

ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ & ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

Θεοφανίδη Σοφία

ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΟΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΓΕΓΟΝΟΤΟΣ ΣΤΟ ΣΠΕΡΧΕΙΟ ΠΟΤΑΜΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΚΑΤΣΑΦΑΔΟΣ ΠΕΤΡΟΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

ΚΑΡΥΜΠΑΛΗΣ ΕΥΘΥΜΙΟΣ

ΔΕΛΛΑΔΕΤΣΙΜΑΣ ΠΑΥΛΟΣ-ΜΑΡΙΝΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2019

Η Σοφία Θεοφανίδη

δηλώνω υπεύθυνα οτι:

α) Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.

β) Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κύριο Κατσαφάδο Πέτρο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το παρόν θέμα. Τον ευχαριστώ για τη στήριξή του σε όλη τη διάρκεια της διπλωματικής και σε ότι χρειάστηκα στη μετέπειτα πορεία.

Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Βέρα Νομικού, το Γεώργιο Βάρλα και το Κώστα Τσαπαρλή που με βοήθησαν ουσιαστικά και αποτελεσματικά στην εκπόνηση της εργασίας ειδικά με τις υδρομετεωρολογικές προσομοιώσεις.

Ένα ακόμα ευχαριστώ στο Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο και το Τμήμα Γεωγραφίας για τις γνώσεις που μας προσφέρει θεωρητικές και πρακτικές μέσω του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος για τη Διαχείριση των Φυσικών Καταστροφών και Κινδύνων.

Τέλος οφείλω να ευχαριστήσω τους φίλους και τη οικογένειά μου που με στηρίζουν διαρκώς σε όλη την προσπάθεια και την πορεία μου μέχρις στιγμής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....9

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....10

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΧΑΡΤΩΝ.....14

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....16

Περίληψη.....18

Abstract.....20

Εισαγωγή 21

Ανασκόπηση στη βιβλιογραφία..... 22

1. Υδρολογία..... 30

1.1 Υδρογράφημα πλημμύρας..... 36

1.2 Υδρολογικά μοντέλα..... 39

1.3 Υδρολογική μοντελοποίηση με GIS.....41

1.4 Μοντέλα βροχής-απορροής σε περιβάλλον GIS.....47

2. Αριθμητική πρόγνωση καιρού.....51

2.1Το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF.....53

2.2Σύστημα πυρήνα ARW……..55

2.3 Εξισώσεις ροής Euler…….……57

2.3.1 Η εξίσωση διατήρησης της μάζας…….. ..57

2.3.2 Η εξίσωση διατήρησης της ορμής…….……..58

2.3.3 Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας……58

2.4 Χρονική διακριτοποίηση με το σχήμα ενσωμάτωσης Runge-Kutta (RK)…….....59

2.5 Σχήμα υπομοντέλου εδάφους NOAH Land Surface Model….....62

2.6 Υδρολογική αναβάθμιση των σχημάτων υπολογισμού απορροής στο υπομοντέλο εδάφους NOAH……62

2.6.1 Σχήματα φυσικής για την χερσαία (overland) και υποδόρια (subsurface) απορροή.....65

2.6.2 Σχήμα φυσικής (routing physics) για τη διόδευση της επίγειας ροής (overland flow).....68

2.6.3.Η γραμμική εξίσωση συνέχειας.....66

2.6.4. Η εξίσωση διατήρησης της κίνησης.....66

2.6.5. Εξίσωση του Manning.....66

2.6.6. Εξίσωση συνέχειας (continuity equation).....67

2.6.7. Εξίσωση διατήρησης γραμμικής ορμής (momentum).....67

2.6.8. Παροχετευτική ικανότητα του υδατορέματος K.....68

2.6.9. Η αυτόνομη λειτουργία GIS Pre-processing toolbox 69

2.7. Το υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro.....78

2.7.1. Μεταβλητές εισόδου και εξόδου στο WRF-Hydro.....79

3. Το μοντέλο απορροής-βροχόπτωσης ισόχρονων καμπύλων GIS.....83

3.1. Δεδομένα εισόδου για το μοντέλο ισόχρονων καμπυλών.....83

3.2. Το Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης.....83

3.3 Κατασκευή του καννάβου με τους συντελεστές τραχύτητας εδάφους.....86

3.4. Υπολογισμοί θεματικών επιπέδων στο μοντέλο ισόχρονων καμπυλών με GIS και εκτέλεση του μοντέλου ισόχρονων καμπυλών με το GIS. 91

3.4.1. παροχή υδρογραφικού δικτύου.....91

3.4.2. Η παροχή της επίγειας ροής (overland flow).....91

3.5 Τα σενάρια βροχόπτωσης με το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF.....94

4. Η υδρολογική λεκάνη του Σπερχειού ποταμού.....96

4.1. Ποταμός Ίναχος (Βίστριτσα).....101

4.1.1 Το πλημμυρικό γεγονός του χρονικού διαστήματος 30/01/2015-01/02/2015 στον Ελλαδικό χώρο.....106

5. Εφαρμογή του υδρομετεωρολογικού μοντέλου WRF-Hydro.....106

6. Εφαρμογή του μοντέλου ισόχρονων καμπυλών με GIS.....119

7. Ανάλυση αποτελεσμάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....141

Ελληνική Βιβλιογραφία.....144

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....147

Ιστοσελίδες.....154

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Οι χρήσεις γης που χρησιμοποιούνται στο WRF-Hydro ανάλογα με τη ταξινόμηση της USGS.....76

Πίνακας 2: Μεταβλητές εισόδου στο υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro.....79

Πίνακας 3: Μεταβλητές εξόδου που παράγονται με τις προσομοιώσεις του υδρομετεωρολογικού μοντέλου WRF-Hydro.....80

Πίνακας 4: Ορισμός τιμών για το επίπεδο συντελεστή τραχύτητας γης (manning).....86

Πίνακας 5: Στατιστικά στοιχεία για τις ψηφίδες (cells) του επιπέδου των ισόχρονων καμπυλών του Σεναρίου 1.....120

Πίνακας 6: Στατιστικά των ψηφίδων (cells) του ψηφιδωτού επίπεδου (raster) των ισόχρονων καμπύλων για το Σενάριο 2 124

Πίνακας 7: Στατιστικά στοιχεία των ψηφίδων για τις ισόχρονες καμπύλες του Σεναρίου 3.....128

Πίνακας 8: Στατιστικά στοιχεία των ψηφίδων (cells) για την κάθε ισόχρονη καμπύλη του Σεναρίου 4.....133

Πίνακας 9: Στατιστικά στοιχεία των ψηφίδων (cells) των ισόχρονων καμπυλών του Σεναρίου 5. Υπολογιζόμενος μέγιστος χρόνος παραμονής του νερού στο σενάριο αυτό ισούται με 1 ώρα.....137

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Ο υδρολογικός κύκλος (πηγή εικόνας: www.usgs.gov).....30

Σχήμα 2: Τα κύρια μεγέθη ενος υδρογραφήματος πλημμύρας (flood hydrograph) απο Μαμάσης, 2009.....31

Σχήματα 3α και 3β: Μηχανισμοί δημιουργίας επιφανειακής απορροής και υπεδάφιας απορροής στην περίπτωση του αρχικού σταδίου της ροής απο βροχή (α) και στην περίπτωση του προχωρημένου σταδίου (β) στην οποία η στάθμη των υδροφόρων εκφορτίζεται στην κοίτη του υδατορέματος (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).....34

Σχήμα 4: Αναπαράσταση των κύριων υδρολογικών διεργασίων στη διάρκεια μιας πλημμύρας.....35

Σχήμα 5: Διάγραμμα ενός απλού πλημμυρικού υδρογραφήματος με το αντίστοιχο υετογράφημα και τα χαρακτηριστικά του μεγέθη.....38

Σχήμα 6 : Υπέρθεση διαφορετικών θεματικών επιπέδων στο GIS.....43

Σχήμα 7: Παράδειγμα ενός καννάβου υψομέτρου (Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους). 43

Σχήμα 8: Υπολογισμός της κλίσης σε Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους. 44

Σχήμα 9: Γραμμοσκιασμένη επιφάνεια (hillshade) Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους που χρησιμοποιείται στην ανάλυση και ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της επιφάνειας του εδάφους. 44

Σχήμα 10: Υπολογισμός της κατεύθυνσης ροής (flow direction) στο GIS. 45

Σχήμα 11: Ο αλγόριθμος που υπολογίζει το επίπεδο συγκέντρωσης ροής.....46

Σχήμα 12 : Η διαβάθμιση των υδρογραφικών κλάδων κατά Strahler με τη λειτουργία Stream Order.....50

Σχήμα 13: Μέθοδος υπολογισμού του υδρογραφήματος στην έξοδο της λεκάνης με βάση την εκτίμηση των ισόχρονων καμπυλών σε μια υποθετική υδρολογική λεκάνη η οποία χωρίζεται σε τέσσερις ζώνες ίσου εμβαδού δεχόμενες βροχόπτωση ίσης έντασης (απο Κουτσογιάννης, 1999).....55

Σχήμα 14: Δομή λειτουργίας πυρήνα WRF-ARW (Skamarock et al, 2008).....56

Σχήμα 15: Η κατακόρυφη δομή του ατμοσφαιρικού μοντέλου WRF.....60

Σχήμα 16: Κύριες υδρομετεωρολογικές διεργασίες που μοντελοποιούνται στο υπομοντέλο εδάφους NOAH όπως η απορροή (runoff) η εξάτμιση και η διαπνοή. Με τις υδρολογικές αναβαθμίσεις βετιώνεται η εκτίμηση των υδρολογικών διεργασιών στο υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro. 64

Σχήμα 17: Σχηματοποίηση της εκτίμησης της υποδόριας ροής (subsurface flow) στο υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro στην υδρολογική αναβάθμιση του υπομοντέλου εδαφους NOAH (Gochis, 2013, 2018).....65

Σχήμα 18: Σχηματοποίηση της εκτίμησης της επίγειας ροής στο υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro (Gochis, 2013,2018).....68

Σχήμα 19: Χαρακτηριστικά της κοίτης υδατορέματος τα οποία λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της παροχής στο υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro μέσω της διόδευσης ροής (Gochis et al, 2013, 2018). **.....70**

