

ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ

Μοντελοποίηση υδρολογικών διαδικασιών με το ArcHydro

Μάρης Φ. - Παπαρρίζος Σ.

9.1 Εισαγωγή

Τα κατανεμημένα υδρολογικά μοντέλα που προσομοιώνουν την διαδικασία της βροχόπτωσης-απορροής απαιτούν κάποια μορφή δομής δεδομένων που καλείται **υδρογραφικό δίκτυο** για να δρομολογήσουν την απορροή μέσω της τοπογραφίας. Ένα υδρογραφικό δίκτυο συνίσταται από στοιχεία επιφανειακής ροής που αναπαριστούν τη ροή μέσα και πάνω στο έδαφος. Αυτά τα στοιχεία αναπαρίστανται σαν κελιά ενός πλέγματος σε ψηφιδωτή μορφή δεδομένων.

Ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Elevation Model – DEM) είναι χρήσιμο για τον προσδιορισμό της μορφής του εδάφους καθώς και του υδρογραφικού δικτύου. Τα βήματα επεξεργασίας και το μέγεθος των κελιών ενός DEM επηρεάζουν την κλίση της επιφάνειας του εδάφους, το μήκος του υδρογραφικού δικτύου και τις συνεκτικές του ιδιότητες. Τα παραγόμενα αποστραγγιστικά δίκτυα και οι υδραυλικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν τη μεταφορά της απορροής στην έξοδο της λεκάνης απορροής ενός ποταμού, εξαρτώνται από το μέγεθος των κελιών και από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για να παραγάγουν το υδρογραφικό δίκτυο. Μόλις καθοριστεί το υδρογραφικό δίκτυο και προκύψει η κλίση, οι υπόλοιπες υδραυλικές παράμετροι είναι προσαρμοσμένες. Τα χαρακτηριστικά του προκύπτοντος υδρογραφικού δικτύου μπορούν να επηρεάσουν την υδρολογική βαθμονόμηση και την απόδοση του μοντέλου. Η εξάρτηση των βασισμένων σε πλέγμα μοντέλων προσομοίωσης στην διακριτική ικανότητα του DEM είναι σημαντική, ανεξάρτητα από το αν το DEM είναι σε ψηφιδωτή ή σε μορφή δικτύου ακανόνιστων τριγώνων (Triangulated Irregular Network – TIN). Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι ένα κατανεμημένο μοντέλο είναι βαθμονομημένο (**calibrated**) σε μια συγκεκριμένη **διακριτική**

ικανότητα οι βαθμονομημένες παράμετροι μπορεί να χρειάζονται προσαρμογή όσο χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα μεγέθη κελιών. Η αυτόματη δημιουργία των υδρογραφικών δικτύων από τα DEM πρέπει να εξετάσει εάν ένα κελί είναι κελί επιφανειακής ροής ή ροής καναλιού. Η απόδοση και η βαθμολόγηση ενός μοντέλου μπορούν να επηρεαστούν από τις παραδοχές που χρησιμοποιούνται για να εξαγάγουν το δίκτυο.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια εφαρμογή του ArcHydro μέσω του προγράμματος ArcGIS 9.3 για διάφορες υδρολογικές διεργασίες με δεδομένα από τη λεκάνη απορροής του ποταμού Σπερχειού στην κεντρική Ελλάδα και θα αναλυθεί η χρησιμότητα του συγκεκριμένου λογισμικού.

