαιότητας παραμέτρου είναι πιο αισθητή στα χαμηλά ύψη απορροής και για τις τέσσερις περιοχές μελέτης.

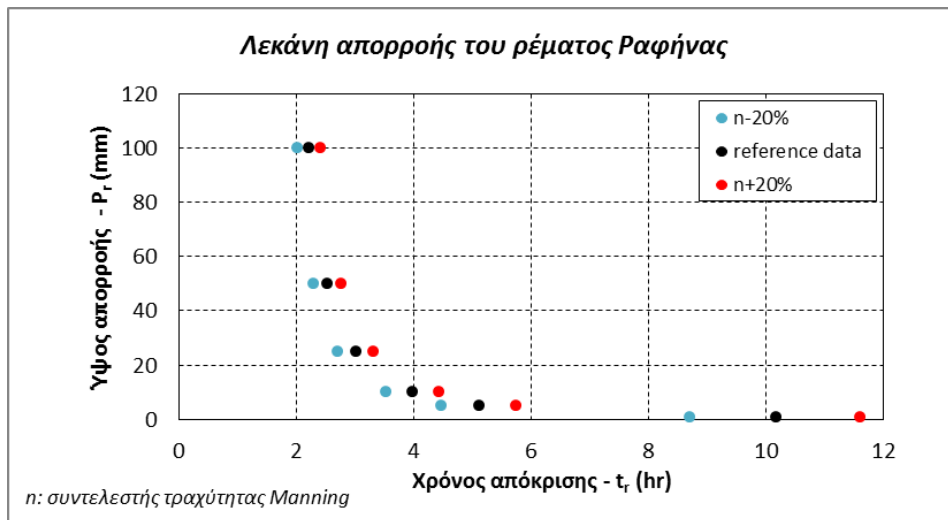
Ως προς τις υπολοπιποιες μεταβλητές εξόδου, κατ' αντιστοιχία με το πλάτος της διατομής, στο πρώτο τμήμα που αφορά την επίγεια ροή δεν παρατηρείται μεταβολή των εν λόγω μεταβλητών, ενώ στα τμήματα που αφορούν τη ροή στο υδατόρευμα παρατηρείται μικρή αύξηση του βάθους ροής και του εμβαδού της διατομής.



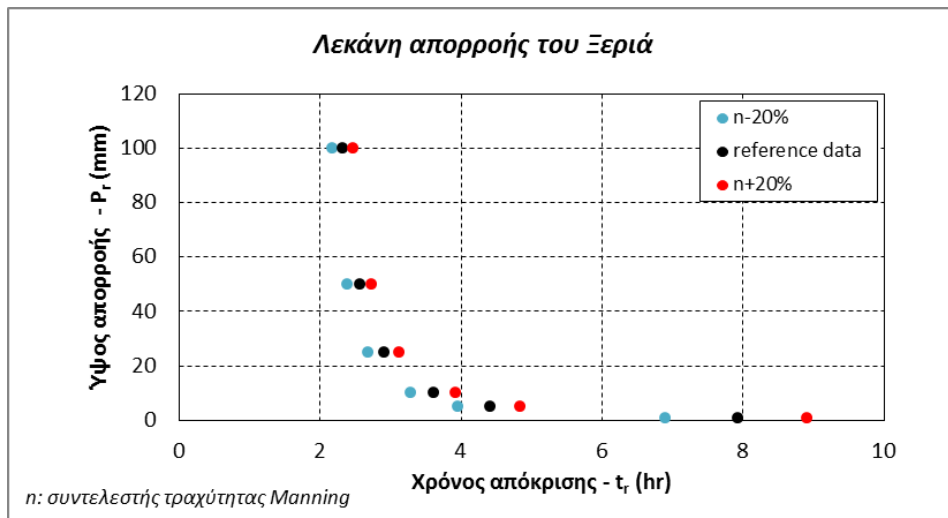
Διάγραμμα 7.5. Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή τραχύτητας Manning για την λεκάνη απορροής του Νέδοντα.



Διάγραμμα 7.6. Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή τραχύτητας Manning για την λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου.



Διάγραμμα 7.7. Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή τραχύτητας Manning για την λεκάνη απορροής του ρέματος της Ραφήνας.



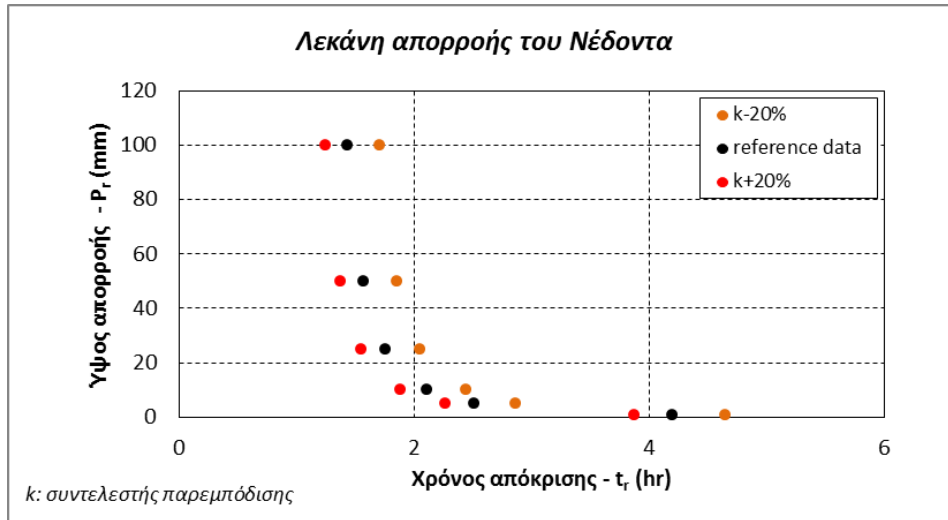
Διάγραμμα 7.8. Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή τραχύτητας Manning για την λεκάνη απορροής του ρέματος Ξεριά.

7.4. Ανάλυση μεταβολής συντελεστή παρεμπόδισης

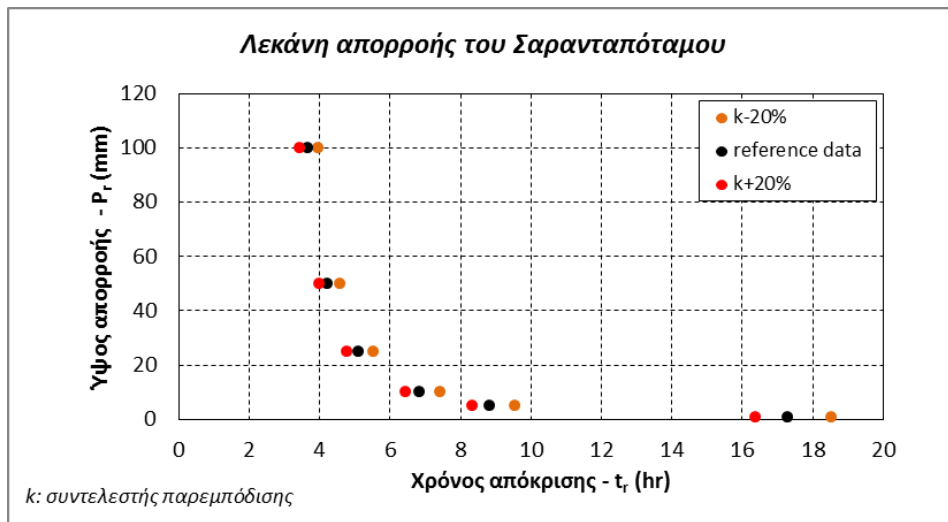
Ο προσδιορισμός του συντελεστή παρεμπόδισης στηρίζεται σε αδρομερείς μακροσκοπικές υποθέσεις σχετικά με την υδραυλική ακτίνα της επίγειας ροής στο έδαφος. Ο ακριβής καθορισμός του εν λόγω συντελεστή είναι πολύπλοκος και πρακτικά ανέφικτος, καθώς ακόμα κι αν μπορούσε να προσδιοριστεί από παρατηρήσεις πεδίου, η ανομοιογένειά του δεν μπορεί να αποτυπωθεί στην μακροκλίμακα του ΨΜΥ.

Η αβεβαιότητα του συντελεστή παρεμπόδισης δημιουργεί την ίδια τάση μεταβολής στην ταχύτητα με την οποία συντελείται η επίγεια ροή, κι αυτό γιατί βάσει της Σχ. 3.6, τα δύο μεγέθη είναι ανάλογα. Η αύξηση ή μείωση της ταχύτητας στο πρώτο ανάντη τμήμα της μέγιστης διαδρομής ροής επιφέρει αύξηση ή μείωση της παροχής εισόδου στο υδατόρευμα, αντίστοιχα και μεταβάλλει τον χρόνο ταξιδιού ροής του τμήματος αυτού μέσω της αντιστρόφως ανάλογης σχέσης που συνδέει τα δύο μεγέθη. Η μεταβολή του συντελεστή παρεμπόδισης, αν και αφορά αποκλειστικά και μόνο το ανάντη τμήμα της μέγιστης διαδρομής, επηρεάζει όλες τις κατάντη υδραυλικές διεργασίες. Πιο συγκεκριμένα, με την μείωση του συντελεστή παρεμπόδισης, η παροχή εισόδου στο υδατόρευμα μειώνεται, με αποτέλεσμα να μειώνονται το βάθος ροής, άρα και το εμβαδόν της διατομής. Κατ' επέκταση, μειώνονται η ταχύτητα και η παροχή, επιβραδύνοντας τους χρόνους ροής των επιμέρους τμημάτων. Επομένως, με την αρχική μειωμένη παροχή εισόδου στο υδατόρευμα όλα τα κατάντη τμήματα επιβραδύνονται, καθώς κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου επικρατούν μικρότερες ταχύτητες ροής, που τελικά οδηγεί σε μεγαλύτερους χρόνους απόκρισης.

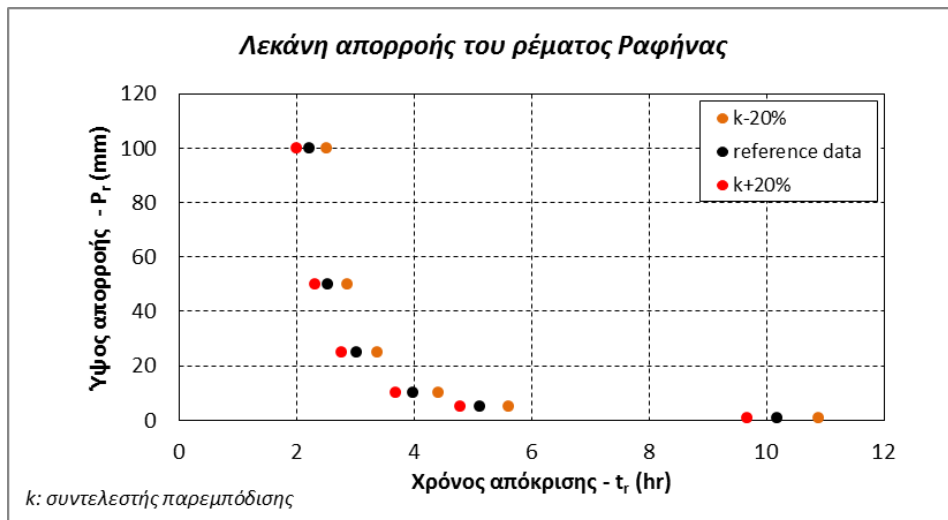
Οι επισημάνσεις αυτές συνάγονται με βάση τα *Διαγράμματα 7.9, 7.10, 7.11 & 7.12*, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας του συντελεστή παρεμπόδισης για τις υπό εξέταση λεκάνες απορροής. Ένα ακόμη συμπέρασμα που προκύπτει από τα γραφήματα είναι ότι για τις λεκάνες απορροής του Νέδοντα και του ρέματος Ξεριά, το εύρος μεταβολής των χρόνων απόκρισης κατά την ανάλυση ευαισθησίας προκύπτει σχετικά σταθερό για όλα τα ύψη απορροής, και αισθητά σημαντικό ακόμα και σε υψηλά ύψη απορροής. Αντίθετα, στις λεκάνες του ρέματος Ραφήνας και του Σαρανταπόταμου, στα μεγαλύτερα ύψη απορροής οι αποκλίσεις των υπολογιζόμενων χρόνων από τον χρόνο αναφοράς (reference data) είναι μικρότερες. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως συνδέεται με την έκταση της ανάντη λεκάνης απορροής στην οποία θεωρείται ότι κυριαρχεί η επίγεια ροή, η οποία είναι μεγαλύτερη στις λεκάνες του Νέδοντα και του Ξεριά (2,5 km² και 3,0 km², αντίστοιχα) απ' ότι στις άλλες δύο λεκάνες, όπου εφαρμόζεται το κατώφλι του 1 km².