Σχήμα 20: Η εφαρμογή στην οποία εισάγονται η πλεγματική δομή της τοπογραφίας που έχει δημιουργηθεί με το ατμοσφαιρικό μοντέλο σε nc μορφή (Input GEOGRID file) και το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους υψηλότερης ανάλυσης (Input elevlation raster) για τη δημιουργία υδρολογικών θεματικών επιπέδων υψηλής ανάλυσης για τον υπολογισμό της παροχής και της στάθμης νερού στο υδρογραφικό δίκτυο (WRF-Hydro output routing high resolution grids)....73

Σχήμα 21: Η τοπογραφία που εισάγεται στο GIS preprocessing toolbox που προέρχεται απο το GEOGRID netCDF αρχείο (πλεγματικό αρχείο του ατμοσφαιρικού μοντέλου) και δεξιά η εισαγωγή του ΨΜΕ υψηλής ανάλυσης για την παραγωγή των υδρολογικών επιπέδων υψηλής ανάλυσης (high resolution routing grids) που θα εισαχθούν στο WRF-Hydro. Η ανάλυση της ψηφίδας της τοπογραφίας αριστερά ισούται με 1km ενώ η ανάλυση του ΨΜΕ δεξιά ισούται με 100m.....73

Σχήμα 22: Απεικόνιση του υδρογραφικού δικτύου της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού ποταμού ως μεταβλητή εξόδου του GIS preprocessing toolbox για την μετέπειτα χρησιμοποίησή του απο το υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro.....74

Σχήμα 23: Απεικόνιση της εκτίμησης της κατεύθυνσης ροής (flow direction) που εισάγεται στο υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro.....74

Σχήμα 24: Οι τάξεις κατά Strahler του υδρογραφικού δικτύου που παράγονται απο το GIS preprocessing toolbox ως δεδομένο εισόδου στο υδρομετεωρολγικό μοντέλο WRF-Hydro.....75

Σχήμα 25: Οι χρήσεις γης που χρησιμοποιούνται απο το μοντέλο WRF-Hydro σύμφωνα με τη ταξινόμηση της USGS.....78

Σχήμα 26: Η δομή του υδρομετεωρολογικού συστήματος WRF-Hydro.....107

Σχήματα 27-43: Υδρομετεωρολογικές προσομοιώσεις με το WRF-Hydro ξεκινώντας απο 29/01/2015 00 00 UTC 02/02/2015 00 00 UTC για την υδρολογική λεκάνη του Σπερχειού ποταμού.

Σχήμα 27 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 02 00 UTC 29/01/2015.....107

Σχήμα 28 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 08 00 UTC 30/01/2015.....108

Σχήμα 29 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 11 00 UTC 30/01/2015.....108

Σχήμα 30 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 12 00 UTC 30/01/2015.....108

Σχήμα 31 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 20 00 UTC 30/01/2015.....109

Σχήμα 32 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 22 00 UTC 30/01/2015.....109

Σχήμα 33 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 01 00 UTC 31/01/2015.....109

Σχήμα 34 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 07 00 UTC 31/01/2015.....110.

Σχήμα 35 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 19 00 UTC 31/01/2015.....110.

Σχήμα 36 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 01 00 UTC 01/02/2015.....110.

Σχήμα 37 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 05 00 UTC 01/02/2015.....111.

Σχήμα 38 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 11 00 UTC 01/02/2015.....111.

Σχήμα 39 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 17 00 UTC 01/02/2015.....111.

Σχήμα 40 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 21 00 UTC 01/02/2015.....112.

Σχήμα 41 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 23 00 UTC 01/02/2015.....112.

Σχήμα 42 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 01 00 UTC 02/02/2015.....112.

Σχήμα 43 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 07 00 UTC 02/02/2015.....113

Σχήμα 44 Χρονικό βήμα προσομοίωσης WRF-ARW V3 Hydro offline 15 00 UTC 02/02/2015.....113

Σχήμα 45 Παράδειγμα ρύθμισης του πηυρήνα ARW-WRF του ατμοσφαιρικού μοντέλου και των τεσσάρων υποτομέων μοντελοποίησης D01, D02, D03, D04.....115

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΧΑΡΤΩΝ

Χάρτης 1: Ορισμός του τομέα μοντελοποίησης (model domain) στο ΨΜΕ υψηλής ανάλυσης (100 km cell size) με το GIS σε σύστημα αναφοράς Lambert Conformal Conic.....72

Χάρτης 2: Χάρτης με τις χρήσεις γης Corine Land Cover που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του χάρτη συντελεστή τραχύτητας εδάφους. Η κλίμακα χαρτογράφησης ισούται με 100m.....85

Χάρτης 3: Το ΨΜΕ της υδρολογικής λεκάνης της περιοχής μελέτης (Ίναχος-Βίστριτσα). Με κόκκινο περίγραμμα σημειώνονται τα όρια της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού ποταμού.....89

Χάρτης 4: Χωρική εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας Manning για την υδρολογική λεκάνη του Ίναχου ποταμού.....90

Χάρτης 5: Η ευρύτερη περιοχή της περιοχής της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού ποταμού. Ο κύριος υδρογραφικός κλάδος του Σπερχειού εκτείνεται σε Α-Δ διεύθυνση ανάμεσα στις οροσειρές του Τυμφρηστού (δυτικά της εικόνας) και της Οίτης (νότιο τμήμα της εικόνας). 97

Χάρτης 6: Γεωλογικός χάρτης για την περιοχή της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού (κλίμακας 1:25000) απο ΙΓΜΕ. Απο Καρλή (2013).....99

Χάρτης 7: Χρήσεις γης για όλη την έκταση της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού ποταμού. Η ταξινόμηση των χρήσεων γης βασίστηκε στο πρόγραμμα Corine Land Cover 2018 ανάλυσης περίπου 25m.....100

Χάρτες επιφάνειας 8, 9 : Συνοπτική κατάσταση του ευρύτερου χώρου της Μεσογείου για τις ημερομηνίες 29/01/2015 , 30/01/2015 και 01/01/2015 (12 00 UTC , 12 00 UTC,00 00 UTC χρονικά βήματα αντίστοιχα). Πηγή των χαρτών επιφανείας (www.wetter3.de).....106

Χάρτης 11Α: Υπολογισμός ισόχρονων καμπυλών για το πρώτο σενάριο πρόγνωσης καιρού στο σημείο (lat/lon 22.14, 38.72) στην ανάντη μεριά της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού.....106.

Χάρτης 11Β: Υπολογισμός χρόνου συρροής για το πρώτο σενάριο πρόγνωσης με το WRF στο σημείο lat/lon (22.14/38.72).....122

Χάρτης 12Α: Υπολογισμός ισόχρονων καμπυλών για το δεύτερο σενάριο πρόγνωσης καιρού (31/02/2015) στο σημείο (lat/lon 22.14, 38.72) στην ανάντη μεριά της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού.....123

Χάρτης 12Β: Υπολογισμός χρόνου συρροής για το δεύτερο σενάριο πρόγνωσης με το WRF στο σημείο lat/lon (22.14/38.72).....126

Χάρτης 13Α: Υπολογισμός ισόχρονων καμπυλών για το τρίτο σενάριο πρόγνωσης καιρού (01/02/2015) στο σημείο (lat/lon 22.14, 38.72) στην ανάντη μεριά της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού.....127

Χάρτης 13Β: Υπολογισμός χρόνου συρροής για το τρίτο σενάριο πρόγνωσης με το WRF στο σημείο lat/lon (22.14/38.72).....129

Χάρτης 14Α: Υπολογισμός ισόχρονων καμπυλών για το τέταρτο σενάριο πρόγνωσης καιρού στο σΧάρτης 14Β: Υπολογισμός χρόνου συρροής για το τέταρτο σενάριο πρόγνωσης με το WRF στο σημείο lat/lon (22.14/38.72) κοντά στην περιοχή Καστρί κατάντη της περιοχής της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου.ημείο (lat/lon 22.14, 38.72) στην ανάντη μεριά της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού.....130

Χάρτης 14Β: Υπολογισμός χρόνου συρροής για το τέταρτο σενάριο πρόγνωσης με το WRF

στο σημείο lat/lon (22.14/38.72) κοντά στην περιοχή Καστρί κατάντη της περιοχής της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου.....135

Χάρτης 15Α: Υπολογισμός ισόχρονων καμπυλών για το πρώτο σενάριο πρόγνωσης καιρού στο σημείο (lat/lon 22.14, 38.72) στην ανάντη μεριά της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού.....138

Χάρτης 15Β: Υπολογισμός χρόνου συρροής για το πέμπτο σενάριο πρόγνωσης με το WRF στο σημείο lat/lon (22.14/38.72) κοντά στην περιοχή Καστρί.....139

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Γενικό διάγραμμα ροής διεργασιών στο WRF-Hydro.....82

Διάγραμμα 2: Ροή εργασιών για το μοντέλο ισόχρονων καμπυλών (Μαμάσης, 2007).....84

Διάγραμμα 3: Εφαρμογή του μοντέλου ισόχρονων καμπυλών με το Model Builder του ArcGIS.....95

Διάγραμμα 4: Χρονοσειρά εκτίμησης πλημμυρικής παροχής (lat lon συντενταγμένες 38.86, 22.16 στην κοίτη του Ίναχου ποταμού) για το χρονικό διάστημα από 29/01/2015 έως 03/02/2015.....119

Διάγραμμα 5: Χρονοσειρές πρόγνωσης βροχόπτωσης και παροχής (forecasted values) για χρονικό διάστημα 120 h από 29/01/2015 UTC εως και 03/02/2015 UTC στο σημείο συμβολής του Σπερχειού ποταμού με τον Ίναχο. 120

Διάγραμμα 6α: Ιστόγραμμα 24ωρης πρόγνωσης της βροχής για το πρώτο σενάριο στο σημείο με το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF.....122

Διάγραμμα 6β: Εκτιμώμενη παροχή για το πρώτο σενάριο πρόγνωσης της βροχής ανάντη της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου.....122

Διάγραμμα 7α: Εκτίμηση παροχής για το δεύτερο σενάριο πρόγνωσης της βροχής (31/01/2015) ανάντη της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού.....126

Διάγραμμα 7β: Ιστόγραμμα 24ωρης πρόγνωσης της βροχής ανάντη της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου με το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF.....126

Διάγραμμα 8β: Εκτίμηση βροχής για το τρίτο σενάριο πρόγνωσης της βροχής (01/02/2015) ανάντη της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού.....129