9.2 Μοντελοποίηση με το ArcHydro

Σε όλο τον κόσμο, οι υδρολόγοι έχουν αφιερώσει το χρόνο τους για την ακριβή ποσοτικοποίηση της ποσότητας του νερού που είναι διαθέσιμη για τις κοινότητες που ζουν μέσα στις περιοχές διαφόρων λεκανών απορροής. Για την επίτευξη αυτών των στόχων, τα υδρολογικά μοντέλα θα πρέπει να συνδέονται με άλλες διαθέσιμες κλιματικές προσομοιώσεις, αναγνωρίσιμες από τα Ατμοσφαιρικά Γενικά Μοντέλα Κυκλοφορίας (Atmospheric General Circulation Models – AGCM). Κατά την τελευταία δεκαετία υπάρχει τεράστια εξέλιξη των υδρολογικών μοντέλων ενώ και στο μέλλον αναμένεται να υπάρξει μεγάλη ανάπτυξη των λόγω της συνεχούς αλλαγής των κλιματικών και ατμοσφαιρικών προσανατολισμών. Ορισμένα μοντέλα έχουν εγκαταλειφθεί επειδή οι λειτουργίες και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες χρησιμοποιούνταν για την παρακολούθηση των κλιματικών μεταβολών έχουν αλλάξει σε μεγάλο βαθμό. Αυτό συνεπώς καλεί για μια νέα ανάπτυξη των υδρολογικών μοντέλων σχετικά με τα τρέχοντα κλιματολογικά χαρακτηριστικά. Η προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών πρέπει να αποτελείται αυστηρά από ένα ισχυρό σύστημα ανατροφοδότησης, μέσω του οποίου μπορούν να παρακολουθούνται και να αξιολογούνται οι σημαντικές αλλαγές και οι αποκλίσεις από την κανονικότητα των υδρολογικών διεργασιών, για λόγους ανάπτυξης. Η ποσοτικοποίηση της διήθησης, της απορροής, της εξατμισοδιαπνοής έχουν εξεταστεί από κοινά υδρολογικά μοντέλα. Επιπλέον, η ενσωμάτωση των διαφοροποιημένων μοντέλων έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των περιόδων επαναφοράς για τις πλημμύρες, της ξηρασίας και άλλες σχετικές «καταστροφές» που συνδέονται με την υδρολογία.

Η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού και οι αλλαγές των δημογραφικών τάσεων ανάμεσα στις διάφορες περιοχές του κόσμου στέκεται ως εμπόδιο για την ανά-

πτυξη και το μόνο μέτρο αντιμετώπισης είναι να υπολογιστεί το ποσό του νερού που διατίθεται για συγκεκριμένες περιοχές. Από την έλλειψη υδάτινων πόρων και τη διαφύλαξη των βασικών διεργασιών του φυσικού περιβάλλοντος έχουν προκύψει διάφορα προβλήματα ανάπτυξης. Είναι κρίσιμο να σημειωθεί ότι σήμερα το ένα τρίτο του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικεί σε περιοχές που δεν διαθέτουν βιώσιμους υδάτινους πόρους. Η επικράτηση του φαινομένου αυτού και η αυξημένη ευπάθεια των περιοχών σε ασθένειες που μεταδίδονται μέσω του νερού ή που σχετίζονται με αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί μόνο με την παροχή αποτελεσματικού σχεδιασμού και αειφορική διαχείριση των υδάτινων πόρων μέσω της έγκαιρης μοντελοποίησης των διαθέσιμων πόρων. Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) και το σχετικό λογισμικό όπως το ArcHydro, μας επιτρέπει να αναλύσουμε αυτά τα υδρολογικά δεδομένα και να αποκαλύψουμε τις σχέσεις και τα πρότυπα.

Στη συνέχεια όπως προαναφέρθηκε ακολουθεί ένα παράδειγμα εφαρμογής του ArcHydro στη λεκάνη απορροής του ποταμού Σπερχειού.

9.3 Παράδειγμα εφαρμογής του ArcHydro στη λεκάνη απορροής του ποταμού Σπερχειού

9.3.1 Υλικά και Μέθοδοι

Το παράδειγμα της μελέτης που παραθέτουμε διεξήχθη στη λεκάνη του Σπερχειού ποταμού, που βρίσκεται στην κεντρική Ελλάδα. Τα βασικά χαρακτηριστικά των 61 σημείων απορροής που χρησιμοποιούνται σε αυτό το παράδειγμα για την περιοχή μελέτης δίνονται στον Πίνακα 9.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 9.1: Χαρακτηριστικά σημείων απορροής λεκάνης απορροής ποταμού Σπερχειού

	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Εμβαδόν λεκάνης απορροής (km ²)	20,45	28,86	1,48	170,27
Περίμετρος λεκάνης απορροής (km ²)	18,35	12,20	5,57	62,98
Μέση κλίση (%)	15,49	4,47	15,49	4,47
Μέσο Υψόμετρο (m)	669,97	308,80	157,29	1384,14
Συντελεστής κυκλικότητας	1,39	0,53	0,15	2,70
Μήκος κυρίου ρεύματος (km)	7,01	4,77	1,35	29,91