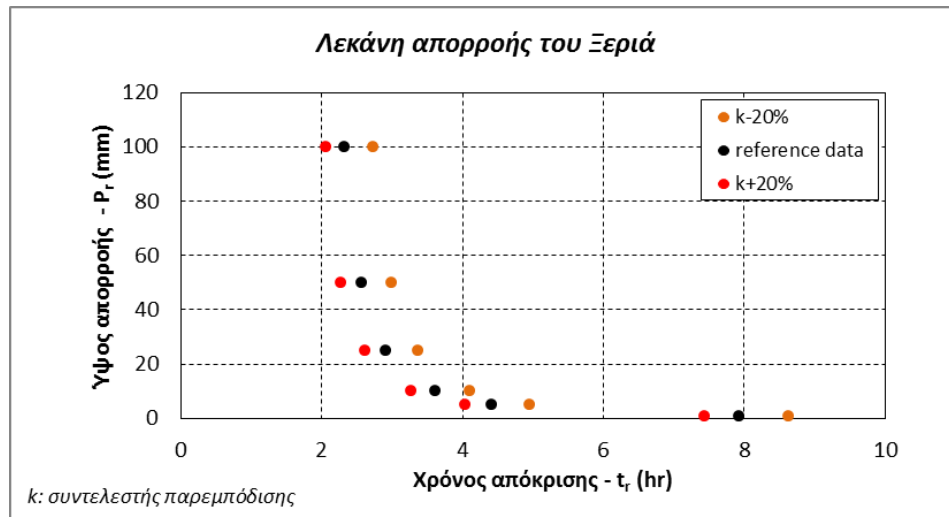
Διάγραμμα 7.9. Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή παρεμπόδισης για την λεκάνη απορροής του Νέδοντα.



Διάγραμμα 7.10. Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή παρεμπόδισης για την λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου.



Διάγραμμα 7.11. Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή παρεμπόδισης για την λεκάνη απορροής του ρέματος Ραφήνας.



Διάγραμμα 7.12. Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή παρεμπόδισης για την λεκάνη απορροής του Ξεριά.

7.5. Συμπεράσματα ανάλυσης ευαισθησίας

Από την παραπάνω ανάλυση εξάγεται το συμπέρασμα ότι το πλάτος της διατομής αποτελεί παράμετρο με μικρή ευαισθησία, η οποία εξασθενεί ακόμα περισσότερο στα μεγάλα ύψη απορροής και για τις τέσσερις λεκάνες. Ως παράμετρος μείζονος σημασίας εμφανίζεται ο συντελεστής τραχύτητας Manning για το ρέμα της Ραφήνας και τον Σαρανταπόταμο, ενώ για το ρέμα του Ξεριά και του Νέδοντα, ο συντελεστής τραχύτητας αναδεικνύεται ως περισσότερο ευαίσθητη παράμετρος στα χαμηλότερα ύψη απορροής και ο συντελεστής παρεμπόδισης στα υψηλότερα.

7.6. Διερεύνηση χωρικής ανάλυσης ΨΜΥ

Στο πλαίσιο των αναλύσεων ευαισθησίας κρίθηκε σκόπιμη και η μελέτη επίδρασης της χωρικής ανάλυσης του ΨΜΥ, το οποίο ποσοτικοποιεί και περιγράφει τις υδρογραφικές παραμέτρους της λεκάνης απορροής. Το ερώτημα που τίθεται είναι αν και κατά πόσο η χωρική ανάλυση επηρεάζει τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά και κατ' επέκταση τους χρόνους απόκρισης της λεκάνης για δεδομένο ύψος απορροής. Για τον σκοπό αυτό, συγκρίνονται τα παράγωγα ψηφιακά μοντέλα χωρικών αναλύσεων 25 m, 50 m και 100 m, με ένα πρωτογενές ψηφιακό μοντέλο ανάλυσης 5 m, το οποίο χρησιμοποιείται ως αναφορά καθώς επιτυγχάνει τον μεγαλύτερο βαθμό λεπτομέρειας και έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε για την λεκάνη απορροής του Νέδοντα, που χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο.

Το πρώτο βήμα αφορά στην αναπαράσταση των χωρικών δεδομένων σε μια σειρά μοντέλων διαφορετικής ανάλυσης, μέσω τεχνικών παρεμβολής. Η χωρική παρεμβολή συνιστά μια μαθηματική επεξεργασία κατά την οποία αξιοποιούνται μετρημένες τιμές μιας μεταβλητής σε διακριτές θέσεις για τον καθορισμό των τιμών σε άγνωστες θέσεις, όπου δεν περιλαμβάνονται δεδομένα. Η διαδικασία παρεμβολής αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της δημιουργίας ενός ΨΜΥ, χρησιμοποιώντας κάθε είδους υψομετρική πληροφορία που συλλέγεται από επίγειες γεωδαιτικές μεθόδους (total station ή GPS), από ψηφιοποίηση

τοπογραφικών χαρτών, από στερεοζεύγη αεροφωτογραφιών ή δορυφορικών εικόνων ή από δεδομένα συστημάτων τηλεπισκόπησης (νέφος σημείων LiDAR). Η διεθνής βιβλιογραφία έχει καλύψει σε μεγάλη έκταση το αντικείμενο της παρεμβολής, μέσα από την παράθεση πολλών δημοσιεύσεων και μεθόδων εφαρμογής. Βασικά κριτήρια επιλογής της μεθόδου αποτελεί ο ρυθμός μεταβολής και η ποιότητα των αρχικών δεδομένων (ακρίβεια και πυκνότητα σημείων), αλλά και η ταχύτητα προσπέλασης και πιστότητα αναπαράστασης του μετασχηματισμού.

Στις βασικές χωρικές μεθόδους παρεμβολής εντάσσονται ντετερμινιστικές προσεγγίσεις, όπως η μέθοδος αντιστρόφου απόστασης, και στοχαστικές, όπως η γεωστατιστική μέθοδος Kriging. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η τελευταία είναι η περισσότερο ακριβής, καθώς βασίζεται στην χωρική αυτοσυσχέτιση τόσο των υπο προσδιορισμό σημείων, όσο και των δεδομένων μεταξύ τους και προσφέρει μια εποπτεία του αποτελέσματος καθώς παραθέτει ένα μέτρο του σφάλματος των προσδιοριζόμενων τιμών. Ωστόσο, η εν λόγω μέθοδος δεν επιλέχθηκε λόγω των υψηλών απαιτήσεων σε υπολογιστική επεξεργασία, και για τον ίδιο λόγο δεν εφαρμόστηκε η ντετερμινιστική μέθοδος της δικυβικής παρεμβολής (cubic interpolation), που είναι επίσης πολύ χρονοβόρα. Δεδομένου ότι στην προκειμένη περίπτωση, η παρεμβολή βασίζεται στις τιμές του ΨΜΥ υψηλής ανάλυσης (5 m), τα οποία παρουσιάζουν συστηματική διάταξη, επιλέγεται η διγραμμική παρεμβολή (bilinear), στην οποία λαμβάνονται υπόψη οι τιμές των τεσσάρων πλησιέστερων γειτονικών φατνίων με συντελεστές βάρους την απόσταση. Η εν λόγω αναδειγματοληψία είναι κατάλληλη για συνεχείς οντότητες και υπερτερεί έναντι άλλων ντετερμινιστικών μεθόδων, όπως η μέθοδος του εγγύτερου γείτονα (nearest neighbor), η οποία είναι υπεραπλουστευμένη και καταλληλότερη σε ποιοτικά ταξινομημένα δεδομένα.

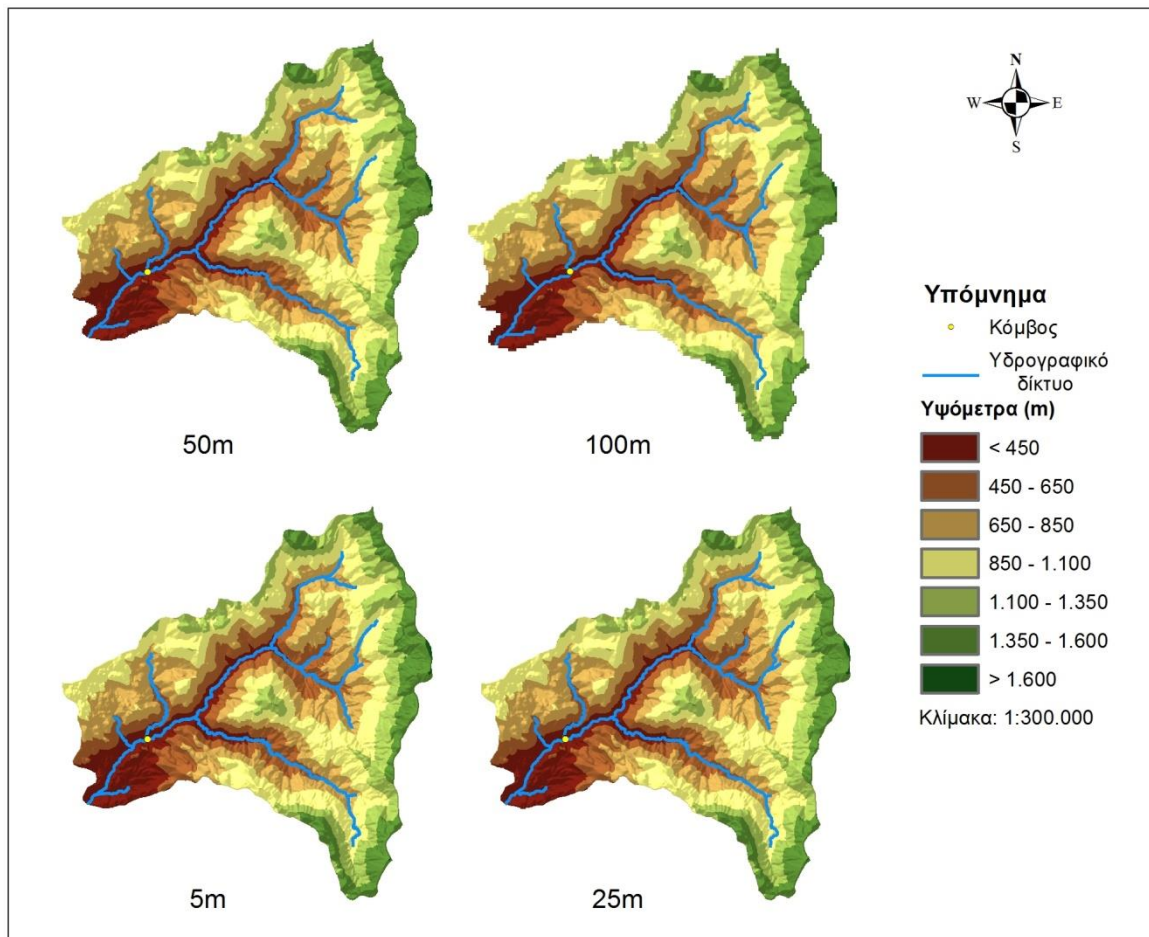
Γενικά, η ακρίβεια της παρεμβολής εκτιμάται μέσω του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, συγκρίνοντας αληθή υψόμετρα φωτοσταθερών σημείων του μοντέλου με τα προσδιοριζόμενα βάσει της παρεμβολής. Ωστόσο, στην μελέτη αυτή, ως μέτρο ακρίβειας της παρεμβολής θεωρήθηκε η απόκλιση του μέσου υψόμετρου του παράγωγου μοντέλου από το θεωρούμενο ως αληθές μέσο υψόμετρο του μοντέλου αναφοράς (**Πίνακα 7.1**).

Πίνακας 7.1. Σύγκριση μέσων υψόμετρων ΨΜΕ διαφορετικών χωρικών αναλύσεων για την λεκάνη του Νέδοντα.

| Διάσταση φατνίου (m) | Μέσο υψόμετρο (m) | Διαφορά μέσων υψόμετρων (m) |
|----------------------|-------------------|-----------------------------|
| 5 | 866,415 | - |
| 25 | 866,397 | 0,018 |
| 50 | 866,317 | 0,098 |
| 100 | 866,172 | 0,242 |

Κατόπιν, η εξαγωγή των δεδομένων από το λογισμικό του ArcGIS ακολούθησε την διαδικασία των Κεφαλαίων 3 και 4, διατηρώντας τα κριτήρια χωροθέτησης των κόμβων, την επιλογή του κατωφλίου έναρξης της ροής στο υδρογραφικό δίκτυο (2,5 km²) και τις τιμές που αφορούσαν τα πλάτη των διατομών. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να τονιστεί ότι με την αύξηση της ισοδιάστασης του μοντέλου, η τοποθέτηση των κόμβων και του σημείου έναρξης της ροής αλλάζει, και το γεγονός αυτό οφείλεται σε ζητήματα

αναπαράστασης της συγκέντρωσης ροής. Ειδικότερα, με την αύξηση της ελάχιστης επιφανειακής μονάδας μέτρησης στο μοντέλο, αυξάνονται οι ελάχιστες απόλυτες τιμές της έκτασης της ανάντη συμβάλλουσας περιοχής, με αποτέλεσμα να υπολογίζονται πιο αυξημένοι όγκοι απορροής ανά φατνίο. Το γεγονός αυτό μεταβάλλει, σε ορισμένες περιπτώσεις, την σκιαγράφιση του δικτύου αποστράγγισης, όπως διαπιστώνεται στο παράδειγμα της **Εικόνας 7.1**, στην οποία το υδρογραφικό δίκτυο συρρικνώνεται στην ανάλυση των 100 m, αλλάζοντας τη θέση του κόμβου σύνδεσης δύο κλάδων του δικτύου.