Διάγραμμα 8α: Εκτίμηση παροχής για το τρίτο σενάριο πρόγνωσης της βροχής (01/02/2015) ανάντη της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού.....130

Διάγραμμα 9: Πρόγνωση βροχής WRF για το σημείο lat/lon (22.14/ 38. 72) κοντά στην περιοχή Δάφνη ανάντη της λεκάνης του Ίναχου ποταμού για το χρονικό διάστημα 30/01/2015 έως και 01/02/2015 (72 ώρες χρονική διάρκεια πρόγνωσης του σεναρίου βροχής).....132

Διάγραμμα 10: Εκτίμηση παροχής Q (t) για το χρονικό διάστημα 30/01/2015 έως και 01/02/2015 στον Ίναχο ποταμό (συμβολή με Σπερχειό).....133

Διάγραμμα 11α: Πρόγνωση βροχής με το WRF για το τέταρτο σενάριο πρόγνωσης (30/01/2015) στο σημείο κατάντη της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου σημείο (lat/lon 22.14, 38.72).....135

Διάγραμμα 11β: Πρόγνωση παροχής του Ίναχου για το τέταρτο σενάριο πρόγνωσης με το μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής ισόχρονων. 135

Διάγραμμα 12: Υδρογράφημα πλημμυρικής παροχής για τα σενάρια 4 και 5.....141

Διάγραμμα 13: Πρόγνωση βροχής (mm) για τα σενάρια 4 και 5.....141

Περίληψη

Οι πλημμύρες αποτελούν ένα φυσικό αλλά επιζήμιο και καταστροφικό πολλές φορές φαινόμενο και οι καταστροφές που προκαλούν αυξάνονται με γοργούς ρυθμούς και σε παγκόσμια κλίμακα και συχνότητα. Η πρόγνωση των πλημμυρών συμβάλλει στην έγκαιρη επίγνωση και την ετοιμότητα και κρίνεται απαραίτητη ιδιαίτερα σε περιοχές υψηλού πλημμυρικού κινδύνου.

Οι υδρολογικές προσομοιώσεις αποτελούν σημαντικό εργαλείο για την εφαρμογή μέτρων και πολιτικών για τους φυσικούς κινδύνους και μπορούν να αξιοποιηθούν όχι μόνο σε ερευνητικό αλλά και σε επιχειρησιακό επίπεδο.

Στην παρούσα εργασία προσομοιώνεται ενα καταστροφικό πλημμυρικό γεγονός χρησιμοποιώντας δυο μοντέλα τα οποία με διαφορετικές προσεγγίσεις εκτιμούν την πλημμυρική παροχή και την χρονική εξέλιξη της πλημμύρας το χρονικό διάστημα 29/01/2015 έως και 03/02/2015 που συνέβη στην υδρολογική λεκάνη του Σπερχειού ποταμού.

Το υδρομετεωρολογικό μοντέλο μπορεί να προσομοιώνει τις ατμοσφαιρικές και υδρολογικές διεργασίες δίνοντας τη δυνατότητα μελέτης της αλληλεπίδρασής τους. Μεγαλύτερο πλεονέκτημα του υδρομετεωρολογικού μοντέλου η προσομοίωση των υδρομετεωρολογικών διεργασιών για όλη την έκταση της υδρολογικής λεκάνης και η πρόγνωσή της μέρες πριν την εξέλιξή της (χρησιμοποιώντας τις μετεωρολογικές προγνώσεις) γεγονός που καθιστά τις υδρομετεωρολογικές προγνώσεις ιδιαίτερα χρήσιμες στην πρόληψη και διαχείριση των καταστροφών.

Με το GIS μοντέλο των ισόχρονων καμπυλών γίνεται η εκτίμηση πλημμυρογραφημάτων για διαφορετικά σενάρια πρόγνωσης βροχόπτωσης σε δυο διαφορετικά σημεία της λεκάνης του Σπερχειού χωρίς να υπάρχουν παρατηρήσεις για την βροχόπτωση, με τη βοήθεια μετεωρολογικών προσομοιώσεων. Το μοντέλο αυτό αποτελεί ένα χωρικά κατανεμημένο μοντέλο εκτίμησης του υδρογραφήματος της πλημμύρας λαμβάνοντας υπόψη κυρίως τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της υδρολογικής λεκάνης καθώς και άλλες παραμέτρους όπως το συντελεστή τραχύτητας, το ύψος της βροχόπτωσης και τις χρήσεις γης.

Δύσκολη η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων επειδή στην παρούσα μελέτη δεν παρέχονται δεδομένα και παρατηρήσεις για την παροχή και τη βροχόπτωση.

Στόχος της παρούσας εργασίας η σύγκριση των δυο προσεγγίσεων και ο σχολιασμός των περιορισμών τους. Επίσης στην παρούσα εργασία διερευνάται η πιθανή χρήση των δυο μοντέλων ως εργαλεία για την πρόληψη και διαχείρηση των καταστροφών.

Λέξεις κλειδιά: Υδρομετεωρολογία, Πρόγνωση πλημμύρας, Υδρολογικά μοντέλα, Πλημμύρες, WRF-Hydro, GIS, Διαχείριση Πλημμυρών

Abstract

The prediction of natural phenomena is a highly difficult task sometimes due to the complexity and the non –linearity of natural processes. In this study we used two different models in order to estimate the rainfall and river discharge during a catastrophic flood event which took place in Central Greece (Spercheios River Basin) during the winter of 2015 (29/01/2015-03/02/2015). The aim of this study is to compare these two approaches in the context of using them in the future as emergency and planning tools.

The first model is a coupled hydrometeorological system (WRF-Hydro) which simulates the interaction between atmosphere-hydrological environment. The model was configured in a fine vertical and horizontal resolution using multiple nests and GIS tools in order to build the hydrological catchment and the hydrographic network. This model fully captures the state of the atmosphere –hydrological interaction including river discharge estimation during the flood event using a specific GIS preprocessing tool which enhances hydrological estimations. The advantage of this system is the multiple and parallelized configuration which enables to estimate properties of the atmosphere (precipitation) and hydrological discharge in the river network in high resolution and in advance of the real event (by using WRF meteorological predictions).

The second model simulates the rainfall – runoff hydrograph in GIS environment and estimates the required time for each section of the basin to be fully drained (isochrones model) until the outlet of the catchment. This model takes account of the river basin geomorphological characteristics such as topography and slope, the hydrographic network, the spatial distribution of surface roughness and land use in order to estimate the spatial distribution of water velocity and river discharge (and consequently estimates the hydrograph at the outlet of the catchment).

The purpose of this study is to compare these two modelling approaches from a planning point of view and explore how they might be usefull for future application in disaster management or in an operational hydrological forecasting context. The results are encouraging in estimating hydrograph during the flood event with no precipiatation observations and in advance of the real event which is quite essential for an improved flood preparedness and mitigation integration plan.

Key words: Hydrometeorology, Hydrological modelling, WRF-Hydro, GIS, Flood Management.

Εισαγωγή

Οι πλημμύρες αν και φυσικό φαινόμενο είναι ιδιαίτερα επιζήμιες και συνδέονται με καταστροφές μεγάλου μεγέθους, έχοντας ως αποτέλεσμα σημαντικό κοινωνικό και οικονομικό κόστος. Η κλιματική αλλαγή και η έντονη αστικοποίηση θα επιφέρουν την αύξηση της συχνότητας των πλημμυρών και των έντονων καιρικών φαινομένων (Intergovernmental Panel for Climate Change, 2007, 2013) και συνεπώς των βροχοπτώσεων, γεγονός που θα οδηγήσει στην αύξηση του πλημμυρικού κινδύνου (flood risk) σε πολλές περιοχές του πλανήτη (Milly et al, 2001). Συνεπώς η ανάπτυξη συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης και παρακολούθησης ακραίων υδρομετεωρολογικών φαινομένων τίθεται αναγκαία και ταχεία.

Οι πλημμύρες στον Ελλαδικό χώρο, αποτελούν έναν από τους πιο συχνούς κινδύνους και συνήθως εκδηλώνονται ύστερα απο ακραία καιρικά φαινόμενα. Αρκετές μελέτες εστιάζουν στις επιπτώσεις των ακραίων υδρομετεωρολογικών φαινομένων στη Μεσόγειο λόγω της συχνότητας των φαινομένων αυτών , του μεγέθους των καταστροφών που προκαλούν και των κοινωνικών επιπτώσεων που επιφέρουν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα (Llasat-Botija et al, 2007). Πιο συγκεκριμένα, η κλιματική αλλαγή στη Μεσόγειο θα επιφέρει την αύξηση της συχνότητας εμφάνισης της ξηρασίας (Dai, 2011) και του κινδύνου απο τις πλημμύρες, φαινόμενα που σε συνδυασμό με την έντονη αστικοποίηση και τη ραγδαία αλλαγή των χρήσεων γης θα εντείνουν τις καταστροφές.

Η ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης του συστήματος ατμόσφαιρας-υδρόσφαιρας αποτέλεσε το αντικείμενο για πολλούς ερευνητές με στόχο τη βελτίωση της αναπαράστασης των υδρομετεωρολογικών και υδρολογικών διεργασιών, τη λήψη αποφάσεων και τη διαχείριση των υδατικών πόρων (Givati et al, 2016). Η επιχειρησιακή εφαρμογή των υδρολογικών μοντέλων από αρμόδιους φορείς με στόχο τη διαχείριση των φυσικών καταστροφών, αποτελεί κλειδί για την ανάπτυξη στρατηγικής ετοιμότητας των πληθυσμών, συστήματα που δίνουν δηλαδή τη δυνατότητα έγκαιρης προειδοποίησης και λήψης αποφάσεων πριν το πλημμυρικό γεγονός (Cloke and Pappenberger, 2009).

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια έχει συμβάλλει στην εξέλιξη των μοντέλων και της εκτίμησης των φυσικών μεταβλητών όπως τη θερμοκρασία του αέρα, την εδαφική υγρασία, την παροχή του υδατορέματος ανά μονάδα χρόνου, το ύψος της βροχόπτωσης σε ένα σημείο ή η χωρική εκτίμηση και διαφοροποίησή τους σε σχέση με το χρόνο.

Τα υδρολογικά μοντέλα χρησιμοποιούνται ευρέως για την εκτίμηση του υδρογραφήματος πλημμυρών που είναι και το ζητούμενο στις προσομοιώσεις των πλημμυρών.