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ArcHydro Geoprocessing Tool v.1.3 για το πρόγραμμα ArcGIS v.9.3 (για ορισμένες λειτουργίες θα έπρεπε να χρησιμοποιήσει την επέκταση του Spatial Analyst). Συγκεκριμένα εφαρμόστηκαν οι ακόλουθες λειτουργίες (ArcHydro GP Tools v.1.3 2009):

- Προ-επεξεργασία της επιφάνειας (Terrain Preprocessing): Ανακατασκευή του DEM (DEM Reconditioning) και συμπλήρωση «γέμισμα» του υδρογραφικού δικτύου (Fill Sinks)
- Υπολογισμός κατεύθυνσης και συσσώρευσης της ροής (Flow direction και Flow accumulation)
- Ορισμός και κατάτμηση του υδρογραφικού δικτύου (Stream definition and Stream segmentation)
- Οριοθέτηση του πλέγματος της λεκάνης απορροής και επεξεργασία του πολυγώνου της λεκάνης απορροής (Catchment grid delineation and catchment polygon processing)
- Υδρογραφικό δίκτυο, ένωση των υπολεκανών για να δημιουργηθούν κοινά όρια και επεξεργασία των σημείων του αποστραγγιστικού δικτύου (Drainage line, Adjoint catchment and Drainage point processing)
- «Κεντροποίηση» της λεκάνης απορροής (Drainage area centroid)
- Αποτύπωση του μεγαλύτερου «μονοπατιού» της ροής (Longest flow path)
- Δημιουργία υδρογραφικού δικτύου: άκρες και διασταυρώσεις (Hydro network generation: Hydro edge and Hydro junction)
- Δημιουργία κόμβων και συνδέσμων: Σχηματική σύνδεση των κόμβων (Node / Link schema generation: Schema link and Schema node)
- Μήκος του κατάντη υδρογραφικού δικτύου για τον υπολογισμό των άκρων (Length downstream for edges calculation)
- Μήκος του κατάντη υδρογραφικού δικτύου για τον υπολογισμό των διασταυρώσεων (Length downstream for junctions calculation)
- Προσδιορισμός των επόμενων υπολογισμένων ρευμάτων

Ως κατώτατο όριο ευαισθησίας για τον ορισμό των ρευμάτων ορίστηκε το 1% της μέγιστης ροής. Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DEM) που δημιουργήθηκαν με τη χρήση των συντεταγμένων (γεωγραφικό μήκος – x , γεωγραφικό πλάτος – y), το μέσο υψόμετρο – z και τη μέθοδο παρεμβολής του το δικτύου ακανόνιστων τριγώνων (TIN).

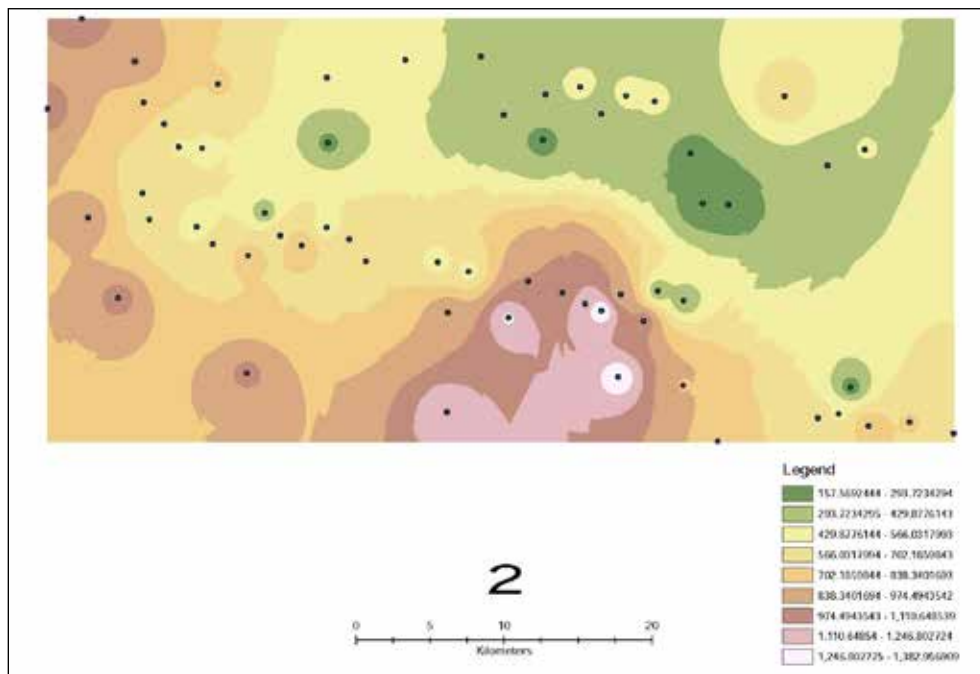
Ως σύστημα αναφοράς συντεταγμένων (CRS) χρησιμοποιήθηκε το Παγκόσμιο Εγκάρσιο Μερκατορικό Σύστημα (Universal Transverse Mercator – UTM) σε WGS 1984. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Σπερχειού ανήκει στη ζώνη UTM 34N.