Εικόνα 7.1. Αναπαράσταση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης του Νέδοντα από σύνολα διαφορετικών χωρικών αναλύσεων.

7.6.1. Αποτελέσματα σύγκρισης ΨΜΥ διαφορετικών χωρικών αναλύσεων

Σε μια γενικότερη σύγκριση των μοντέλων προκύπτει ότι με την μείωση της ανάλυσης το μέγιστο υψόμετρο υποεκτιμάται και το ελάχιστο υπερεκτιμάται, λόγω της ομαλοποίησης της απεικόνισης του ανάγλυφου. Ως προς την έκταση της λεκάνης απορροής, εμφανίζεται μια τάση ελαφράς υπερεκτίμησής της κατά περίπου 1% στα 100 m ανάλυση και κατά 0,2% στις αναλύσεις των 25 m και 50 m. Ωστόσο η τάξη μεγέθους της μεταβολής είναι εξαιρετικά μικρή, καθιστώντας επουσιώδη την απόκλιση στο υπολογιζόμενο εμβαδόν, η οποία κυρίως οφείλεται σε σφάλματα της μεθόδου της παρεμβολής. Η ικανότητα του ΨΜΕ να αποδώσει τους μαιανδρισμούς των ρεμάτων περιορίζεται σταδιακά, οδηγώντας σε μείωση του μήκους ροής στις αραιότερες αναλύσεις. Το μήκος της μέγιστης διαδρομής ροής εμφανίζει την μεγαλύτερη ποσοστιαία απόκλιση σε σχέση με τα άλλα

χαρακτηριστικά, ωστόσο είναι σε ικανοποιητικά πλαίσια, με την μέγιστη διαφορά να μην υπερβαίνει το 6% για την ανάλυση των 100 m (**Πίνακας 7.2**).

Η ανάλυση επιδρά στον χρόνο απόκρισης της λεκάνης με μια γενικότερη τάση μείωσής του στην αδρότερη διάσταση, και ποσοτικά η μεταβλητότητα αυτή συνδέεται με την μέθοδο προσδιορισμού του. Ο χρόνος συγκέντρωσης κατά Kirpich εμφανίζει μεγαλύτερες αποκλίσεις σε σχέση με τον χρόνο κατά Giandotti, κι αυτό λόγω μεγαλύτερης ευαισθησίας της παραμέτρου του μήκους, που υποεκτιμάται με πιο γρήγορο ρυθμό.

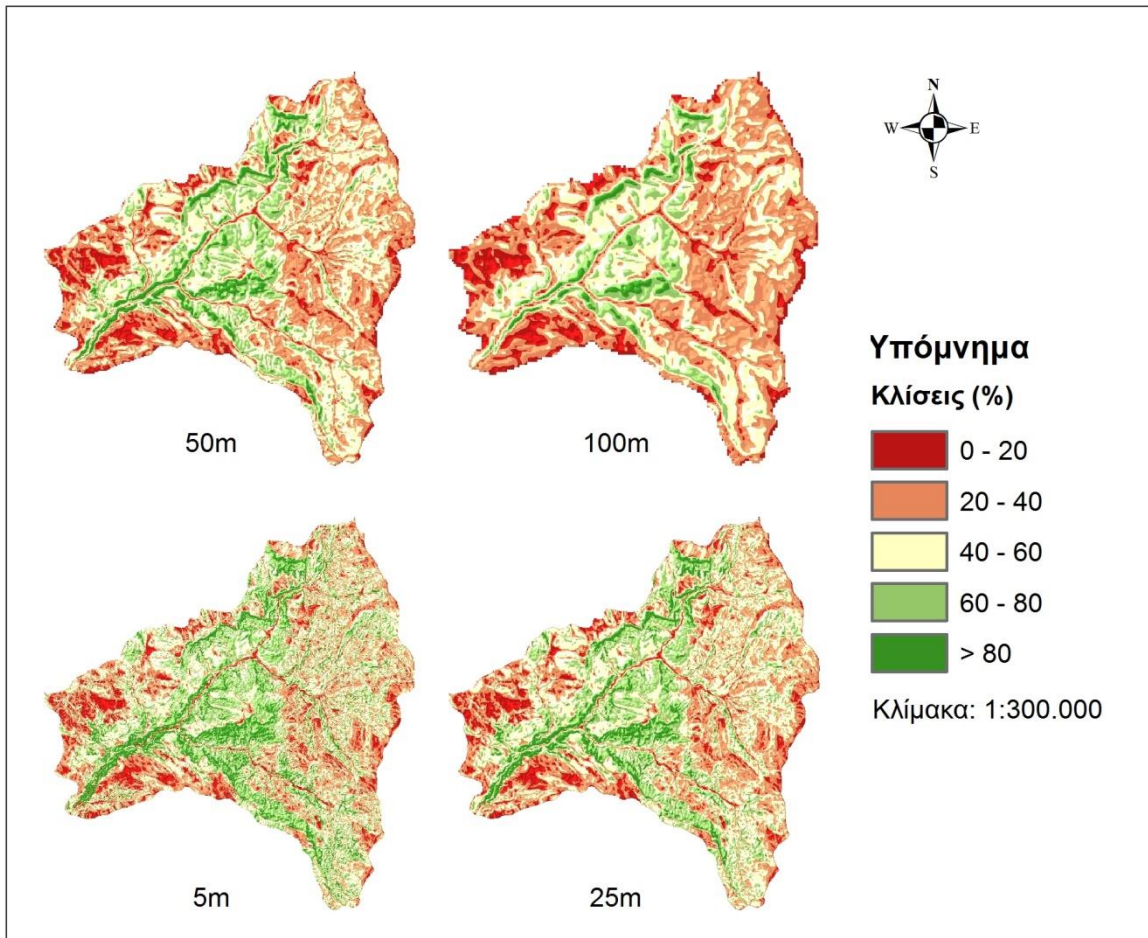
Η απώλεια της χωρικής μεταβλητότητας των υψομέτρων στο γενικευμένο μοντέλο μειώνει τις τιμές των κλίσεων, ορίζοντας μικρότερες τιμές σε έντονες πλαγιές και μεγαλύτερες σε πλαγιές ήπιας κλίσης (**Εικόνα 7.2**). Από το **Διάγραμμα 7.13** διαπιστώνεται ότι κατά την μείωση της ανάλυσης, η μέση κλίση της λεκάνης απορροής υποεκτιμάται ενώ η μέση κλίση της μέγιστης διαδρομής ροής εμφανίζει πολύ μικρή τάση αύξησης. Η επισήμανση αυτή συνάδει με την έρευνα των Moglen & Hartman (2001), όπου μέχρι και τα 90 m ανάλυση, η τιμή της μέσης κλίσης του υδατορεύματος πρακτικά διατηρείται. Αυτό συμβαίνει επειδή ποσοτικά δεν είναι προφανές, πώς πιθανόν να αλλάξει η κλίση του υδατορεύματος, δεδομένου ότι τόσο τα υψόμετρα όσο και μήκος ροής μειώνονται, καθώς «χάνεται» λεπτομέρεια από το μοντέλο. Το συμπέρασμα αυτό είναι πολύ σημαντικό, δεδομένου ότι στη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε ο χρόνος απόκρισης εξαρτάται από την μέση κλίση της μέγιστης διαδρομής ροής, και όχι από την μέση κλίση της λεκάνης.

Με την εφαρμογή της μεθοδολογίας υπολογισμού του χρόνου απόκρισης συναρτήσεως του ύψους απορροής, η υπερβολική γραμμή τάση μετατοπίζεται προς τον κατακόρυφο άξονα λόγω μείωσης των χρόνων, όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 7.14**. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι και για τις αδρότερες διαστάσεις φατνίων οι χρόνοι Giandotti και Kirpich εξακολουθούν να αντιστοιχούν σε περίπου 2 mm και 20 mm, όπως διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα στα **Διάγραμματα 7.15, 7.16 & 7.17**.

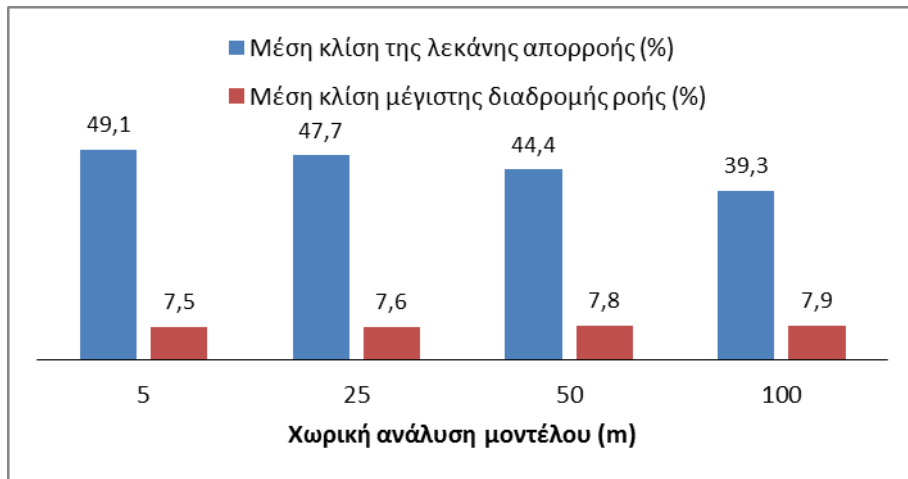
Πίνακας 7.2. Σύγκριση βασικών χαρακτηριστικών εκτιμώμενων από μοντέλα διαφορετικών χωρικών αναλύσεων για την λεκάνη του Νέδοντα.

| Μεταβλητή | Διάσταση φατνίου (m) | Τιμή μεταβλητής | Μεταβολή μεταβλητής ⁶ (%) |
|------------------------------------|----------------------|-----------------|--------------------------------------|
| Μήκος μέγιστης διαδρομής ροής (km) | 25 | 21,19 | 1,86 |
| | 50 | 20,70 | 4,09 |
| | 100 | 20,31 | 5,91 |
| Έκταση (km ²) | 25 | 115,04 | -0,20 |
| | 50 | 115,05 | -0,20 |
| | 100 | 116,04 | -1,07 |
| Χρόνος κατά Kirpich (hr) | 25 | 1,89 | 2,04 |
| | 50 | 1,84 | 4,47 |
| | 100 | 1,80 | 6,89 |
| Χρόνος κατά Giandotti (hr) | 25 | 3,26 | 0,70 |
| | 50 | 3,23 | 1,62 |
| | 100 | 3,22 | 2,14 |

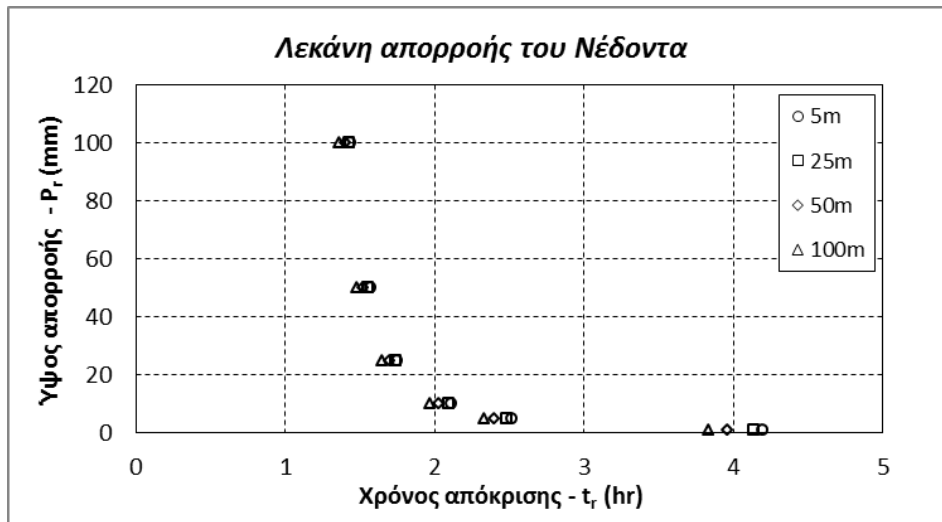
⁶ Σύγκριση με τις τιμές του μοντέλου αναφοράς ανάλυσης 5 m.