Δυο μορφές εξέλιξης των υδρολογικών μοντέλων αποτελεί η σύζευξή τους με ατμοσφαιρικά μοντέλα (coupled atmosphere-hydrological systems) και η χωρικά κατανεμημένη εκτίμηση του υδρογραφήματος χρησιμοποιώντας Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.

Στην παρούσα εργασία εφαρμόζονται τα δυο μοντέλα για την εκτίμηση υδρογραφήματος ενός καταστροφικού πλημμυρικού γεγονότος στην υδρολογική λεκάνη του Σπερχειού ποταμού τη χρονική διάρκεια 29 Ιανουαρίου εως και 3 Φεβρουαρίου το 2015. Η εκδήλωση πλημμυρών το χρονικό διάστημα ήταν έντονη και επίμονη στις περισσότερες περιοχές της βορειοδυτικής και βόρειας Ελλάδας: καταστροφές εκδηλώθηκαν λόγω υπερχείλισης ταμιευτήρων και ποταμών όπως στο Σπερχειό, στο Καλαμά, στον Αχελώο και τον Άραχθο. Σημαντική απώλεια του γεγονότος αυτού αποτέλεσε η καταστροφή του ιστορικού γεφυριού της Πλάκας στην περιοχή του Άραχθου ποταμού, λόγω έντονης κακοκαιρίας και πλημμυρών. Το γεγονός αυτό στην παρούσα εργασία προσμοιώνεται με το υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro το οποίο αποτελεί σύζευξη του μετεωρολογικού μοντέλου WRF το οποίο χρησιμοποιείται για την αριθμητική πρόγνωση καιρού και της υδρολογικής αναβάθμισης του υπομοντέλου εδάφους NOAH, που χρησιμοποιεί αναβαθμισμένα σχήματα υπολογισμού της ροής στο υδρογραφικό δίκτυο μιας υδρολογικής λεκάνης και ΨΜΕ (Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους) υψηλής ακρίβειας για την ακριβέστερη εκτίμηση της παροχής και του ύψους στάθμης του νερού. Το υδρομετεωρολογικό μοντέλο συνδυάζει την υψηλής ακρίβειας πρόγνωση ατμοσφαιρικών προσομοιώσεων με το ΨΜΕ υψηλής ακρίβειας για την ακριβέστερη πρόγνωση των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών όπως της βροχόπτωσης και της παροχής του υδρογραφικού δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί οτι το συγκεκριμένο μοντέλο έχει εφαρμοστεί τόσο ερευνητικά όσο και επιχειρησιακά με αρκετή επιτυχία απο τους Varlas et al, 2018, Verri et al, 2017, Givati et al, 2016, Kunstmann et al, 2015, Senatore et al, 2015, Yucel et al, 2015 και πολλούς άλλους ερευνητές επιχειρησιακά και ερευνητικά.

Στη δεύτερη προσέγγιση, εφαρμόζεται ένα χωρικά κατανεμημένο μοντέλο εκτίμησης υδρογραφήματος στην έξοδο της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού. Πρόκειται για το μοντέλο εκτίμησης των ισόχρονων καμπυλών, περιοχών που παρουσιάζουν τον ίδιο χρόνο σουρροής στη διάρκεια του πλημμυρικού γεγονότος. Για την εφαρμογή του μοντέλου αυτού χρειάστηκε ΨΜΕ, χρήσεις γης και εφαρμόζοντας τους αλγόριθμους ροής του GIS υπολογίζεται

το ιστόγραμμα χρόνου-επιφάνειας για την κάθε ισόχρονη καμπύλη και η χωρική κατανομή της ταχύτητας του υδρογραφικού δικτύου. Το μοντέλο αυτό, είναι αρκετά εύχρηστο και έχει προταθεί αρχικά απο τους Maidment, 1992, Maidment et Olivera, 1996, Maidment and Olivera, 1999 και εφαρμοστεί μετέπειτα με παραλλαγές απο άλλους ερευνητές στον Ελλαδικό χώρο (Gioti et al, 2012, Karympalis et al, 2014) και ευρύτερα (Melesse and Grahm, 2004, Muzik, 1996).

Και οι δυο προσεγγίσεις παρουσιάζουν πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα στην εφαρμογή τους αλλά εκτιμούν παρόμοιες πλημμυρικές παροχές για την πλημμύρα στον Ίναχο και στον Σπερχειό ποταμό.

Αξίζει να σημειωθεί οτι και οι δυο προσεγγίσεις αξιοποιούν επίσης μετεωρολογικές προγνώσεις βροχής υψηλής ακρίβειας και την εκτίμηση της απορροής στη λεκάνη του Ίναχου ποταμού απουσία δεδομένων παρατήρησης βροχόπτωσης και παροχής.

Δεδομένων των παραπάνω, στόχος της παρούσας εργασίας αποτελεί η σύγκριση των δυο μεθόδων, των μειονεκτημάτων και πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν καθώς και των περιορισμών τους. Επίσης, στην παρούσα εργασία διερευνάται η χρήση τους στην πρόληψη και διαχείριση των πλημμυρών.

Ανασκόπηση στη βιβλιογραφία.

Ο Ελλαδικός χώρος χαρακτηρίζεται απο υψηλή πλημμυρική επικινδυνότητα και τα τελευταία χρόνια οι πλημμύρες έχουν απέβει αρκετά δραματικές μετρώντας εκτός απο ανυπολόγιστες υλικές καταστροφές και ανθρώπινες απώλειες όπως η πλημμύρα που συνέβη το Νοέμβριο του 2017 στην Αττική (μέτρησε πάνω απο 20 θύματα με ανυπολόγιστο κόστος ζημιάς) ή η πλημμύρα του Ευρώτα ποταμού στο νομό Λακωνίας το Σεπτέμβριο του 2016 (7 θανόντες).

Η ετοιμότητα και η λήψη των αποφάσεων στη διαχείριση των φυσικών καταστροφών στηρίζονται στη ανάπτυξη συστημάτων έγκαιρης πρόγνωσης (early warning) τα οποία στηρίζονται σε μοντέλα που αναπαριστούν τις διάφορες φυσικές διεργασίες σε διαφορετικές χωροχρονικές κλίμακες. Για την υδρολογική πρόγνωση χρησιμοποιούνται τα υδρολογικά μοντέλα τα οποία εκτιμούν τις μεταβλητές ενδιαφέροντος με διάφορους τρόπους.

Τα σύγχρονα υδρολογικά μοντέλα, αξιοποιούν δεδομένα που προέρχονται απο μετεωρολογικές προβλέψεις όπως τις ποσοτικές προγνώσεις βροχόπτωσης (QPF-Quantitative Precipitation Forecasts), δεδομένα βροχόπτωσης από δορυφόρους, απο ραντάρ και βροχομετρικούς σταθμούς. Η έγκαιρη και υψηλής ανάλυσης μετεωρολογική πρόγνωση αποτελεί καίριο βήμα για την έγκαιρη και ακριβέστερη πρόβλεψη των πλημμυρών (Hapuarachichi et al 2011, Cloke and Pappenberger, 2009). Για το λόγο αυτό τα μετεωρολογικά μοντέλα συνδέονται με υδρολογικά μοντέλα (coupling of hydrological/meteorological models) διοτι δεν μπορούν να εκτιμήσουν με ακρίβεια την πλημμυρική παροχή στην κλίμακα της υδρολογικής λεκάνης (της τάξεως των μέτρων) επειδή η ανάλυση στην οποία πραγματοποιούνται οι ατμοσφαιρικές προσομοιώσεις είναι μεγαλύτερη της ανάλυσης των υδρολογικών προσομοιώσεων (χρονική και χωρική)- και συνεπώς των υδρολογικών διεργασιών.

Η πρόγνωση της βροχόπτωσης μπορεί να επιτευχθεί μέχρι την τάξη του χιλιόμετρου ενω οι υδρολογικές διεργασίες στη διάρκεια μιας πλημμύρας συμβαίνουν σε μικρότερη κλίμακα της τάξεως μερικών μέτρων όπως η κατάκλυση των πλημμυρικών πεδίων (floodplain inundation). Πιο συγκεκριμένα, οι Givati et al, 2016 αναφέρουν οτι η υψηλής ακρίβειας μετεωρολογική πρόγνωση της βροχής είναι κρίσιμη για την έγκαιρη υδρολογική πρόγνωση ιδιαίτερα όταν ο χρόνος υστέρησης (lag time) μεταξύ της βροχόπτωσης και της παροχής αιχμής ενος πλημμυρικού γεγονότος είναι σύντομος (90 με 120min) δηλαδή η πλημμύρα εκδηλώνεται σε χρονικό διάστημα λίγων ώρων ύστερα απο τη βροχή (Givati et al, 2016).

Εντούτοις οι προγνώσεις της βροχής στις ατμοσφαιρικές προσομοιώσεις αποτελούν μια απο τις πιο δύσκολες προβλέψεις (Nielsen-Gammon et al, 2005). Επίσης, οι ατμοσφαιρικές προγνώσεις δεν μπορούν να λάβουν υπόψη τις γεωγραφικές ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής μελέτης. Οι Politi et al, 2018 εκτελώντας ατμοσφαιρικές πρσομοιώσεις με το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF (Weather Research Forecast Model) για τον Ελλαδικό χώρο διαπίστωσαν οτι σε σχέση με την εκτίμηση της μέγιστης /ελάχιστης θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας, οτι η βροχόπτωση (υετός σε mm) παρουσίαζε τα μεγαλύτερα σφάλματα εκτίμησης για τον Ελλαδικό χώρο. Επίσης, βρήκαν συγκεκριμένη ευαισθησία των ατμοσφαιρικών προσομοιώσεων με το WRF και βελτίωση των εκτιμήσεων βροχής χρησιμοποιώντας συγκεκριμένη παραμετροποίηση και σχήμα μικροφυσικής. Σφάλματα εκτιμήσεων σύμφωνα με τους Givati et al, 2016 και Fiori et al, 2014 στις προσομοιώσεις βροχής προέρχονται απο την ανάλυση των προσμοιώσεων και άλλες αβεβαιότητες (uncertainties) που σχετίζονται με τη μικροφυσική του σχήματος των ατμοσφαιρικών πρσομοιώσεων.