Κάθε εικόνα που παράγεται από το πρόγραμμα ArcHydro είναι ένας ορθογώνιος χάρτης στον οποίο η περιοχή μελέτης ορίζεται από τις συντεταγμένες της κάτω αριστερά και της πάνω δεξιάς γωνίας αντί των συνηθισμένων ορίων Δύση - Ανατολή - Βορράς - Νότος. Η συγκεκριμένη απεικόνιση έγινε επειδή οι γραμμές ίσου πλάτους και μήκους δεν είναι ευθείες, οπότε είναι θα ήταν μάλλον κακές επιλογές ως όρια του χάρτη (Maris et al., 2013).

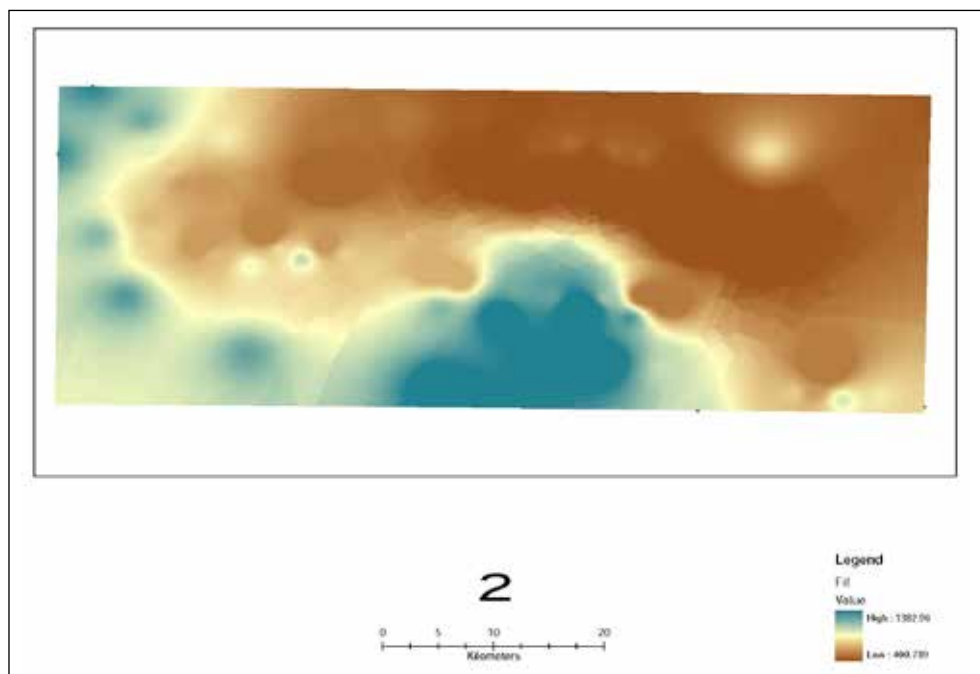
9.3.2 Αποτελέσματα

Προ-επεξεργασία της επιφάνειας (Terrain Preprocessing): Ανακατασκευή του DEM (DEM Reconditioning) και συμπλήρωση «γέμισμα» του υδρογραφικού δικτύου (Fill Sinks)

Το DEM χρησιμοποιείται για να καθορίσει το υδρογραφικό σχέδιο της επιφάνειας. Μόλις η προ-επεξεργασία ολοκληρωθεί, το DEM και τα παράγωγά του μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτελεσματική σκιαγράφιση του υδροκρίτη και την παραγωγή του υδρογραφικού δικτύου. Ειδικότερα, η λειτουργία της ανακατασκευής του DEM μεταβάλλει το DEM με την εισαγωγή των γραμμικών χαρακτηριστικών (Σχήμα 9.1), ενώ η συμπλήρωση ή αλλιώς το «γέμισμα» του υδρογραφικού δικτύου γεμίζει τα κενά του πλέγματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.2. Εάν το κελί περιβάλλεται από κελιά με μεγαλύτερα υψόμετρα, το νερό είναι παγιδευμένο σε αυτό το κελί και κατά συνέπεια δεν μπορεί να κυλήσει. Η συμπλήρωση του υδρογραφικού δικτύου τροποποιεί την τιμή του υψόμετρου για να ελαχιστοποιούνται αυτά τα προβλήματα.