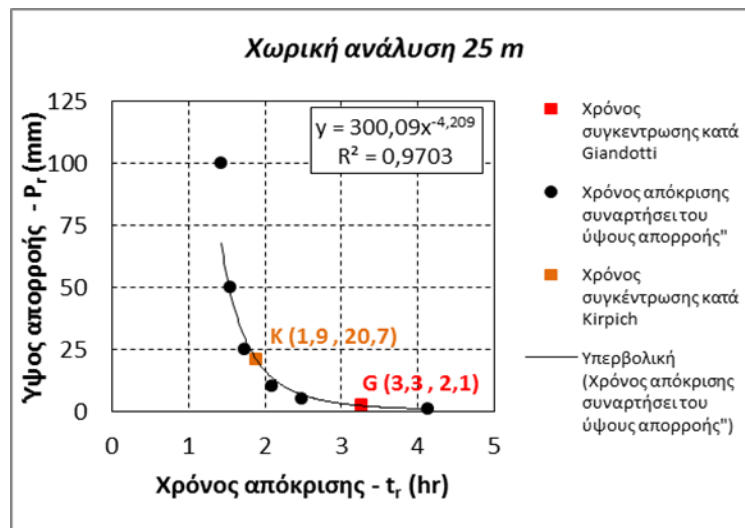
Εικόνα 7.2. Ψηφιακά μοντέλα κλίσεων διαφορετικών χωρικών αναλύσεων για την λεκάνη του Νέδοντα.



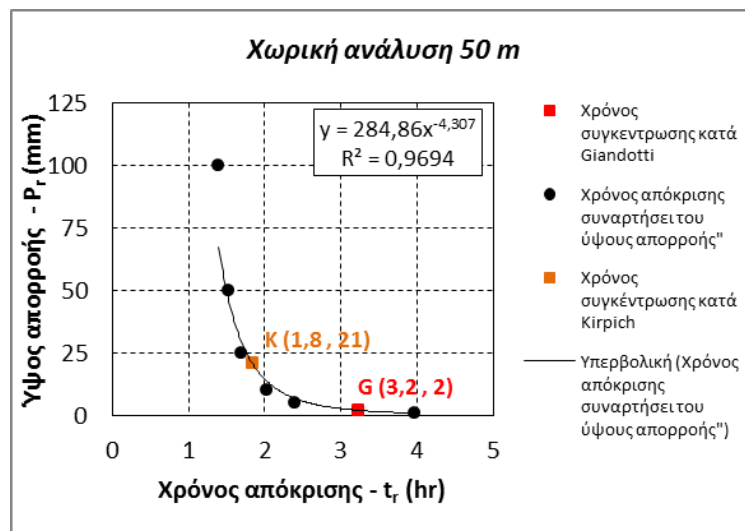
Διάγραμμα 7.13. Σύγκριση χαρακτηριστικών κλίσεων της λεκάνης του Νέδοντα για διαφορετικές χωρικές αναλύσεις.



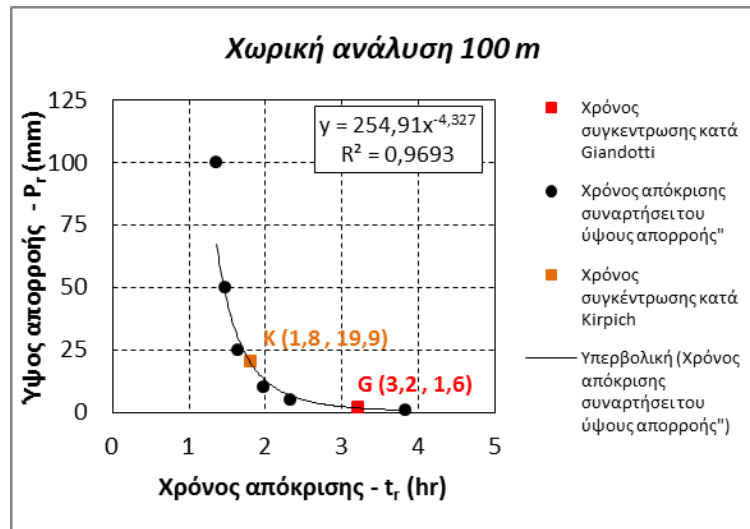
Διάγραμμα 7.14. Υπολογισμός των χρόνων απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής από ΨΜΥ διαφορετικών χωρικών αναλύσεων της λεκάνης του Νέδοντα.



Διάγραμμα 7.15. Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής από ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 25 m της λεκάνης του Νέδοντα.

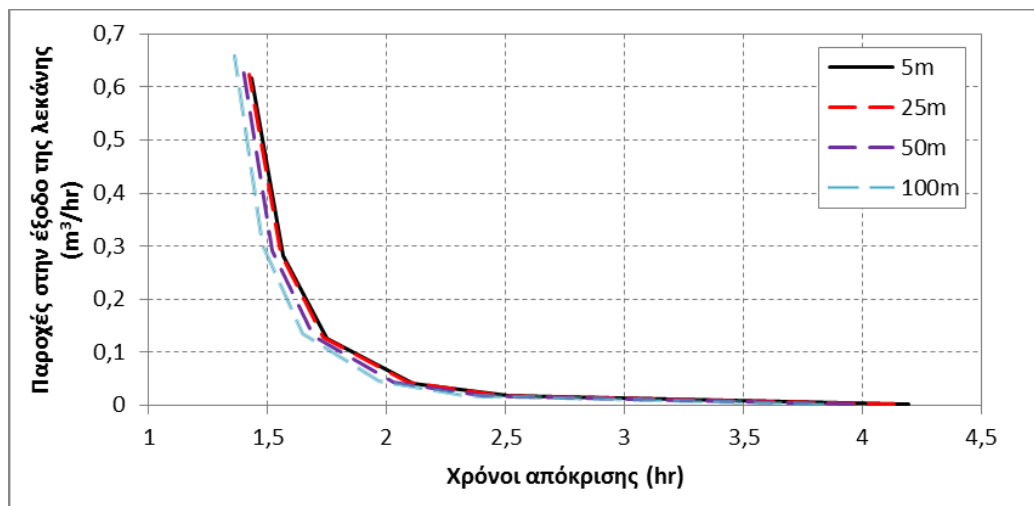


Διάγραμμα 7.16. Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής από ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 50 m της λεκάνης του Νέδοντα.



Διάγραμμα 7.17. Μεταβολή του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής από ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 100 m της λεκάνης του Νέδοντα.

Η χωρική ανάλυση των 25 m δίνει μια σταθερή απόκλιση από το μοντέλο αναφοράς της τάξης του 1% για τον χρόνο και και 1,5% για την παροχή. Στις αναλύσεις των 50 m και 100 m παρατηρείται ότι σε μεγαλύτερες περιόδους επαναφοράς, η επίδραση της χωρικής ανάλυσης μικραίνει τόσο για το μέγεθος του χρόνου όσο και για την παροχή εξόδου. Η διαπίστωση αυτή εξακριβώνεται από το **Διάγραμμα 7.18**, αναδεικνύοντας ότι η επίδραση της ανάλυσης εξασθενεί με την επιλογή καταιγίδων σχεδιασμού μικρής συχνότητας. Τέλος, ως προς τον όγκο απορροής, καμία σημαντική αλλαγή δεν παρατηρείται, γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με την έρευνα των Ragan & Fellows (1983), αλλά και σε αντίθεση με έρευνα των Thieken *et al.* (1999), που αναφέρουν αξιόλογη αύξηση του όγκου στην αδρότερη ανάλυση.



Διάγραμμα 7.18. Μεταβολή χρόνων απόκρισης και παροχών σε μοντέλα διαφορετικών χωρικών αναλύσεων της λεκάνης του Νέδοντα.

Ως γενικότερο συμπέρασμα προκύπτει ότι αν και οι τιμές του χρόνου απόκρισης επηρεάζονται κάπως από την επιλογή της χωρικής ανάλυσης, η επίδραση αυτή δεν είναι στατιστικά σημαντική. Βεβαίως, τα πορίσματα της ανωτέρω ανάλυσης θα πρέπει να ελεγχθούν ως προς τη γενικότητά τους και σε άλλες λεκάνες απορροής.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1. Σύνοψη – Συμπεράσματα

Το ζήτημα διερεύνησης της μεταβλητότητας του χρόνου συγκέντρωσης προσφέρει ένα ευρύ πεδίο έρευνας που θεωρείται μείζονος σημασίας, λόγω της χρήσης της παραμέτρου αυτής σε εφαρμογές υδρολογικού ενδιαφέροντος (κυρίως σε μοντέλα πλημμυρών). Σε αυτό το πλαίσιο, εκπονήθηκε η παρούσα μελέτη στην οποία έγινε μια επισκόπηση του θεωρητικού υποβάθρου που στηρίζει το εν λόγω γνωστικό αντικείμενο και προτάθηκε μια μεθοδολογία υπολογισμού μιας χρονικής παραμέτρου της λεκάνης, που εκτιμά τον χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης συναρτήσει ενός δεδομένου γεγονότος καθαρής βροχής. Η εξάρτηση του χρόνου ταξιδιού της ροής από την ένταση της βροχής έθεσε τον βασικό άξονα ανάπτυξης του μεθοδολογικού εργαλείου, η εφαρμογή του οποίου προϋποθέτει την επεξεργασία χωρικών δεδομένων σε περιβάλλον GIS. Τα κυριότερα συμπεράσματα από την εφαρμογή της μεθοδολογίας στις τέσσερις λεκάνες ενδιαφέροντος είναι:

- ❖ Η διαδικασία που αναπτύχθηκε αποτελεί μια απλή αλλά ρεαλιστική προσέγγιση προσδιορισμού του χρόνου απόκρισης συναρτήσει του ύψους απορροής που παράγεται στη λεκάνη από κάποιο επεισόδιο βροχής. Σε αντίθεση με τις κλασικές εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης, που λαμβάνουν υπόψη μόνο τα σταθερά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, η προτεινόμενη μέθοδος έχει ισχυρό υδρολογικό και υδραυλικό υπόβαθρο, επιτρέποντας τον χειρισμό του χρόνου συγκέντρωσης ως *μεταβλητή* και όχι ως *σταθερά*.
- ❖ Η μέθοδος ακολουθεί το πρότυπο σχεδιασμού των αστικών δικτύων όμβριων υδάτων, που βασίζεται στον σχηματισμό υπολεκανών, την εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου για την εκτίμηση της παροχής αιχμής, και την υδραυλική επίλυση του δικτύου από ανάντη προς κατόντη.
- ❖ Η προσέγγιση υπόκειται σε αβεβαιότητες και περιορισμούς, που τίθενται εξαιτίας της ίδιας της δομής του μοντέλου και της επιλογής των παραμέτρων εισόδου του. Από τις αναλύσεις ευαισθησίας που έγιναν για τρεις από τις εν λόγω παραμέτρους (πλάτος διατομής, συντελεστής τραχύτητας, συντελεστής παραμπίδωσης) προκύπτει ότι η επίδραση της αβεβαιότητας των παραμέτρων εξασθενεί για επεισόδια βροχής μεγαλύτερης περιόδου επαναφοράς.
- ❖ Η ακρίβεια της μεθόδου περιορίζεται από ορισμένες απλοποιητικές υποθέσεις, που αφορούν τη γεωμετρία της διατομής στο υδατόρευμα (ορθογωνική) και τη θεώρησή της ως σταθερή. Σημειώνεται ότι ακόμα και η γεωμετρία της διατομής είναι δυναμικό μέγεθος, καθώς αναδιαμορφώνεται κατά την διάρκεια ισχυρών πλημμυρικών επεισοδίων (π.χ. πέρα από την κύρια κοίτη, αναπτύσσεται ροή και στην πλημμυρική).
- ❖ Στη μεθοδολογία, ο χρόνος της επίγειας ροής θεωρείται (για απλούστευση) σταθερός και ανεξάρτητος του ύψους απορροής, παρότι και αυτός διέπεται από μεταβλητότητα, καθώς επηρεάζεται από τις αρχικές συνθήκες κατά την έναρξη του πλημμυρικού επεισοδίου (π.χ. κορεσμός του εδάφους).
- ❖ Σε λεκάνες με κυριαρχία ήπιων κλίσεων κατά τη διεύθυνση της μέγιστης διαδρομής (δηλαδή κατά μήκος του κύριου υδατορεύματος), η τιμή του χρόνου συγκέντρωσης

υποεκτιμάται, δεδομένου ότι η ροή θεωρείται ομοιόμορφη (εξίσωση Manning), οπότε αγνοούνται τα φαινόμενα ανάσχεσης που οφείλονται στην αποθηκευτική ικανότητα του υδατορεύματος.