Σε ενοποιημένα σχήματα μοντελοποίησης, όπως τα υδρομετεωρολογικά μοντέλα οι αλληλεπιδράσεις μελετούνται μεταξύ της ατμόσφαιρας, του υδατικού ισοζυγίου (απορροή, κατακρημνίσματα, εξατμισιοδιαπνοή, ποσοστό νερού διήθησης στο έδαφος, υπόγειο νερό), της εξατμισιοδιαπνοής, της εδαφικής υγρασίας, του ενεργειακού ισοζυγίου μεταξύ κατώτερου στρώματος ατμόσφαιρας- ανώτερου εδαφικού στρώματος αλλά και μεταξύ άλλων διεργασιών αρκετά σημαντικών ώστε να τροποποιούν τον υδρολογικό κύκλο και τελικά την επιφανειακή απορροή.

Έχει αποδειχθεί ότι ο συνυπολογισμός αυτών των διεργασιών συνεισφέρει στην καλύτερη εκτίμηση των υδρολογικών διεργασιών και πιο συγκεκριμένα της ποτάμιας παροχής (Jasper et al, 2002, Senatore et al, 2015, Givati et al, 2016, Webhe et al, 2018). Για αυτό γίνεται λόγος για τη σύζευξη (coupling) ατμοσφαιρικών με υδρολογικά μοντέλα – υδρομετεωρολογική μοντελοποίηση η οποία μπορεί να προσφέρει περισσότερη φυσική πληροφορία και ακρίβεια αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τα υπόλοιπα υδρολογικά μοντέλα.

Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει τη σύζευξη διάφορων υδρολογικών ή και υδραυλικών μοντέλων με μετεωρολογικά, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη πρόβλεψη των πλημμυρών. Ουσιαστικά τα συζευγμένα μοντέλα ατμόσφαιρας-υδρόσφαιρας αποτελούν μια νέα γενιά εξελιγμένων υδρολογικών μοντέλων για τη βελτίωση της πρόγνωσης πλημμυρών (flood forecasts) και τη βελτίωση της αναπαράστασης των υδρομετεωρολογικών διεργασιών (hydrometeorological processes).

Το σύστημα ατμόσφαιρα- υδρόσφαιρα- χέρσου λαμβάνεται υπόψη σαν ένα εννιαίο σύστημα μοντελοποίησης στο οποίο λαμβάνουν χώρα διάφορες υδρομετεωρολογικές διεργασίες οι οποίες δεν μπορούν να εκτιμηθούν μόνο με μετεωρολογικές προγνώσεις, ή με κλιματικά μοντέλα είτε μόνο χρησιμοποιώντας εδαφικά/ υδρολογικά μοντέλα. Οι Chen and Dudhia, 2001 στη μελέτη τους, εξηγούν τους λόγους χρήσης των συζευγμένων μετεωρολογικών μοντέλων (hydrometeorological coupling/land atmosphere modelling) με υδρολογικά και εδαφικά μοντέλα (ενοποιημένα σχήματα μοντελοποίησης-coupled modelled systems) για τη βελτίωση της αναπαράστασης των χερσαίων-ατμοσφαιρικών διεργασιών (land atmosphere processes):

- για τη βελτίωση της εκτίμησης κατανομής της εδαφικής υγρασίας χωρικά και χρονικά-ύστερα απο μια έντονη βροχόπτωση και η αλληλεπίδραση της εδαφικής υγρασίας με τη βροχόπτωση αυτή. Επίσης άλλες σημαντικές διεργασίες του υδρολογικού κύκλου αποτελεί
- για την εκτίμηση διεργασιών όπως η τήξη χιονιού ειδικά σε υδρολογικές λεκάνες που τροφοδοτούνται απο νερό χιονόπτωσης (όπως οι αλπικές υδρολογικές λεκάνες στην Ευρώπη) αποτέλεσε έναν από τους κύριους λόγους για τους οποίους αναπτύχθηκαν τα συζευγμένα μοντέλα ατμόσφαιρας- εδάφους.

Οι Betts et al, 2004 παρατήρησαν στη μελέτη τους 'Understanding hydrometeorology with global models' βελτίωση των εποχικών προγνώσεων (seasonal forecasts) της μέγιστης βροχόπτωσης (maximum precipitation) που παρατηρήθηκε τον Ιούλιο του 1994 σε μια καταστροφική πλημμύρα στον ποταμό Μισσισίπη με την αλλαγή της αρχικής κατάστασης του ποσοστού υγρασίας (soil moisture content) στο υπομοντέλο εδάφους συμπεραίνοντας τη σημαντική βελετίωση του αποτελέσματος της πρόγνωσης της βροχόπτωσης και την ευαισθησία του μοντέλου πρόγνωσης στην εδαφική υγρασία (model senisitivity to initial soil moisture).

Οι Jasper et al, 2002 στην προσπάθειά τους να εκτιμήσουν την πλημμυρική παροχή μιας καταστροφικής πλημμύρας στις Νότιες Άλπεις συνδύασαν ένα κατανεμημένο (distributed) υδρολογικό μοντέλο WaSIM-ETH για την προσομοίωση της πλημμύρας χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου α) παρατηρούμενη βροχόπτωση (observed precipitation) β) προγνωστική βροχόπτωση πέντε διαφορετικών μετεωρολογικών μοντέλων με διαφορετικές κλίμακες ανάλυσης απο 2 εως και 14km. Η απόδοση των προγνώσεων δεν ήταν καλή σε σχέση με την παρατηρούμενη βροχόπτωση- επισημαίνοντας την ανάγκη βελτίωσης υδρομετεωρολογικών συστημάτων πρόγνωσης σε ορεινές περιοχές.

Οι Givati et al, 2012 χρησιμοποίησαν ενα υδρολογικό-καρστικό μοντέλο και προγνώσεις βροχόπτωσης υψηλής ανάλυσης απο το μετεωρολογικό μοντέλο WRF (Weather Research Forecast Model) για την εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής σε μια υδρολογική λεκάνη στο Ιστραήλ με μετεωρολογικές προγνώσεις κυμαινόμενης ανάλυσης. Οι προγνώσεις βροχής υψηλότερης ανάλυσης και ακρίβειας (1.3km και 4km) πέτυχαν καλύτερη απόδοση στην εκτίμηση του υδρογραφήματος συγκρινόμενες με τις προσομοιώσεις που χρησιμοποίησαν ως δεδομένο την παρατηρούμενη χρονοσειρά βροχόπτωσης.

Οι Kunstmann et al, 2015 πέτυχαν παρόμοια αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τις υδορμετεωρολογικές προγνώσεις WRF-hydro οταν προσομοίωσαν πλημμυρικά φαινόμενα στη Γερμανία και την Αφρική συμπεραίνοντας οτι οι υδρομετεωρολογικές προγνώσεις (συνελεστής NSE 0.49 και 0.40 αντίστοιχα για τις δυο περιοχές).

Οι Webhe et al, 2018 σύγκριναν τα αποτελέσματα προσομοίωσης μιας στιγμιαίας πλημμύρας στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα και διαπίστωσαν μεγαλύτερη ακρίβεια στην εκτίμηση της συνολικής βροχόπτωσης σε σχέση με τις παρατηρούμενες τιμές χρησιμοποιώντας το υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro. Πέτυχαν με τη μελέτη τους αρκετά καλή προσομοίωση της συνολικής παρατηρούμενης βροχόπτωσης (συντελεστής Pearson 0.82 για το υδρομετεωρολογικό μοντέλο και 0.76 για τη μετεωρολογική εκτίμηση της βροχής αντίστοιχα).

Η βροχόπτωση και η απορροή σε μια υδρολογική λεκάνη παρουσιάζουν σημαντική χωρική και χρονική διαφοροποίηση. Επομένως τείθεται ακόμα πιο δύσκολο το έργο των επιστημόνων για την πρόβλεψη των μεταβλητών αυτών στη διάρκεια μιας πλημμύρας. Μια ακόμα εξελιγμένη μορφή υδρολογικών προσομοιώσεων η οποία εμφανίστηκε στις αρχές περίπου της δεκαετίας 1990 αξιοποιεί τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και τις εφαρμογές Τηλεπισκόπησης δυο μέθοδοι που βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση και πρόβλεψη της χωροχρονικής διαφοροποίησης της σχέσης βροχής- απορροής.

Μια βασική παράμετρος που επηρρεάζει την υδρολογική συμπεριφορά των λεκάνων αποτελεί η φυτοκάλυψη και ο βαθμός αστικοποίησης δηλαδή οι χρήσεις γης (land use). Οι χρήσεις γης έχουν τροποποιηθεί τα τελευταία χρόνια αρκετά για διάφορες οικονομικές δραστηριότητες όπως τη γεωργία, κτηνοτροφία, ανάπτυξη βιομηχανικής δραστηριότητας και παραγωγή ενέργειας. Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών αξιοποιούν την ιδότητά τους να συνδυάζουν διαφορετικά θεματικά επίπεδα και να χαρτογραφούν τη χωρική διαφοροποίηση (spatial analysis) των χρήσεων γης με αρκετά καλή ακρίβεια της τάξεως μερικών μέτρων. Οι χρήσεις γης αποτελούν ένα απο τα δεδομένα εισόδου των υδρολογικών (ή υδρομετεωρολογικών

προσομοιώσεων) για την εκτίμηση την υδρογραφημάτων και συνεπώς η ακριβής αναπαράστασή της καθίσταται αναγκαία για τις υδρολογικές προσομοιώσεις.