ΣΧΗΜΑ 9.1: Λειτουργία ανακατασκευής του DEM (DEM Reconditioning)



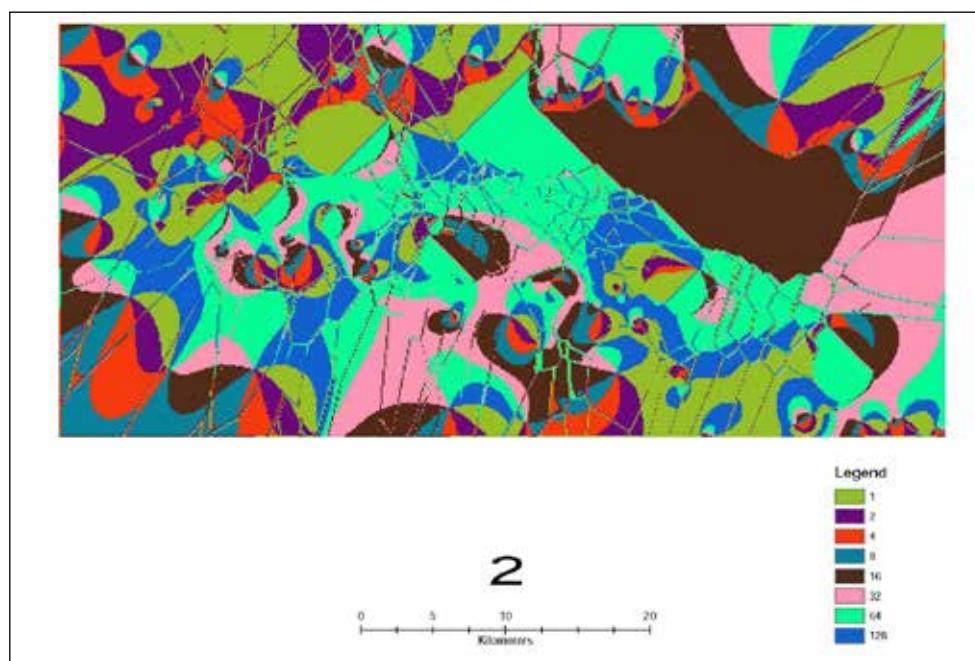
ΣΧΗΜΑ 9.2: Συμπλήρωση ή «γέμισμα» του υδρογραφικού δικτύου (Fill sinks)

Υπολογισμός κατεύθυνσης και συσσώρευσης της ροής (Flow direction και Flow accumulation)

Η λειτουργία Flow direction υπολογίζει την κατεύθυνση της ροής για ένα δεδομένο πλέγμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.3. Το νερό που είναι αποθηκευμένο σε κάθε κελί του πλέγματος θα κυλήσει προς τα γειτονικά κελιά με το χαμηλότερο υψόμετρο. Ο συνολικός αριθμός των κυττάρων, ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής του νερού σε αυτά, δίνεται στον Πίνακα 9.2.