- ❖ Παρατηρείται πολύ υψηλή συσχέτιση του χρόνου απόκρισης της λεκάνης με το ύψος απορροής, που εκφράζεται μέσω μιας σχέσης μορφής δύναμης μεταξύ των δυο μεταβλητών. Μάλιστα, ο εκθέτης της σχέσης αυτής δείχνει να συσχετίζεται πολύ καλά με τη μέση κλίση της μέγιστης διαδρομής ροής, ενώ ο άλλος συντελεστής φαίνεται να εξαρτάται από το αντίστοιχο μήκος. Το συμπέρασμα αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί για την εξαγωγή περιοχικών σχέσεων εκτίμησης της σχέσης ύψους απορροής – χρόνου απόκρισης, εφόσον το δείγμα εμπλουτιστεί με δεδομένα από άλλες λεκάνες.
- ❖ Αντίστοιχη σχέση δύναμης συσχετίζει το χρόνο απόκρισης της λεκάνης με την παροχή αιχμής στην έξοδο, με τον εκθέτη της συνάρτησης να μεταβάλλεται γραμμικά με την μέση κλίση της μέγιστης διαδρομής ροής.
- ❖ Η μεταβλητότητα των χρόνων απόκρισης φαίνεται να είναι πιο έντονη σε λεκάνες που χαρακτηρίζονται από έντονη ετερογένεια και περιέχουν μεγάλο ποσοστό εκτάσεων με ήπιες κλίσεις.
- ❖ Σημαντικό συμπέρασμα της μεθοδολογίας αποτελεί η αντιστοιχία των χρόνων συγκέντρωσης κατά Giandotti και κατά Kirpich σε ύψη απορροής της τάξης των 2 και 20 mm. Η μεγάλη αυτή διαφορά εξηγεί γιατί οι δύο μέθοδοι δίνουν τόσο διαφορετικές εκτιμήσεις του χρόνου συγκέντρωσης, και αποτελεί μία ακόμη ισχυρή ένδειξη της μεταβλητότητας του εν λόγω μεγέθους.
- ❖ Η μεθοδολογία δείχνει να μην επηρεάζεται σημαντικά από το πλάτος της διατομής του υδατορεύματος, το οποίο μπορεί να εκτιμηθεί αρδομερώς ακόμα και από δορυφορικούς χάρτες. Μάλιστα, η επίδραση του σφάλματος των εκτιμήσεων γίνεται αμελητέα όσο αυξάνει το ύψος απορροής. Από την άλλη πλευρά, η τραχύτητα στο υδατόρευμα και στην χερσαία επιφάνεια εμφανίζεται ως η πιο ευαίσθητη παράμετρος επίδρασης στον χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης.
- ❖ Όσον αφορά στην χωρική ανάλυση του ΨΜΥ, η επίδραση της είναι στατιστικά ασήμαντη, το οποίο επιτρέπει τη χρήση σχετικών αδρομερών ψηφιακών μοντέλων, προς εξοικονόμηση υπολογιστικού φόρτου. Ειδικότερα, η χωρική ανάλυση φαίνεται ότι επιδρά αρκετά στην εκτίμηση της μέσης κλίσης της λεκάνης, όχι όμως και της μέσης κλίσης του κύριου υδατορεύματος, που είναι ισχυρά συσχετισμένη με την τιμή του χρόνου συγκέντρωσης.
- ❖ Βελτίωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου αναμένεται να επιτευχθεί μέσω της αξιοποίησης δεδομένων πεδίου, που θα συμβάλουν σε μια πιο ρεαλιστική σχηματοποίηση του υδρολογικού συστήματος. Χαρακτηριστικά αναφέρεται η διακριτοποίηση της μέγιστης διαδρομής ροής και η ανίχνευση και οριοθέτηση των διαφορετικών καθεστώτων ροής που την διέπουν.

Όσον αφορά στις γεωμορφολογικές αναλύσεις, κυριότερα συμπεράσματα είναι:

- ❖ Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας απαιτείται επεξεργασία ενός ευρέος φάσματος γεωπληροφορίας, που γίνεται σε περιβάλλον GIS. Από τη σύγκριση των δύο

λογισμικών που εξετάστηκαν, διαπιστώνεται ότι το SAGA GIS είναι ευέλικτο στην χρήση του, καθώς μέσω των βιβλιοθηκών του περιλαμβάνει ένα εύρος χωρικών αλγορίθμων και μεθόδων, επεκτείνοντας το πεδίο εφαρμογής του σε σχέση με τις δυνατότητες του ArcGIS. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της σύγκρισης αποτελούν οι αλγόριθμοι πλήρωσης των βυθισμάτων και δρομολόγησης της ροής. Το περιβάλλον διάταξης (layout) κατά την απόδοση ενός χάρτη δεν είναι τόσο εξελιγμένο όσο του ArcGIS, παρά το γεγονός ότι οι γραφικές απεικονίσεις του δεν υστερούν.

- ❖ Ο καθορισμός έναρξης της ροής στο υδατόρευμα σε περιβάλλον GIS βασίζεται στην επιλογή ενός σταθερού κατωφλίου, που αναφέρεται στην ανάντη έκταση αποστράγγισης. Βεβαίως, αυτό αποτελεί μια χονδροειδή μόνο προσέγγιση, που δεν λαμβάνει υπόψη την ετερογένεια της λεκάνης. Το πρόβλημα αυτό έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα, όπως προκύπτει από την πληθώρα ερευνών που αφορούν την διάκριση έναρξης της ροής. Στην παρούσα εργασία η επιλογή του κατωφλίου έναρξης της ροής σε υδατόρευμα στηρίχθηκε σε εμπειρική γνώση και διερεύνηση εδαφολογικών και άλλων δεδομένων.
- ❖ Ειδικότερα, στη λεκάνη του Νέδοντα, για την επιλογή του κατωφλίου έναρξης ροής υλοποιήθηκε και η μεθοδολογία τοπικών κλίσεων των McNamara *et al.* (2006). Κάνοντας μια κριτική επισκόπηση από την εφαρμογή της μεθόδου προκύπτει ότι η προσέγγιση αυτή μπορεί να παρέχει μια γραφική ένδειξη του σημείου έναρξης του υδρογραφικού δικτύου, διευκολύνοντας μεν τον μελετητή, επιβαρύνοντας δε την διαδικασία από τον υπολογιστικό φόρτο του ΨΜΥ. Σε κάθε περίπτωση, η μέθοδος είναι αρκετά υποκειμενική, καθώς λόγω των αβεβαιοτήτων τα παραγόμενα αποτελέσματα έχουν πολύ μεγάλη διασπορά, μη επιτρέποντας τον μονοσήμαντο προσδιορισμό του ζητούμενου σημείου.
- ❖ Συγκρίνοντας τους αλγορίθμους πλήρωσης των τοπογραφικών βυθισμάτων των λογισμικών SAGA GIS και ArcGIS, συμπεραίνεται ότι οι αποκλίσεις στα χαρακτηριστικά υψόμετρα δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Από τις διερευνήσεις προκύπτει ότι η ανίχνευση της κοίτης και η αναπαράσταση των μαιανδρισμών των ρεμάτων προσομοιώνεται ορθότερα, μέσω του αλγορίθμου Planchon & Darboux (2001). Η διαπίστωση αυτή κρίνεται ως πιο σημαντική στις μικρότερες χωρικές αναλύσεις, όπου η ανίχνευση της κοίτης είναι δυσκολότερη λόγω της έντονης εξομάλυνσης των υψομέτρων. Επομένως, διαπιστώνεται ότι ο αλγόριθμος των Planchon & Darboux (2001) του SAGA GIS, παρά την πολυπλοκότητά του, πλεονεκτεί έναντι της αντίστοιχης μεθόδου του ArcGIS.
- ❖ Αναφορικά με τους αλγορίθμους δρομολόγησης της ροής, μονής και πολλαπλής κατεύθυνσης, δεν παρατηρείται κάποια αξιόλογη διαφορά κατά την αναπαράσταση της ροής, και έτσι επιλέχθηκε η χρήση του αλγορίθμου μονής κατεύθυνσης D8. Αν και το συμπέρασμα αυτό βασίζεται στα αποτελέσματα μίας μόνο λεκάνης απορροής, συγκεκριμένης μορφολογίας, γενικεύτηκε και στις υπόλοιπες λεκάνες, για λόγους αυτοματοποίησης και επιτάχυνσης των υπολογιστικών διαδικασιών.

8.2. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η έρευνα που έγινε δίνει το έναυσμα για περαιτέρω διερεύνηση της μεταβλητότητας του χρόνου απόκρισης σε συνάρτηση με την ένταση της βροχής. Γενικά, τα συμπεράσματα των αναλύσεων βασίζονται στα αποτελέσματα ενός εξαιρετικά μικρού δείγματος (τέσσερις λεκάνες απορροής), που αν και συγκλίνουν, δεν είναι επαρκή για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, και πολύ περισσότερο την κατάρτιση αναλυτικών σχέσεων για την ποσοτικοποίηση των μεγεθών ενδιαφέροντος. Προς την κατεύθυνση αυτή, είναι αναγκαία η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε ένα μεγάλο δείγμα λεκανών απορροής και ο ακριβέστερος προσδιορισμός ορισμένων παραμέτρων εισόδου μέσω μετρήσεων πεδίου (π.χ. έναρξης ροής στο υδατόρευμα, γεωμετρία διατομών). Σημαντικό σημείο περαιτέρω διερεύνησης συνιστά η συσχέτιση των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης με τους συντελεστές της μαθηματικής συνάρτησης που συνδέουν τον χρόνο απόκρισης με το ύψος απορροής. Με τον τρόπο αυτό, θα είναι εφικτή η κατάρτιση περιοχικών σχέσεων, που σε αντίθεση με τις κλασικές εμπειρικές προσεγγίσεις της βιβλιογραφίας θα ενσωματώνουν ρητά τη μεταβλητότητα του χρόνου συγκέντρωσης, συνδέοντας την εν λόγω παράμετρο με ένα χαρακτηριστικό υδρολογικό μέγεθος, όπως το ύψος πλημμυρικής απορροής ή, έμμεσα, την περίοδο επαναφοράς.

Ένα ακόμη ζήτημα με ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η γενίκευση της μεθοδολογίας σε επίπεδο φατνίου, με στόχο την κατάρτιση ισόχρονων καμπυλών και, άρα, την αυτόματη εξαγωγή του στιγμιαίου μοναδιαίου υδρογραφήματος. Σε μια τέτοια περίπτωση, το μοναδιαίο υδρογράφημα θα πάψει να αντιμετωπίζεται ως ένα σταθερό χαρακτηριστικό της λεκάνης, αλλά θα ενσωματώνει και αυτό την έννοια της μεταβλητότητας, που αποτελεί θεμελιώδη ιδιότητα των υδρολογικών διεργασιών.

Ορισμένες ακόμη προεκτάσεις αφορούν την εφαρμογή της μεθόδου λαμβάνοντας υπόψη την δομή του υδρογραφικού δικτύου και όχι μόνο την μέγιστη διαδρομή ροής. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να αντιμετωπιστούν, εν μέρει, οι συνθήκες ετερογένειας, καθώς και η επίδραση της τμηματοποίησης της μέγιστης διαδρομής ροής, είτε σε αδρότερα μέρη, είτε σε επίπεδο φατνίου.

Μια ακόμη ενδιαφέρουσα πτυχή διερεύνησης είναι η σύγκριση των υπολογισμένων χρόνων απόκρισης με παρατηρημένους χρόνους από πραγματικά πλημμυρικά επεισόδια, προκειμένου να «βαθμονομηθεί» η μέθοδος από μετρητική πληροφορία. Βεβαίως, η διαδικασία αυτή είναι εξαιρετικά δυσχερής, καθώς τα πραγματικά φαινόμενα διέπονται από ισχυρές πολυπλοκότητες, που δεν συνάδουν με τις απλοποιητικές παραδοχές του μοντέλου, π.χ. την υπόθεση παραγωγής ομοίμορφης χωρικά και χρονικά απορροής στη λεκάνη.

Υπό το πρίσμα της τεχνολογικής προόδου, η ποιότητα των ΨΜΥ και οι νέες μεθοδολογίες raster δεδομένων θα συνεχίσουν να αποτελούν έναν εξελισσόμενο τομέα που συμβάλλει θεμελιωδώς στην προσομοίωση των μοντέλων. Ακόμη, το ζήτημα του βέλτιστου βαθμού διακριτοποίησης καθίσταται ιδιαίτερος σημαντικό, καθώς η μελλοντική έρευνα καλείται βάσει της συσχέτισης των χαρακτηριστικών της γήινης επιφάνειας με την κλίμακα, να καθορίσει τη βέλτιστη αναπαράσταση για τις διάφορες εφαρμογές.