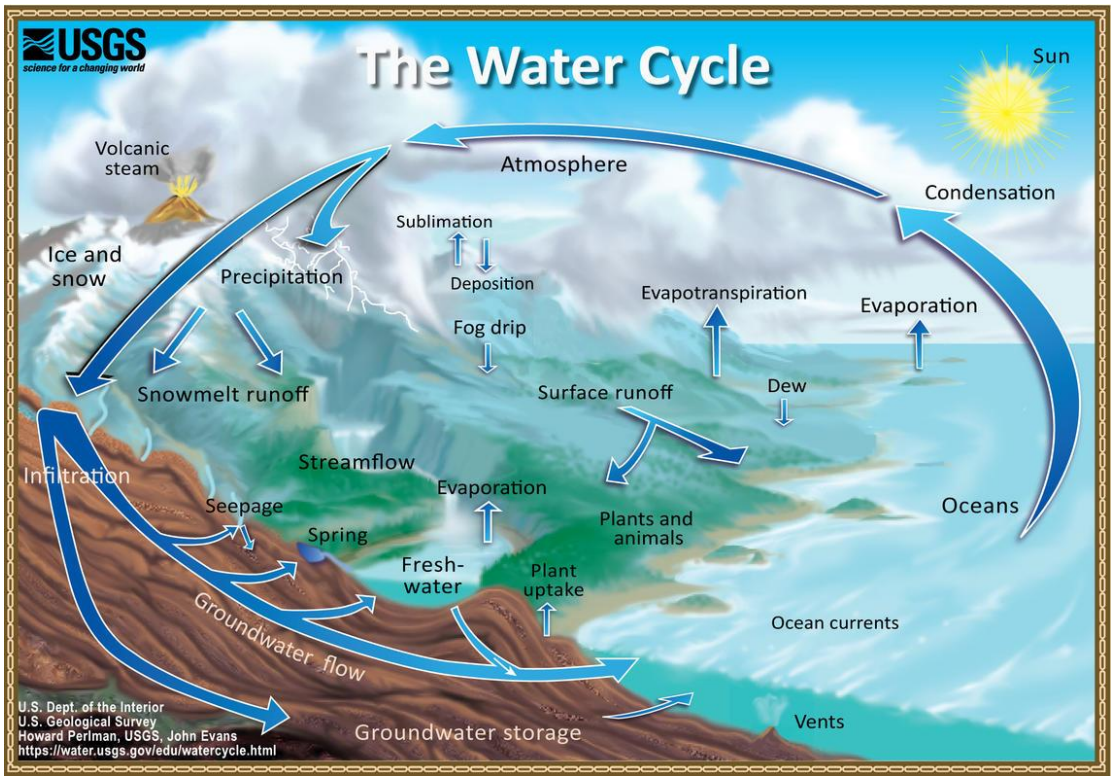
Ένα υδρολογικό μοντέλο που αξιοποιεί τα Συστήματα Γεωγραφικής Πληροφορίας αποτελεί αυτό που προτάθηκε απο τους Maidment, 1993 και Maidmnent and Olivera, 1996. Πρόκειται για ενα χωρικά κατανεμημένο μοντέλο ανεπτυγμένο σε περιβάλλον GIS που συνδυάζει διάφορα θεματικά επίπεδα (layers) τη γεωμορφολογία (Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους), τις χρήσεις γης, την κλίση του εδάφους, το συντελεστή τραχύτητας εδάφους Manning και σενάρια βροχόπτωσης (παρατηρούμενης ή μοντελοποιημένης) το οποίο υπολογίζει το πλημμυρικό υδρογράφημα στο σημείο εξόδου της υδρολογικής λεκάνης βασισμένο στη μέθοδο time-area (χρόνου επιφάνειας) ανά υδρολογική ισόχρονη ζώνη απορροής (isochrone). Το μοντέλο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί απο αρκετούς ερευνητές μετέπειτα με διάφορες παραλλαγές για την προσέγγιση της πλημμυρικής παροχής συνδυάζοντας τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών με παρόμοιο τρόπο βασισμένοι στον υπολογισμό του χρόνου συρροής και στη μέθοδο της επιφάνειας χρόνου (Maidment and Olivera, 1999, Χριστοφίδης, 2008, Καββαδά, 2012, Καλογερόπουλος et al, 2012, Καρύμπαλης et al, 2014, Πέντερης, 2017).

Οι Ajward and Muzik, 2000 εφάρμοσαν ενα παρόμοιο μοντέλο με GIS για την εκτίμηση ενος πλημμυρογραφήματος στην υδρολογική λεκάνη Waiparous Creek στην Alberta περιοχή του Καναδά. Εφάρμοσαν τεχνική εκτίμησης της διόδευσης της απορροής στην έξοδο της υδρολογικής λεκάνης λαμβάνοντας υπόψη στον υπολογισμό της ταχύτητας απορροής για το κάθε κελί με τη βοήθεια ενός συστήματος GIS τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του κάθε κελιού και του υδρογραφικού δικτύου που σχεδιάστηκς με τη βοήθεια του GIS και ενός παλαιότερου λογισμικού για την επεξεργασία raster IDRISI. Στην περίπτωση του χρόνου συρροής και του χρόνου απορροής εφαρμόστηκε το κινηματικό κύμα διάχυσης ενώ το ποσοστό της βροχής για το κάθε κελί του καννάβου (grid cell) υπολογίστηκε ανάλογα με την καμπύλη απορροής CN (Curve Number) (Chow et al, 1988).

Τα συζευγμένα μοντέλα ατμόσφαιρας-εδάφους μαζί με τα χωρικά κατανεμημένα μοντέλα αποτελούν εξέλιξη των υδρολογικών προσομοιώσεων και συγκεταλέγονται στις σύγχρονες τάσεις της υδρολογικής μοντελοποίησης σε σύγκριση με τις αρχικές προσπάθειες των

υδρολόγων να εκτιμήσουν την απορροή των υδρολογικών λεκανών (όπως το μοναδιαίο υδρογράφημα απο τον Sherman, 1932).

1. Υδρολογία.



Σχήμα 1 Ο υδρολογικός κύκλος (πηγή εικόνας: www.usgs.gov).

Η ποσοτικοποίηση των φυσικών διεργασιών απασχόλησε τους επιστήμονες αιώνες πριν θέλοντας να δώσουν λογικές εξηγήσεις για τα φυσικά φαινόμενα που συνέβαιναν γύρω τους. Η Υδρολογία (Hydrology) είναι μια πολύπλοκη επιστήμη που συνδύαζει πολλές άλλες μαζί όπως τη Μετεωρολογία, την Κλιματολογία, την Πεδολογία, Στατιστική, την Οικολογία, τη Γεωλογία, την Υδραυλική κ.ά.

Οι υδρολογικές διεργασίες και ποσοτικοποιήσή τους ενδιαφέρουν μηχανικούς και επιστήμονες – οι μηχανικοί εφαρμόζουν μαθηματικούς υπολογισμούς για την κατασκευή και συντήρηση τεχνικών κυρίως έργων (π.χ υπολογισμός υδατικού ισοζυγίου σε ταμιευτήρες) ενώ οι επιστήμονες εφαρμόζουν θεωρητικές/ στοχαστικές προσεγγίσεις για την εκτίμηση των μεταβλητών του υδρολογικού κύκλου όπως την αβεβαιότητα λόγω σφαλμάτων στις εκτιμήσεις των μοντέλων.

Η γη συμπεριφέρεται ως ένα εννιαίο σύστημα φυσικών διεργασιών που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και η αλληλεπίδραση αυτή είναι που ενδιαφέρει κυρίως την επιστημονική κοινότητα. Το κάθε σύστημα στις γεωεπιστήμες εξετάζεται είτε συνδυαστικά (π.χ οι αλληλεπιδράσεις

ατμόσφαιρας- υδρόσφαιρας-λιθόσφαιρας) είτε μεμονωμένα όπως στην περίπτωση του υδρολογικού κύκλου (Καλογερόπουλος, 2011).

Η επιστήμη της υδρολογίας περιλαμβάνει τη μελέτη σε ένα ευρύ φάσμα διεργασιών απο την ατμόσφαιρα (15km) μέχρι και τη λιθόσφαιρα (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006). Το υδρολογικό ισοζύγιο ενδιαφέρει κυρίως τους υδρολόγους και η εκτίμηση των μεταβλητών του όπως τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, το ποσοστό νερού διήθησης στο έδαφος, το ποσοστό νερού που απορρέει επιφανειακά αλλά και οι επιδράσεις του ανθρώπου στον υδρολογικό κύκλο (για παράδειγμα για τις διάφορες χρήσης του νερού).

Η Υδρομετεωρολογία συνδυάζει την Υδρολογία και τη Μετεωρολογία – έχει ως στόχο τη μελέτη φυσικών διεργασιών όπως την εξάτμιση του νερού, τη διαπνοή, την εκτίμηση του ενεργειακού ισοζύγιου της ατμόσφαιρας-εδάφους, την αλληλεπίδραση του εδάφους με τον υδρολογικό κύκλο και την ατμόσφαιρα (για παράδειγμα η επίδραση της εδαφικής υγρασίας στην ατμόσφαιρα), τη μελέτη δηλαδή των υδρομετεωρολογικών διεργασιών.

Η δημιουργία της απορροής στις υδρολογικές λεκάνες οφείλεται σε διάφορους μηχανισμούς οι οποίοι περιγράφηκαν απο τους Horton, 1931 και τους Hewlett, 1961 και Hewlett et al, 1977. Ακολουθούν και άλλοι υδρολόγοι οι οποίοι στη δεκαετία του 1990 αχολήθηκαν με τους μηχανισμούς γένεσης της απορροής όπως οι Dingman, 1994 και Ambroise, 1999 με το άρθρο του : 'La genese des debits dans un basin versant- Η γένεση της παροχής υδατορέματος σε μια υδρολογική λεκάνη'. Ο Ambroise, 1999 ειδικότερα, εξηγεί πώς αλλάζει ο υδρολογικός κύκλος σε μια υδρολογική λεκάνη ανάλογα με την αρχική κατάσταση του εδάφους και πώς αυτή μπορεί να αλλάξει το μηχανισμό δημιουργίας της επιφανειακής απορροής στη διάρκεια μιας πλημμύρας, αλλάζοντας τη συνεισφορά των υδρολογικών διεργασιών στη τελική επιφανειακή απορροή (streamflow).