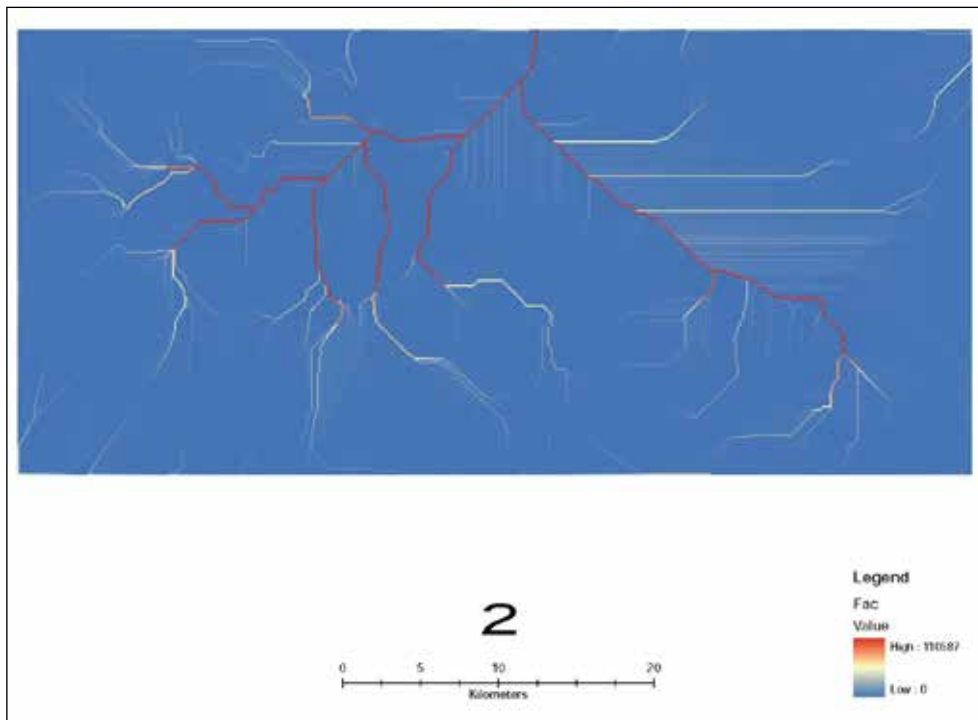
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.2: Κατεύθυνση ροής (Flow direction) στο πλέγμα

Προσανατολισμός	Τιμή	Αριθμός κελιών
Ανατολικά	1	23877
Νοτιο-ανατολικά	2	12004
Νότια	4	9083
Νοτιο-δυτικά	8	7608
Δυτικά	16	22745
Βόρειο-δυτικά	32	17779
Βόρεια	64	25812
Βορειο-ανατολικά	128	15879



ΣΧΗΜΑ 9.3: Κατεύθυνση ροής (Flow direction)

Η λειτουργία της συσσώρευσης της ροής (Flow accumulation) υπολογίζει τη ροή στο πλέγμα, το οποίο περιέχει τον συσσωρευμένο αριθμό κελιών του πλέγματος (Σχήμα 9.4). Από την έξοδο του πλέγματος της συσσωρευμένης ροής, ανοίγοντας κάποιος τις ιδιότητες πίνακα του Flow accumulation και επιλέγοντας την πηγή μπορεί να παρατηρήσει πόσα κελιά υπάρχουν στο δίκτυο, ποια είναι η μέγιστη συσσώρευση ροής για ένα συγκεκριμένο αριθμό κελιών και ποια αποστραγγιστική περιοχή αντιπροσωπεύουν αυτά τα κελιά.