Ως τελική επισήμανση, θεωρείται ότι ο χειρισμός του χρόνου συγκέντρωσης υπό το πρίσμα της μεταβλητότητας, όπως υποδεικνύουν και οι πλέον πρόσφατες εξελίξεις στη βιβλιογραφία, θα επιφέρει μείζονες αλλαγές σε κλασικές υποθέσεις και μεθόδους της Τεχνικής Υδρολογίας, και στα συναφή εργαλεία που εφαρμόζονται στον υδρολογικό σχεδιασμό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Α. Ελληνική

- Αλωνιστιώτη, Δ., *Διερεύνηση της επίδρασης των δασικών πυρκαγιών στην υδρολογική απόκριση λεκανών απορροής της ανατολικής Αττικής*, Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Ε. Μιχαηλίδη, Ε. Γαλιούνα, Κ. Τζούκα, Α. Δ. Κούσης, Ν. Μαμάσης, και Δ. Κουτσογιάννης, *Τεχνική έκθεση περιγραφής περιοχικών σχέσεων εκτίμησης χαρακτηριστικών υδρολογικών μεγεθών, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*, Ανάδοχοι: ΕΤΜΕ: Πέππας & Συν/τες Ε.Ε., Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 146 σελίδες, Σεπτέμβριος 2014.
- Ζωγάκης, Χ., *Σύγκριση μοντέλων γεγονότος και συνεχούς προσομοίωσης για την εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών - Εφαρμογή στη λεκάνη του Νέδοντα*, Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2013.
- Κούσης, Α. Δ., Σ. Λυκούδης, και Γ. Καραβοκυρός, *Τεχνική έκθεση περιγραφής μετρητικού συστήματος τηλεμετάδοσης–επεξεργασίας δεδομένων, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*, Ανάδοχοι: ΕΤΜΕ: Πέππας & Συν/τες Ε.Ε., Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 77 σελίδες, Μάρτιος 2012.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Ν. Μαμάσης, *Υδρολογική διερεύνηση ισχυρών βροχοπτώσεων και στερεοαπορροών του Θριασίου Πεδίου*, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2001.
- Μπαριάμης, Γ., *Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου HEC – HMS και εφαρμογή στη λεκάνη του ρέματος Ραφήνα*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων Υδραυλικών και Θαλασσίων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013.
- Ν.Α.Μ., *Στρατηγικό Σχέδιο Ανάπτυξης Μαγνησίας - Κεφάλαιο 9: Η κατάσταση του περιβάλλοντος στον Νομό Μαγνησίας*, Α' Φάση, Διαγνωστικές Μελέτες, Βόλος, 2005.

- Παγάνα, Β., *Κατάρτιση χαρτών πλημμύρας στην περιοχή της Ραφήνας*, Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων Υδραυλικών και Θαλασσίων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2012.
- Τσούλος, Λ., *Ψηφιακή Χαρτογραφία*, Έκδοση 2^η, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2004.
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ, Ε.Ε., Ν.Α.Μ, Α.Ν.Ε.Μ., *ΕΠΙΠΕΡ II Πρόγραμμα: Ανάπτυξη Πολιτικής για την Αειφόρο Διαχείριση του Παραγωγικού Κόλπου*, Βόλος, 2001.
- Β. Ξενόγλωσση**
- Beven, K. J., Quinn, P. F., Lamb, R., The $\ln(a/\tan\beta)$ index: How to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework, *Hydrological Processes*, 9, 161–182, 1995.
- Bondelid, T. R., McCuen, R. H. and Jackson, T. J., Sensitivity of SCS models to curve number variation. *Water Resource Bulletin*, 18, 111-116, 1982.
- Cohen, S., Willgoose, G., and Hancock, G., A methodology for calculating the spatial distribution of the area-slope equation and the hypsometric integral within a catchment, *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 113(F3), 13, 2008.
- Costa-Cabral, M. C. and Burgess, S. J., Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hill slopes for computation of contributing and dispersal areas, *Water Resources Research*, 30, 1681–1692, 1994.
- Daniil, E. I., and Lazaridis, L. S., Practical issues in hydrologic modeling for flood management of watercourses running through urban environments in Greece, *Conf. Proc., Watershed Management 2005*, G. E. Moglen, ed., ASCE, Reston, Va., 2005.
- Dietrich, W. E., Wilson, C.T., Montgomery D. R., McKean J., Analysis of erosion thresholds, channel networks and landscape morphology using a digital terrain model, *Journal of Geology*, 101, 259–278, 1993.
- Dingman, S. L., *Physical Hydrology*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.
- Efstratiadis, A., A. D. Koussis, D. Koutsoyiannis, and N. Mamassis, Flood design recipes vs. reality: can predictions for ungauged basins be trusted?, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 1417–1428, doi:10.5194/nhess-14-1417-2014, 2014.
- Engman, E. T., Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff, *ASCE Journal of Irrigation and Drainage*, 112(1), 39-49, 1986.
- Fairfield, J., Leymarie, P., Drainage networks from grid digital elevation models, *Water Resources Research*, 27: 709–717, 1991.

- Fang, X., Pradhan, P., Malla, R., Cleveland, T., Thompson, D., Estimating Time of Concentration for Texas Watersheds, *Proceeding of the International Conference "Challenges in Coastal Hydrology and Water Quality*, American Institute of Hydrology and Louisiana State University, Baton Rouge, LA, May 21-24, 2006.
- Fang, X., Thompson, D. B., Cleveland, T. G., and Pradhan, P., Variations of time of concentration estimates using NRCS velocity method, *J. Irrig. Drain Eng.*, 133(4), 314–322, 2007.
- Giandotti, M., *Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua*, Istituto Poligrafico dello Stato, 8, 107–117, 1934.
- Grimaldi, S., Petroseli, A., Tauro, F., and Porfiri, M., Time of concentration: A paradox in modern hydrology, *Hydrol. Sci. J.*, 57, 217–228, 2012.
- Haan C. T., Barfield, B. J., and Hays, J. C., *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*, Academic Press, N. Y., 1994.
- McNamara, J. P., Ziegler, A. D., Wood, S. H., and Vogler, J. B., Channel head locations with respect to geomorphologic thresholds derived from a digital elevation model: A case study in northern Thailand, *Forest Ecology and Management*, 224 (1), 147-156, 2006.
- Jenson, S. K. and Domingue, J. O., Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11): 1593-1600, 1988.
- Kalin, L., Govindarajua, R. S., Hantush, M. M., Effect of geomorphologic resolution on modeling of runoff hydrograph and sedimentograph over small watersheds. *Journal of Hydrology*, 276, 89–111, 2003.
- Kent, K. M., Travel time, time of concentration and lag, *National Engineering Handbook*, Section 4 and Chapter 15, Hydrology, 1972.
- Kienzle, S. W., The effect of DEM raster resolution on first order, second order, and compound terrain derivatives, *Transactions in GIS*, 8, 83-111, Department of Geography, University of Lethbridge, 2004.
- Kirpich, Z. P., Time of concentration of small agricultural watersheds, *Civil Engineering*, 10 (6), 362, 1940.
- Li, Z., Zhu, Q., and Gold, C., *Digital Terrain Modelling - Principles and Methodology*, 2005.
- McCuen, R. H., *Hydrologic Analysis and Design*, Prentice Hall, 1997.

- McCuen, R. H., *Hydrologic Analysis and Design*, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 859 p., 2005.
- McCuen R. H., and Spiess, J. M., *Assessment of Kinematic Wave Time of Concentration*, Unpublished Manuscript, November, 1995.
- McCuen, R. H., Uncertainty analyses of watershed time parameters, *J. Hydrol. Eng.*, 14, 490–498, 2009.
- McCuen, R. H., Wong, S. L., and Rawls, W. J., Estimating urban time of concentration, *J. Hydraul. Eng.*, 110(7), 887–904, 1984.
- Merkel, W. H., *References on time of concentration with respect to sheet flow*, Unpublished paper, Beltsville, MD, 2001.
- Miller, C. L., and Laflamme, R. A., *The Digital Terrain Model – Theory & Application*, MIT Photogrammetry Laboratory, 1958.
- Moglen, G. E., and Hartman, G. L., Resolution effects on hydrologic modeling parameters and peak discharge, *J. Hydrologic Eng.*, 6(6), 490–497, 2001.
- Montgomery, D. R., and Dietrich, W. E., Where do channels begin?, *Nature*, 336, 232–234, 1988.
- Montgomery, D. R., and Foufoula-Georgiou, E., Channel network representation using digital elevation models, *Water Resources Research*, 29(12), 3925–3934, 1993.
- Montgomery, D., and Zhang, W., Digital elevation model grid size, landscape representation and hydrologic simulations, *Water Resour. Res.*, 30(4), 1019–1028, 1994.
- Moore, I. D., Graycon, R. B., and Lanson, A. R., Digital Terrain Modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrological Processes*, 5, 3-30, 1991.
- Natural Resources Conservation Service (NRCS), Urban hydrology for small watersheds, *Technical Release 55 (TR-55)*, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 1986.
- O'Callaghan, J. F., and Mark, D. M., The extraction of drainage networks from digital elevation data, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28, 328–344, 1984.
- Overton, D. E., and Meadows, M. E., *Stormwater Modeling*, Academic Press, New York, 1976.

- Pike, R. G., Evans, I. S., and Hengl, T., Geomorphometry: A brief guide, *Developments in Soil Science*, 33, 2009.
- Planchon, O., and Darboux, F., A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models, *Catena*, 46, 159-176, 2001.
- Tarboton, D. G., Bras, R. F., and Rodriguez-Iturbe, I., On the extraction of channel networks from digital elevation data, *Hydrological Processes*, 5, 81–100, 1991.
- Ragan, R. M., and Fellows, J. D., The role of cell size in hydrology oriented geographic information systems, Hydrologic applications of space technology, *Proc., Cocoa Beach Workshop*, A. I. Johnson, ed., International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, U.K., 453–460, 1983.
- Ree, W. O., Wimberley, F. L., and Crow, F. R., *Manning n and the Ooerland flow equation*, *Transactions of the ASAE*, 20(1), 89–95, 1977.
- Tarboton, D. G., A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water Resources Research*, 33, 309–319, 1997.
- Thielen, A. H., Lucke A., Diekkruger, B., and Richter, O., Scaling input data by GIS for hydrological modelling, *Hydrological Processes*, 13(4), 611–630, 1996.
- Vieux, B. E., DEM aggregation and smoothing effects on surface runoff modeling, *J. Comp. in Civ. Eng*, ASCE, 7(3), 310–338, 1993.
- Welle, P. I., and Woodward, D., NRCS, Northeast NTC, *Hydrology Technical Note N4*, 1986.
- Wolock, D. M., McCade Jr., G. J., Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL, *Water Resources Research*, 31(5), 1315-1324, 1995.

Γ. Διαδικτυακοί τόποι

http://www.elinyae.gr/el/lib_file_upload/301a_74.1364290992000.pdf

<http://gis.ktimanet.gr/wms/ktbasemap/default.aspx>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Διάγραμμα 1. Διάγραμμα ροής εντολών του εργαλείου Splitted Longest Flow Path & Subbasins στο Model Builder.