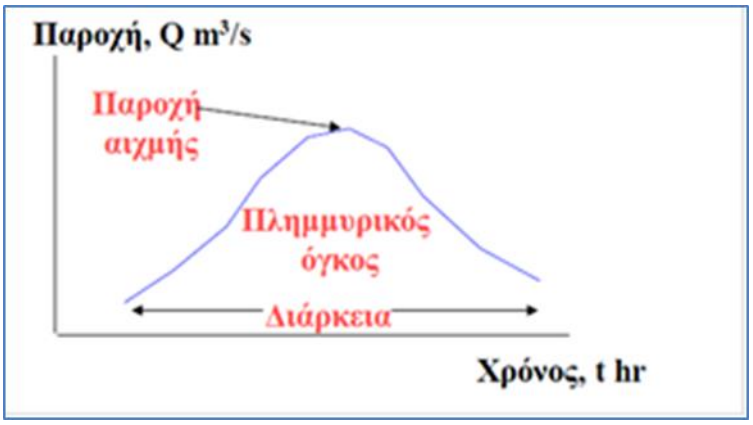
Σε ένα πλημμυρικό γεγονός ενδιαφέρουν οι πλημμυρικές απορροές δηλάδή η επιφανειακή απορροή που δημιουργείται στη διάρκεια της πλημμύρας (Λαμπράκης & Νικολόπουλος, 2015, Κουτσογιάννης, 1999). Στη δημιουργία της επιφανειακής απορροής συμβάλλουν η επίγεια ροή (overland flow), η υποδερμική ροή (subsurface flow) και η υπόγεια ροή (groundflow). Επίγεια (overland flow) ορίζεται η ροή που κινείται σε δυο διαστάσεις, οφείλεται στην έντονη βροχόπτωση και εξαρτάται από τις ιδιότητες της επιφάνειας την οποία συναντά στη διαδρομή της όπως τη γεωλογία, τη τραχύτητα του εδάφους, τη μορφολογική κλίση του εδάφους, τη χημική σύσταση του εδάφους (Κουτσογιάννης, 1999, Λαμπράκης, 2015).

Ως υποδερμική ροή (subsurface flow) ορίζεται η πλευρική ροή στο υπέδαφος, στις ρίζες των φυτών και την κίνηση του νερού σε συνθήκες ακόρεστης ζώνης ή και στα ανώτερα στρώματα της κορεσμένης ζώνης. Η κίνηση της υποδερμικής ροής εξαρτάται από τις υδραυλικές και γεωμετρικές ιδιότητες (υδατοπερατότητα, υδραυλική αγωγιμότητα, πάχος υδροφόρων σχηματισμών) και γενικότερα στην ανομοιογένεια και ανισοτροπία του εδάφους. Θεωρείται πιο αργή στην απόκρισή της και στην κίνησή της σε σχέση με την επιφανειακή ροή και σε περιόδους έντονων βροχοπτώσεων μπορεί να συμβάλλει ουσιαστικά στην επιφανειακή ροή (Κουτσογιάννης, 1999).

Η εκτίμηση των υδρολογικών απωλειών στον υδρολογικό κύκλο είναι εξίσου σημαντική δηλαδή η ποσότητα νερού που ισούται με τη διαφορά των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων – απορροής (Μάρης, Σημειώσεις Τεχνικής Υδρολογίας). Στην περίπτωση αυτή ενδιαφέρουν υδρολογικές διεργσίες όπως η διήθηση του νερού στο έδαφος, το νερό παρεμπόδισης απο χλωρίδα, το νερό διάπτωσης που συνιστά το νερό που διαφεύγει απο το φύλλωμα και την κορμοροή (μέσω του ριζικού συστήματος των δένδρων), την απώλεια της παρεμπόδισης λόγω της βλάστησης και το νερό της εξατμισης-διαπνοής.

Τα κύρια χαρακτηριστικά μεγέθη μιας πλημμύρας είναι τα εξής:

- η πλημμυρική παροχή σε μονάδες μέτρησης m^3/sec.
- πλημμυρικός όγκος σε m^3.
- η χρονική διάρκεια της πλημμύρας όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα



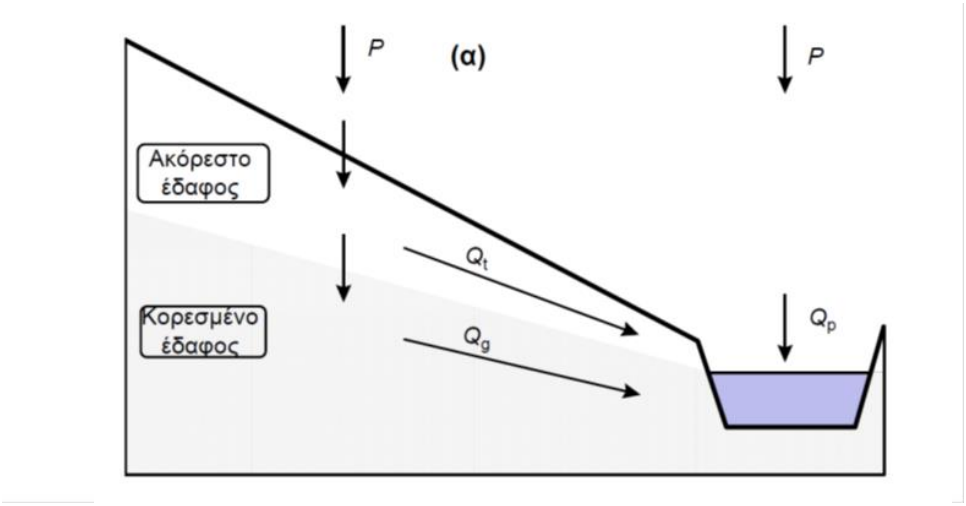
Σχήμα 2: Τα κύρια μεγέθη ενος υδρογραφήματος πλημμύρας (flood hydrograph) απο Μαμάσης, 2009.

Η χωρική και χρονική εξέλιξη μιας πλημμύρας και τα χαρακτηριστικά της, εξαρτώνται από τους εξής παράγοντες (Κουτσογιάννης, 1999, Singh, 1997, Λαμπράκης, 2015):

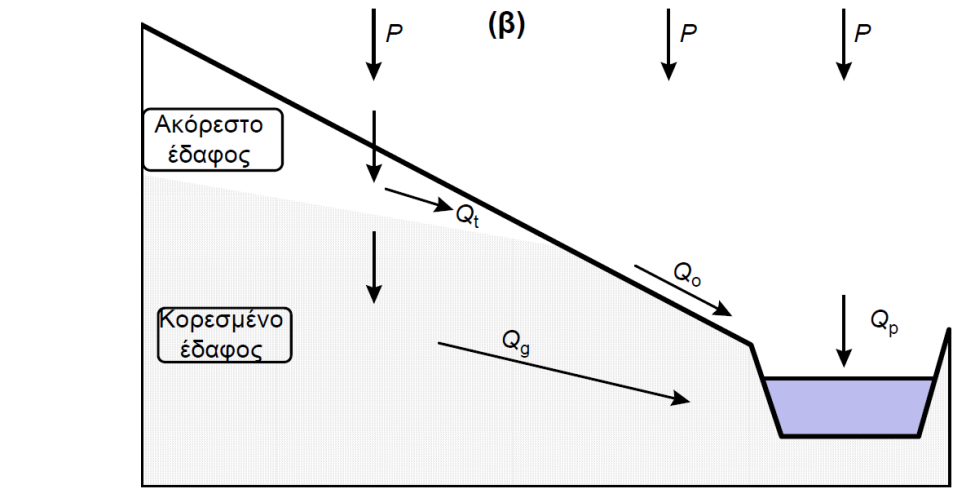
- τη χωρική και χρονική εξέλιξη της βροχής
- τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της υδρολογικής λεκάνης απορροής
- τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου

Όταν η ένταση της βροχόπτωσης ξεπεράσει τη διηθητική ικανότητα του εδάφους τότε το έδαφος κατακλύζεται με νερό (saturation excess overland flow from above). Το νερό που διηθείται μέσα στο έδαφος τροφοδοτώντας τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, εκφορτίζεται στην επιφάνεια με αργότερο ρυθμό μέσω της υπόγειας ή υποδερμική κίνησης του νερού σε σχέση με το νερό της επιφανειακής απορροής.

α.



β.



Σχήματα 3α και 3β: Μηχανισμοί δημιουργίας επιφανειακής απορροής και υπεδάφιας απορροής στην περίπτωση του αρχικού σταδίου της ροής απο βροχή (α) και στην περίπτωση του προχωρημένου σταδίου (β) στην οποία η στάθμη των υδροφόρων εκφορτίζεται στην κοίτη του υδατορέματος (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Στο δεύτερο μηχανισμό γένεσης της επιφανειακής απορροής ,ο οποίος αναλύθηκε από τον Hewlett, 1961 (American Forest Hydrology Service)τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα διηθούνται στο έδαφος και ένα μέρος τους κινείται στην ακόρεστη ζώνη ενώ το υπόλοιπο μέρος τους διηθείται βαθύτερα τροφοδοτώντας τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Στη διάρκεια ενός πλημμυρικού επεισοδίου με τη συνεχόμενη βροχόπτωση η στάθμη της ροής στην ακόρεστη και κορεσμένη ζώνη εδάφους αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου με αποτέλεσμα και οι δυο υδροφόροι (φρεάτιος και υπόγειος) να εκφορτίζουν στην επιφάνεια. Με αυτό το μηχανισμό οι υδροφόροι ορίζοντες συμβάλλουν στον εμπλουτισμό και στη τροφοδότηση των επιφανειακών νερών (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).



Σχήμα 4: Αναπαράσταση των κύριων υδρολογικών διεργασίων στη διάρκεια μιας πλημμύρας (Κουτσογιάννης, 1999).

Τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της υδρολογικής λεκάνης αποτελούνται από τα μορφολογικά, εδαφολογικά χαρακτηριστικά και τις χρήσεις γης. Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά μιας υδρολογικής λεκάνης επηρεάζουν κυρίως το χρόνο της συγκέντρωσης και το συντελεστή απορροής (Κουτσογιάννης, 1999, Μαμάσης, 2009). Λεκάνες με ήπιες κλίσεις χαρακτηρίζονται από μεγάλους χρόνους συγκέντρωσης αλλά μικρούς συντελεστές απορροής. Το αντίθετο συμβαίνει για τις λεκάνες με απότομες κλίσεις . Η μορφή επίσης του υδρογραφικού δικτύου και το εμβαδόν της λεκάνης απορροής επιδρούν στην υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών (Κουτσογιάννης, 1999, Μαμάσης, 2009).

Οι χρήσεις γης και ειδικότερα η φυτοκάλυψη μπορούν να επηρεάσουν με πολλαπλούς τρόπους την απορροή. Η παρεμπόδιση και η κατακράτηση του νερού των βροχοπτώσεων μπορεί να μεγαλώσει το χρόνο με τον οποίο εκδηλώνεται η πλημμυρική παροχή αλλά και να μειώσει τον πλημμυρικό όγκο (συγκρατώντας νερό) συνεπώς να μειώσει την πλημμυρική παροχή. Αστικοποιημένες λεκάνες παρουσιάζουν μεγαλύτερη απορροή, μειωμένο χρόνο συγκέντρωσης και αυξημένη πλημμυρική παροχή(Λέκκας, 2006).