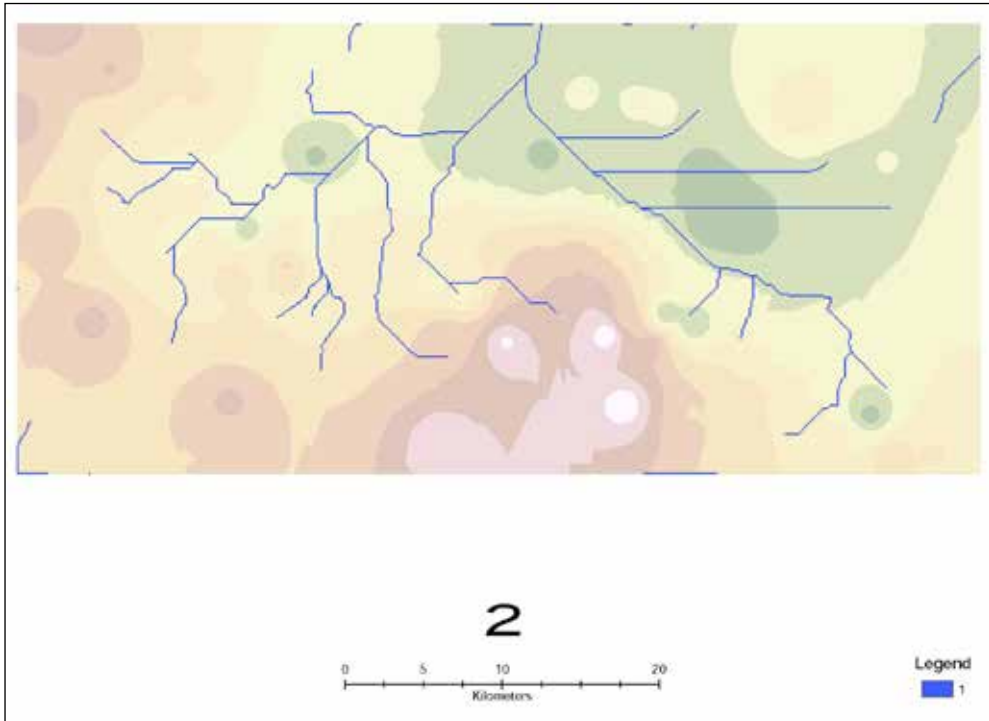


ΣΧΗΜΑ 9.4: Συσσώρευση της ροής (Flow accumulation)

Ορισμός και κατάτμηση του υδρογραφικού δικτύου (Stream definition and Stream segmentation)

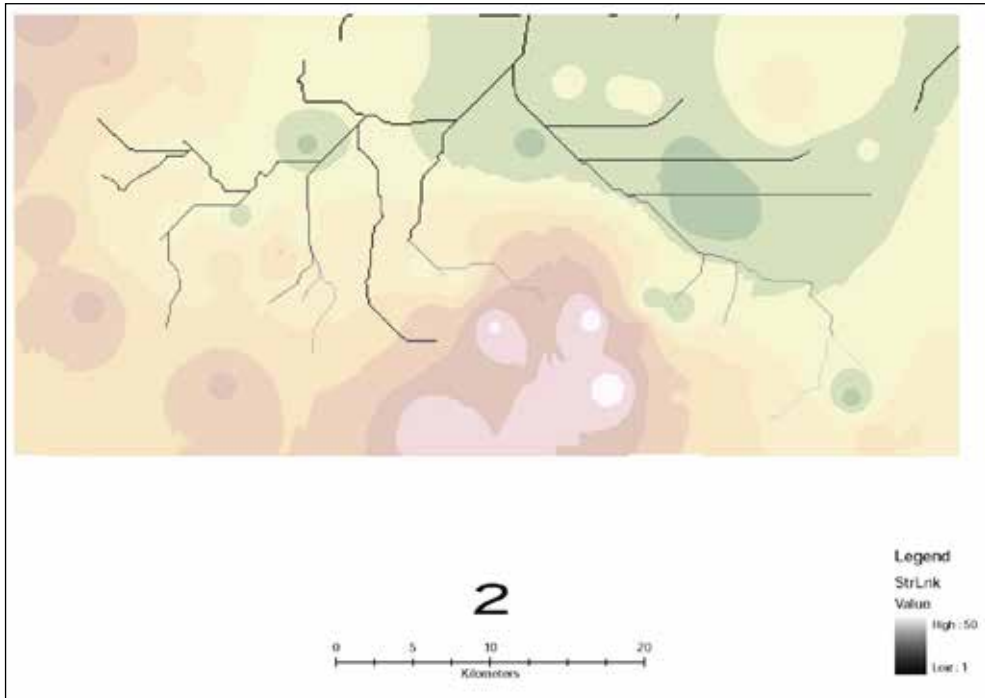
Η λειτουργία του ορισμού του υδρογραφικού δικτύου (Stream Definition) ορίζει ότι ένα πλέγμα υδρογραφικού δικτύου περιέχει την τιμή “1” για όλα τα κελιά ενός πλέγματος συσσώρευσης ροής (Flow accumulation grid) που εισάγονται και έχουν τιμές μεγαλύτερες από το κατώτατο όριο ευαισθησίας (1% της μέγιστης

ροής στην περίπτωση μελέτης μας, το οποίο είναι και το προεπιλεγμένο όριο για τον προσδιορισμό ενός ρεύματος) (Σχήμα 9.5). Η επιλογή τιμών κάτω από το όριο ευαισθησίας οδηγεί σε πυκνότερο υδρογραφικό δίκτυο και συνήθως μεγαλύτερο αριθμό σχεδιαζόμενων υπολεκανών.