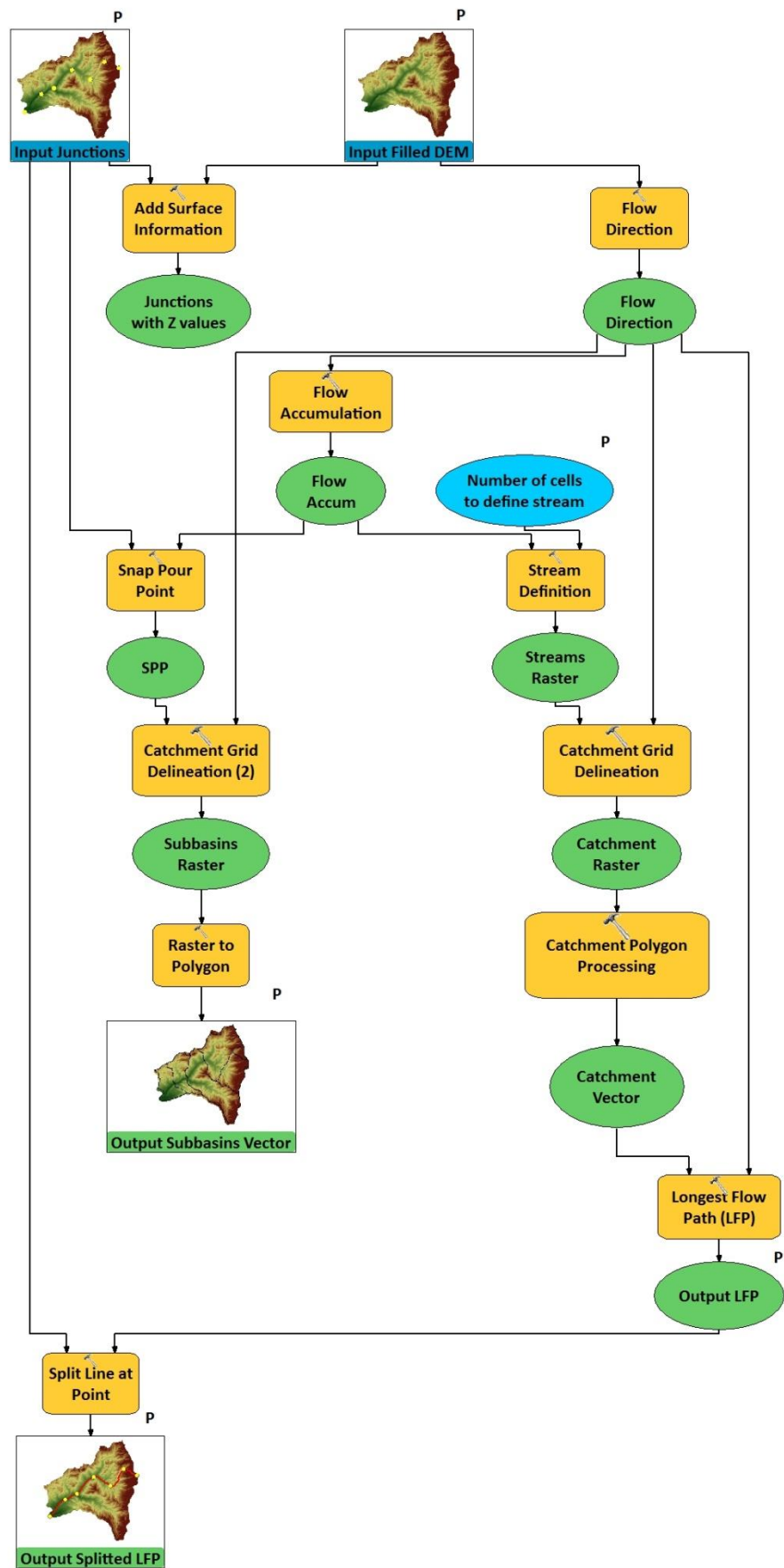
Διάγραμμα 2. Διάγραμμα ροής εντολών του εργαλείου kCoefficient στο Model Builder.

Εικόνα 1. Ταχύτητες ροής, χρόνοι ταξιδιού και παροχές εξόδου των τμημάτων της μέγιστης διαδρομής ροής για μεταβλητά ύψη απορροής P_r στην λεκάνη του Νέδοντα.

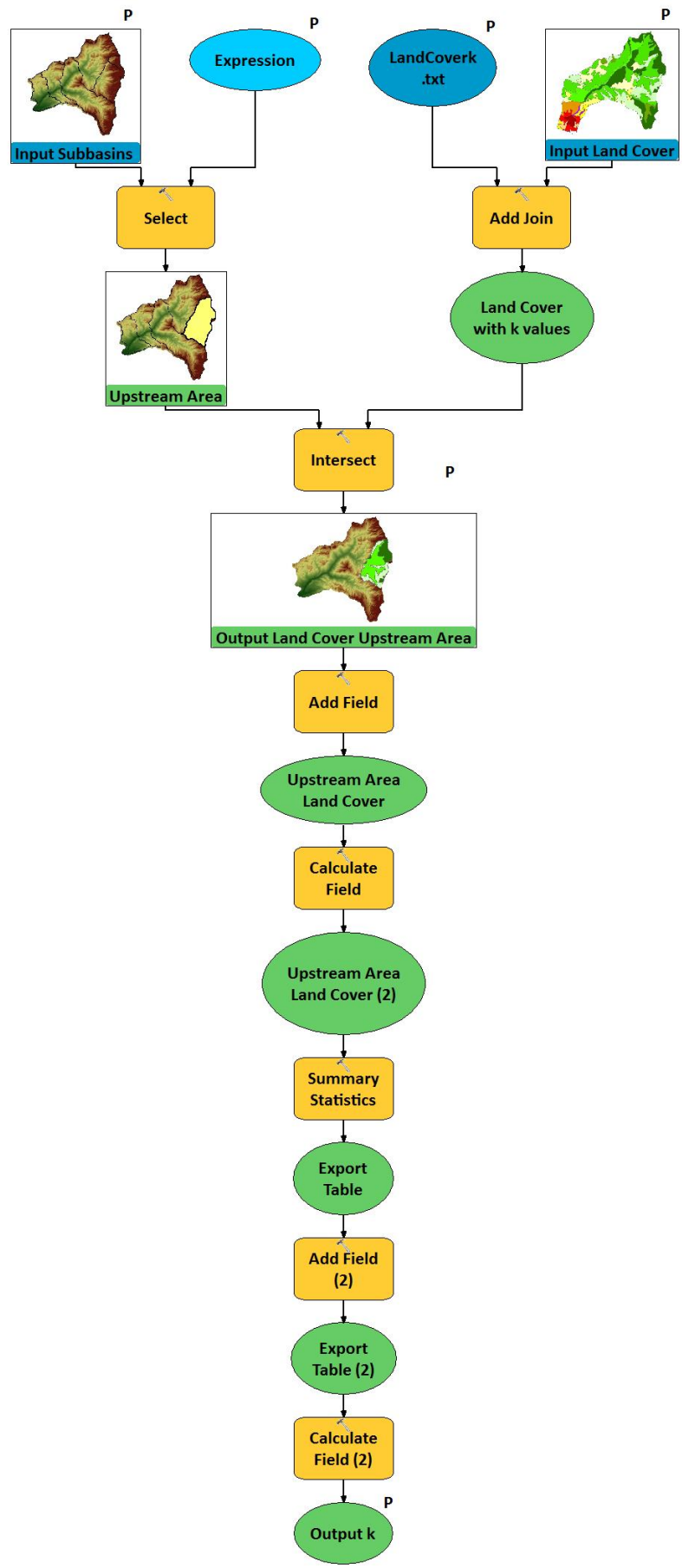
Εικόνα 2. Ταχύτητες ροής, χρόνοι ταξιδιού και παροχές εξόδου των τμημάτων της μέγιστης διαδρομής ροής για μεταβλητά ύψη απορροής P_r στην λεκάνη του Σαρανταπόταμου.

Εικόνα 3. Ταχύτητες ροής, χρόνοι ταξιδιού και παροχές εξόδου των τμημάτων της μέγιστης διαδρομής ροής για μεταβλητά ύψη απορροής P_r στην λεκάνη του ρέματος της Ραφήνας.

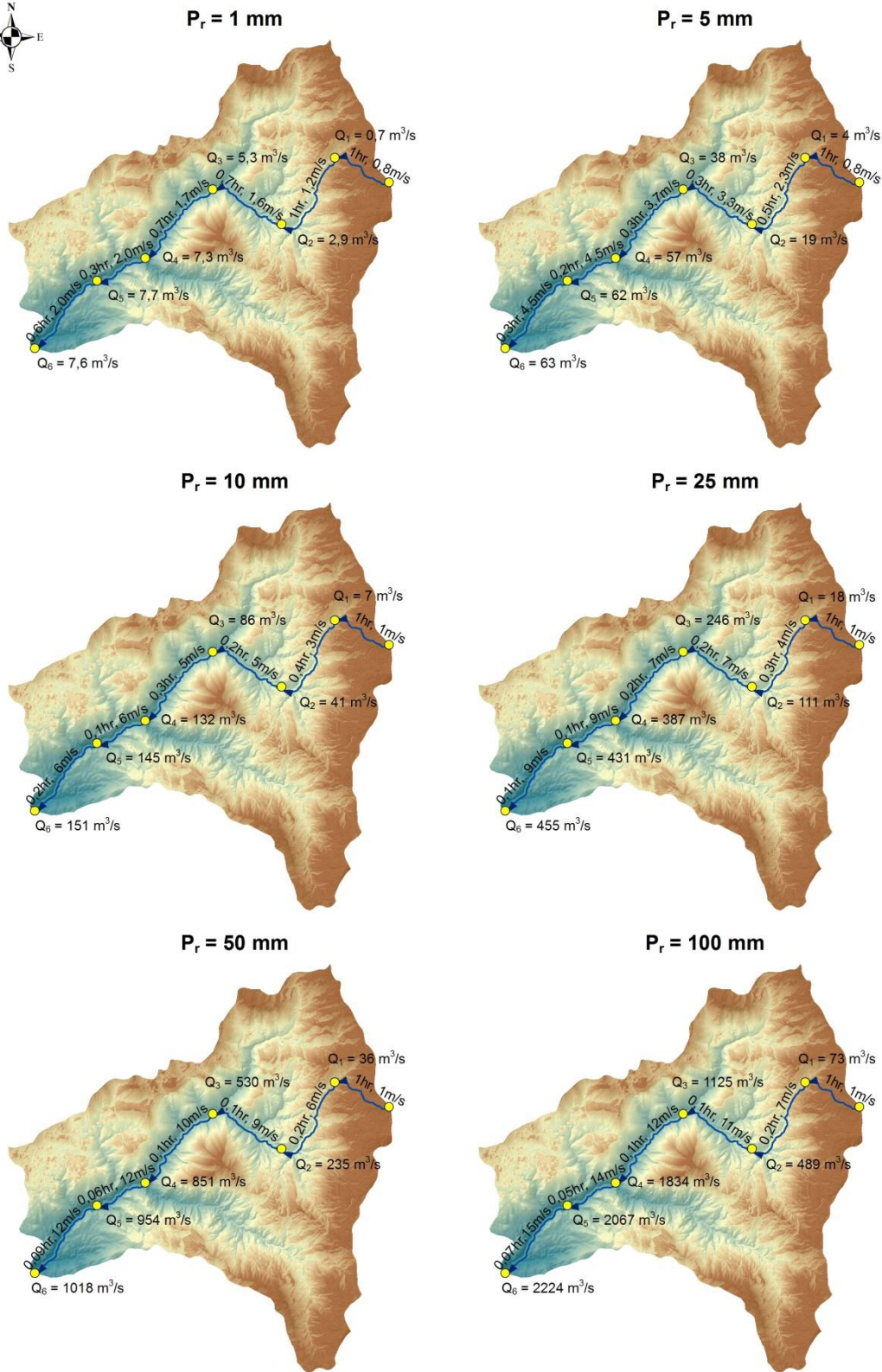
Εικόνα 4. Ταχύτητες ροής, χρόνοι ταξιδιού και παροχές εξόδου των τμημάτων της μέγιστης διαδρομής ροής για μεταβλητά ύψη απορροής P_r στην λεκάνη του ρέματος Ξεριά.



Διάγραμμα 1. Διάγραμμα ροής εντολών του εργαλείου SPLITTED Longest Flow Path & Subbasins στο Model Builder.



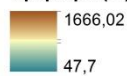
Διάγραμμα 2. Διάγραμμα ροής εντολών του εργαλείου kCoefficient στο Model Builder.



Υπόμνημα

- Κόμβοι
- ➡ Μέγιστη διαδρομή ροής

Υψόμετρα (m)

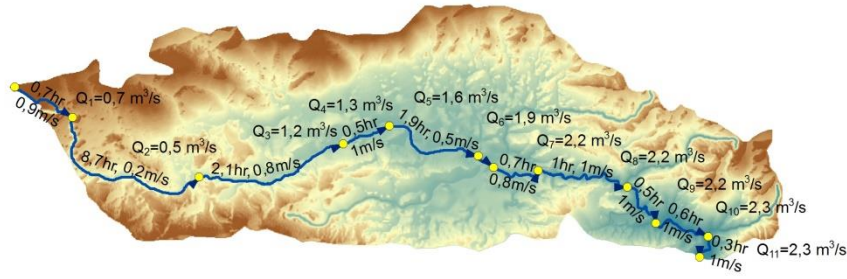


Κλίμακα: 1:250.000

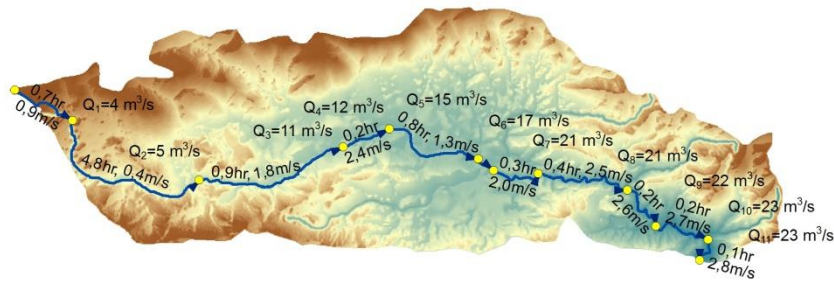
Εικόνα 1. Ταχύτητες ροής, χρόνοι ταξιδιού και παροχές εξόδου των τμημάτων της μέγιστης διαδρομής ροής για μεταβλητά ύψη απορροής P_r στην λεκάνη του Νέδοντα.