ΣΧΗΜΑ 9.5: Ορισμός υδρογραφικού δικτύου (*Stream Definition*)

Η λειτουργία της κατάτμησης του υδρογραφικού δικτύου (*Stream Segmentation*) δημιουργεί ένα πλέγμα με επιμέρους ρεύματα που έχουν ένα μοναδικό αναγνωριστικό (ID) όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.6. Κάθε τμήμα μπορεί να είναι μέρος ενός γενικότερου τμήματος ή μπορεί να αποτελεί ένα συνδεδετικό μέρος ανάμεσα σε δύο τμήματα. Όλα τα κελιά σε ένα συγκεκριμένο τμήμα έχουν τον ίδιο κωδικό δικτύου που είναι ειδικά για το τμήμα αυτό.

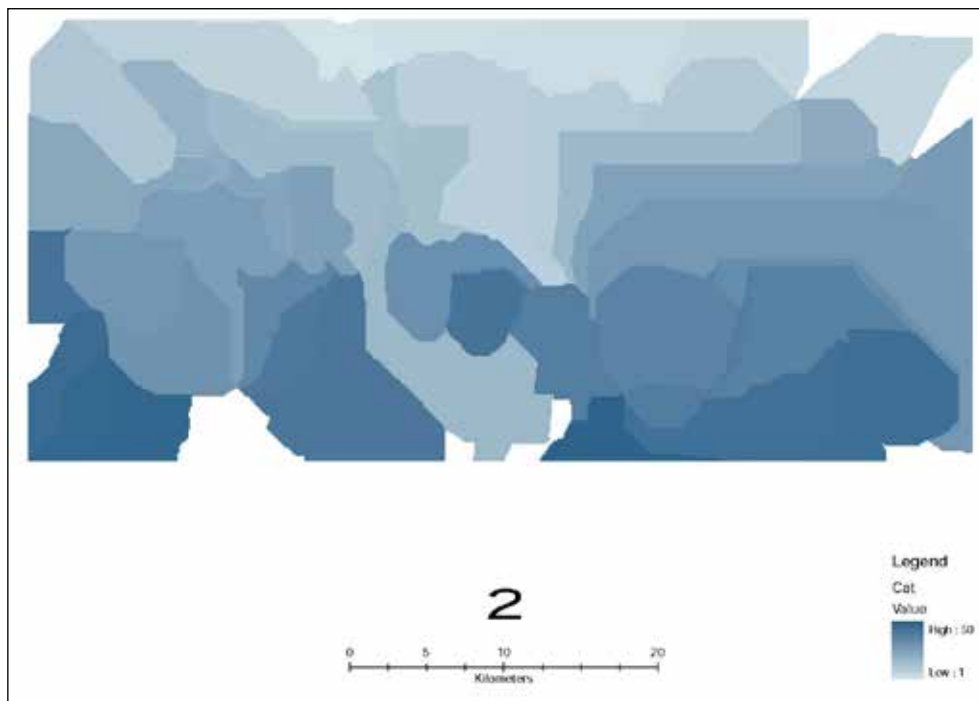


ΣΧΗΜΑ 9.6: Κατάτμηση του υδρογραφικού δικτύου (Stream Segmentation)

Οριοθέτηση του πλέγματος της λεκάνης απορροής και επεξεργασία του πολυγώνου της λεκάνης απορροής (Catchment grid delineation and catchment polygon processing)

Η λειτουργία της οριοθέτησης του πλέγματος της λεκάνης απορροής (Catchment grid delineation) δημιουργεί ένα πλέγμα στο οποίο κάθε κελί έχει μια τιμή (κωδικός πλέγματος) που δείχνει σε ποια λεκάνη ανήκει το κελί. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην τιμή κάθε μέρους του ρεύματος που στραγγίζεται την περιοχή που συνδέει τα επιμέρους ρεύματα.

Από το *Layer Properties* → *Symbology* → *Unique Values* μπορεί κανείς να δει τον αριθμό των κελιών που αντιστοιχούν σε κάθε λεκάνη απορροής. Ο αριθμός που προκύπτει είναι 50 λεκάνες και σχηματική παράσταση δίνεται στο Σχήμα 9.7.



ΣΧΗΜΑ 9.7: Οριοθέτηση του πλέγματος της λεκάνης απορροής (Catchment grid delineation)

Η λειτουργία της επεξεργασίας του πολυγώνου της λεκάνης απορροής (catchment polygon processing) μετατρέπει το πλέγμα της λεκάνης σε πολύγωνα (υπολεκάνες) όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.8.