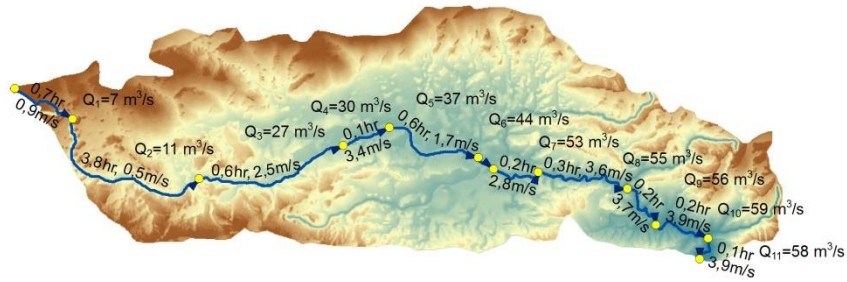
$P_r = 1 \text{ mm}$



$P_r = 5 \text{ mm}$



$P_r = 10 \text{ mm}$



Υπόμνημα

● Κόμβοι

→ Μέγιστη διαδρομή ροής

Υψόμετρα (m)

1353,77

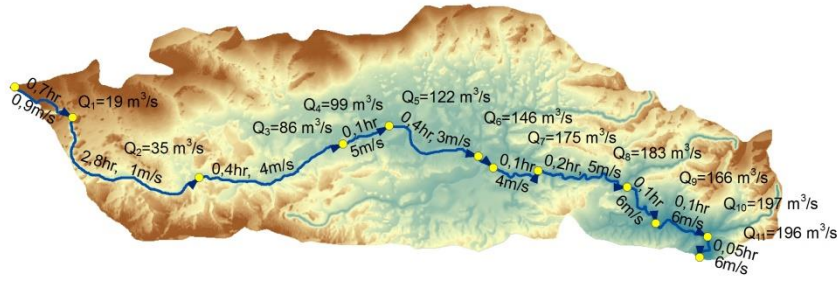
118,476

Κλίμακα: 1:250.000

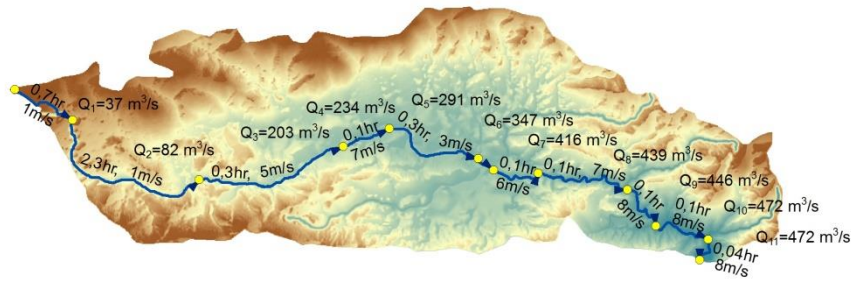
Εικόνα 2. Ταχύτητες ροής, χρόνοι ταξιδιού και παροχές εξόδου των τμημάτων της μέγιστης διαδρομής ροής για μεταβλητά ύψη απορροής P_r στην λεκάνη του Σαρανταπόταμου.



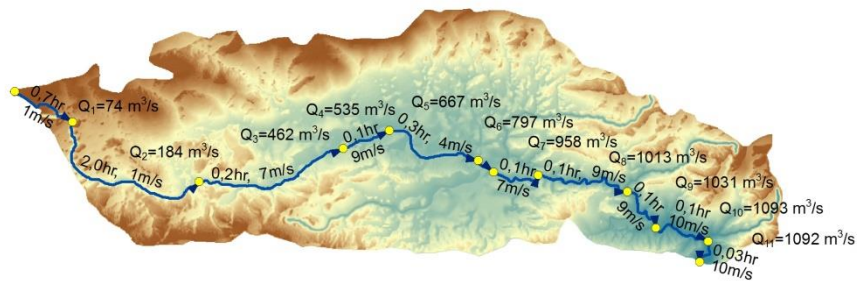
$P_r = 25 \text{ mm}$



$P_r = 50 \text{ mm}$



$P_r = 100 \text{ mm}$



Υπόμνημα

● Κόμβοι

➔ Μέγιστη διαδρομή ροής

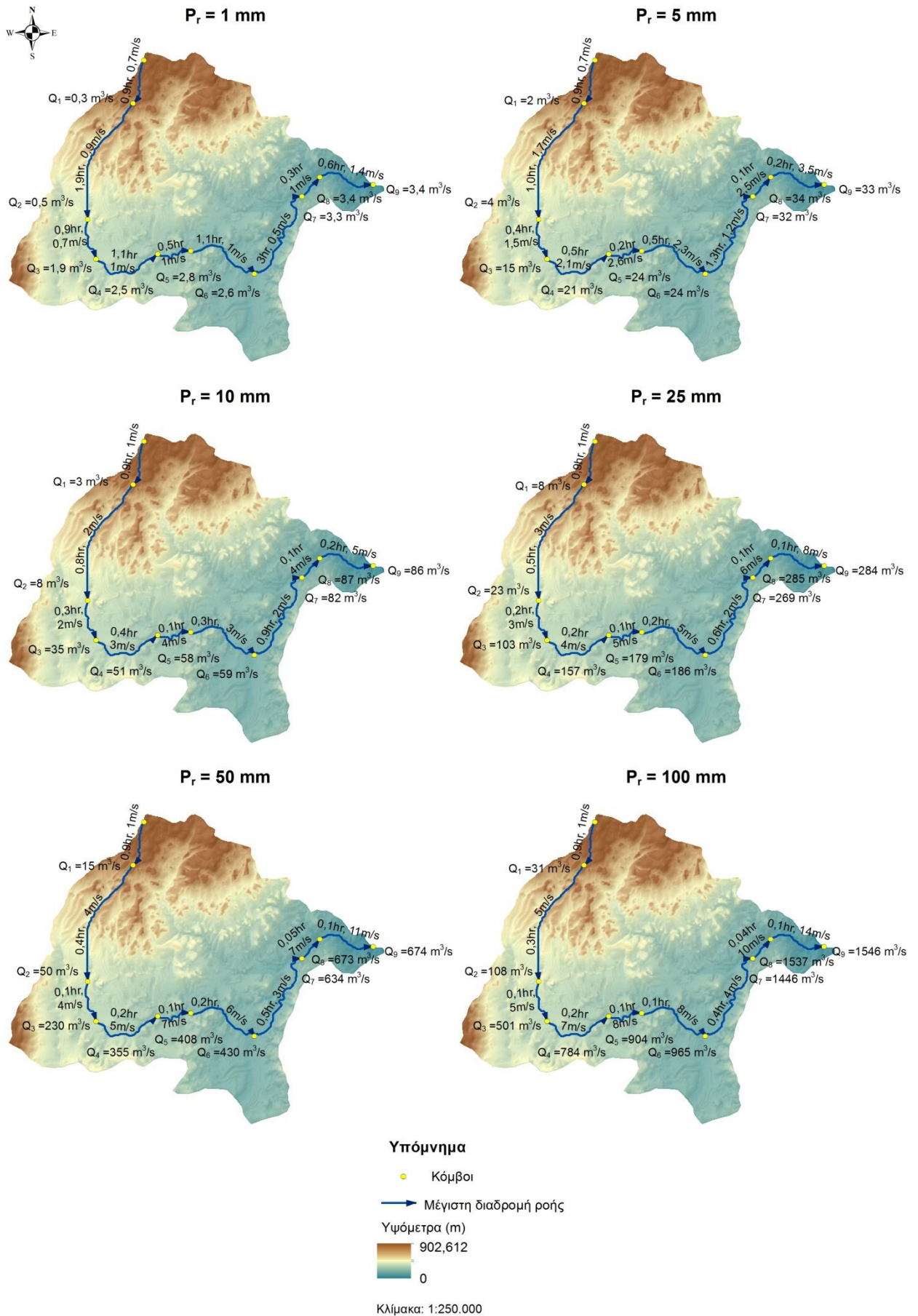
Υψόμετρα (m)

1353,77

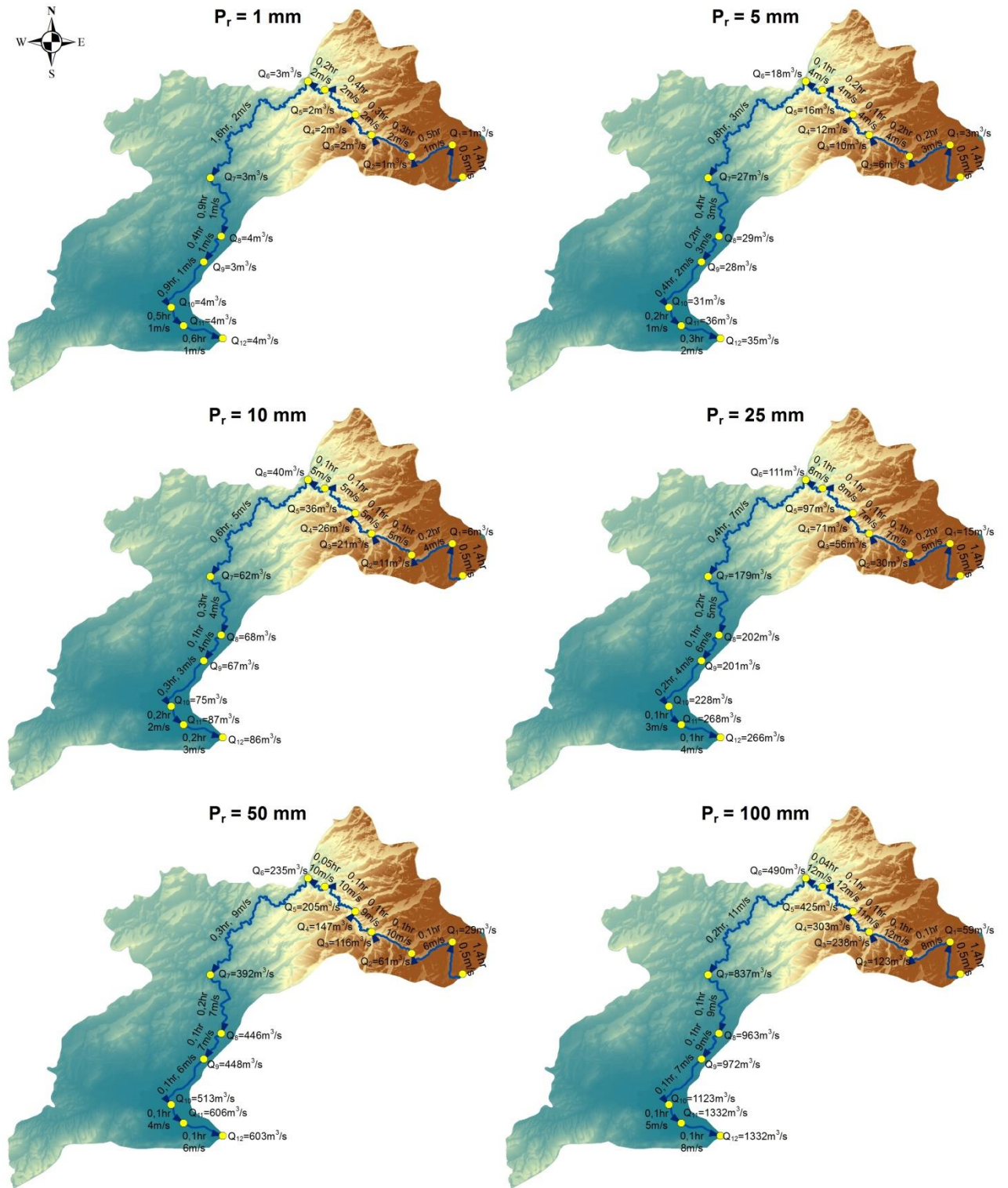
118,476

Κλίμακα: 1:250.000

Εικόνα 2. Ταχύτητες ροής, χρόνοι ταξιδιού και παροχές εξόδου των τμημάτων της μέγιστης διαδρομής ροής για μεταβλητά ύψη απορροής P_r στην λεκάνη του Σαρανταπόταμου (συνέχεια).



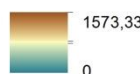
Εικόνα 3. Ταχύτητες ροής, χρόνοι ταξιδιού και παροχές εξόδου των τμημάτων της μέγιστης διαδρομής ροής για μεταβλητά ύψη απορροής P_r στην λεκάνη του ρέματος της Ραφήνας.



Υπόμνημα

- Κόμβοι
- ← Μέγιστη διαδρομή ροής

Υψόμετρα (m)



Κλίμακα: 1:250.000

Εικόνα 4. Ταχύτητες ροής, χρόνοι ταξιδιού και παροχές εξόδου των τμημάτων της μέγιστης διαδρομής ροής για μεταβλητά ύψη απορροής P_r στην λεκάνη του ρέματος Ξεριά.