Υδρογράφημα πλημμύρας

Το υδρογράφημα ουσιαστικά αποτελεί μια ποσοτικοποιημένη αναπαράσταση των χαρακτηριστικών του υδατορέματος (της κοίτης) και της υδρολογικής λεκάνης στη διάρκεια ενός πλημμυρικού επεισοδίου και αποτελεί κύριο χαρακτηριστικό μιας υδρολογικής λεκάνηςκαι προκύπτει εαν αναπαρασταθούν οι μετρήσεις της παροχής σε ένα ορθογώνιο σύστημα αξόνων (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006). Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός υδρογραφήματος συνιστούν στα εξής (Κουτσογιάννης, 1999):

- ο χρόνος συγκέντρωσης (ή ο χρόνος συρροής)
- η πλημμυρική παροχή ή η παροχή αιχμής (peak flow)ο χρόνος ανόδου της καμπύλης του υδρογραφήματος (rising limb)
- ο κατερχόμενος κλάδος του υδρογραφήματος (falling limb- hydrograph recession)ο χρόνος υστέρησης της παροχής αιχμής (lag time)
- η χρονική διάρκεια μιας πλημμύρας (duration)

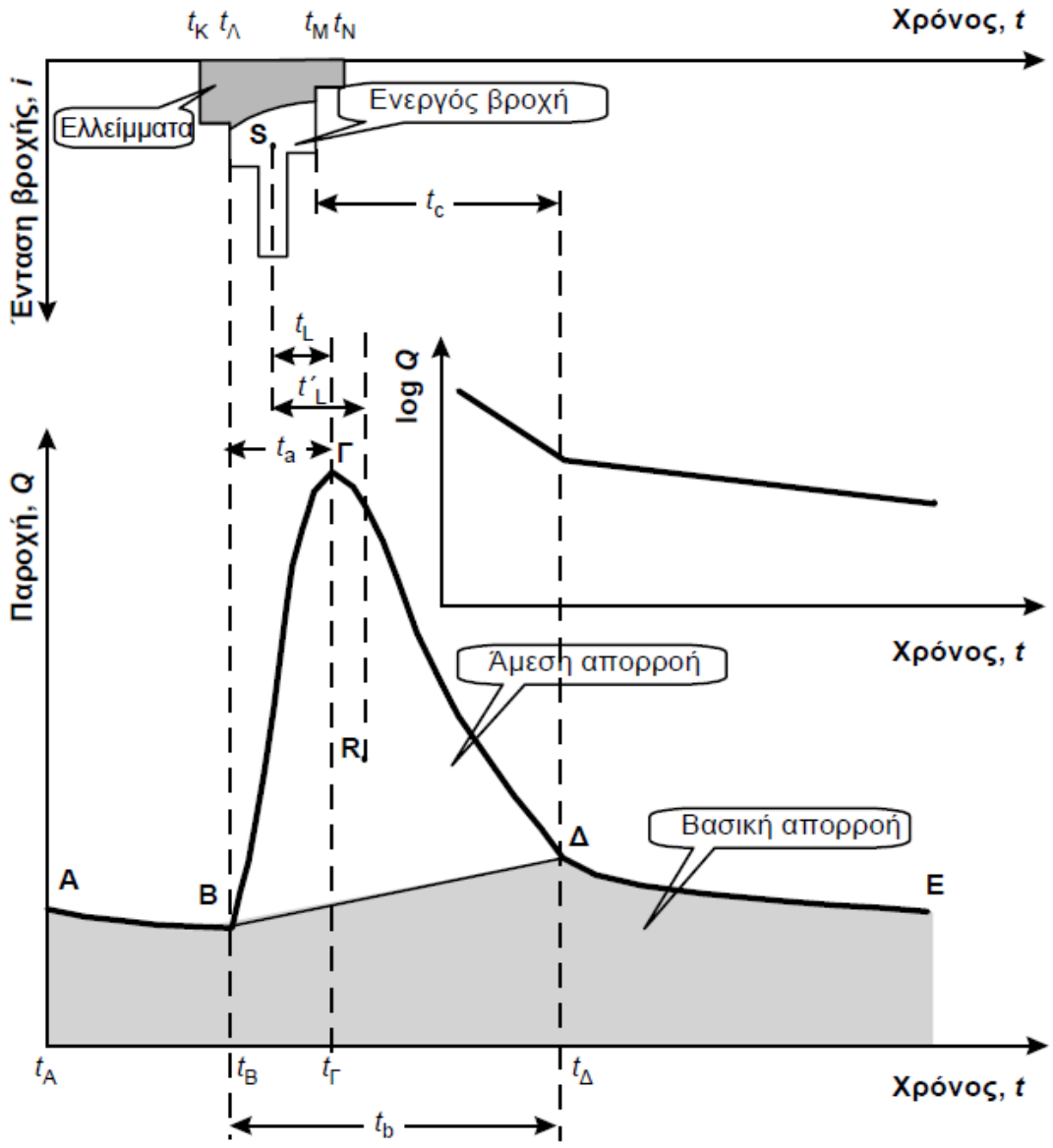
Ο χρόνος συγκέντρωσης (ή ο χρόνος συρροής) αποτελεί μια χαρακτηριστική ιδιότητα κάθε υδρολογικής λεκάνης και ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται, θεωρητικά, για να φθάσει το νερό που συμβάλλει στην άμεση απορροή, από το υδραυλικά πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης στη διατομή του σημείου εξόδου. Ο χρόνος συρροής αποτελεί μια βασική ιδιότητα που χρησιμοποιείται και στη μέθοδο του χρόνου-επιφάνειας που θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα.

Μια επίσης πολύ σημαντική ιδιότητα και της υδρολογικής λεκάνης και του πλημμυρικού επεισοδίου αποτελεί ο χρόνος υστέρησης της παροχής αιχμής που ορίζεται ως τη διαφορά μεταξύ του χρόνου που εκδηλώνεται η αιχμή της ενεργού βροχόπτωσης με το χρόνο που εκδηλώνεται η πλημμυρική παροχή αιχμής. Είναι εύκολα αντιληπτό, ότι η χρονική υστέρηση (lag time) εξαρτάται από το χρόνο της ανόδου του υδρογραφήματος. Σε αστικές λεκάνες ο χρόνος ανόδου της υδρογραφικής καμπύλης είναι μικρότερος σε μέγεθος άρα η πλημμυρική παροχή επέρχεται με γρηγορότερο ρυθμό σε σχέση με μια φυσική λεκάνη.

Στο σχήμα 5 διακρίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά ενός υδρογραφήματος: το μήκος της υδρογραφικής καμπύλης ΒΓ (rising limb) είναι ο ανερχόμενος κλάδος του υδρογραφήματος ενώ το μήκος ΓΔ αποτελεί τον κατερχόμενο κλάδο του υδρογραφήματος (recession curve/ falling limb). Η καμπύλη ΑΒ αποτελεί τη βασική ροή του ποταμού πριν την έναρξη της πλημμύρας. Στο συγκεκριμένο σχήμα απο τον Κουτσογιάννη, 1999 όταν $t_{\Lambda}=t_B$ είναι το σημείο έναρξης της ενεργού βροχόπτωσης η οποία λήγει στο σημείο t_M . Η ενεργός βροχή στο σχήμα έχει ως αποτέλεσμα την απότομη άνοδο της καμπύλης της παροχής Q(t) της απορροής εως το σημείο Γ που αποτελεί το σημείο αιχμής της καμπύλης (παροχή αιχμής της πλημμύρας) και αποτελεί μια σημαντική ένδειξη της έντασης του πλημμυρικού φαινομένου στην υδρολογική λεκάνη. Συνεπώς, t_{Γ}-t_B είναι ο χρόνος ανόδου της υδρογραφικής λεκάνης ενώ το χρονικό διάστημα t_l αποτελεί το χρόνο υστέρησης του υδρογραφήματος πλημμύρας (lag time) και συνιστά το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ του κέντρου βάρους της ενεργού βροχής S και της

μέγιστης παροχής αιχμής Γ που εκδηλώνεται στη διάρκεια του πλημμυρικού γεγονότος (Κουτσογιάννης 1999).

Το χρονικό διάστημα t_c αποτελεί το χρόνο συρροής ή συγκέντρωσης της υδρογραφικής καμπύλης και αποτελεί ενα απο τα σημαντικότερα ζητούμενα στη διάρκεια της πλημμύρας. Ο χρόνος συρροής ή συγκέντρωσης αποτελεί το χρόνο που χρειάζεται το πιο απομακρυσμένο σημείο της υδρολογικής λεκάνης να διανύσει την έκτασή της ύστερα απο την εκδήλωση της βροχής μέχρι το σημείο εξόδου της υδρολογικής λεκάνης.



Σχήμα 5: Διάγραμμα ενός απλού πλημμυρικού υδρογραφήματος με το αντίστοιχο υετογράφημα και τα χαρακτηριστικά χρονικά μεγέθη (πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Υδρολογικά μοντέλα

Τα υδρολογικά μοντέλα αναφέρονται σε ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που ενδιαφέρουν σε εφαρμογές πράξης (Μαμάσης, 2009).

Τα κριτήρια διαχωρισμού των υδρολογικών μοντέλων είναι τα εξής:

- η χρονική τους κλίμακα
- η χωρική τους κλίμακα
- το πεδίο εφαρμογής τους

η μαθηματική τους δομή Ανάλογα με τη χρονική τους κλίμακα τα μοντέλα διακρίνονται στα εξής (Ευστρατιάδης, 2008, Καλογερόπουλος, 2011):

- συνεχή υδρολογικά μοντέλα (continuous) όπου προσομοιώνεται σε μια πεπερασμένη χωρική ενότητα η διαχρονική εξέλιξη του υδρολογικού ισοζυγίου.
- μεμονωμένα υδρολογικά μοντέλα (event type): όπου προσομοιώνεται ένα μεμονωμένο υδρολογικό γεγονός.

Η χωρική διακριτότητα στηρίζεται στη διαφορετική κατανομή των υπολογισμών των μεταβλητών στο πεδίο της μοντελοποίησης. Η χωρική κατηγοριοποίηση των μοντέλων είναι η εξής (Ευστρατιάδης, 2008, Καλογερόπουλος, 2011, Πέντερης, 2017):

- υδρολογικό μοντέλο με αδιαμέριστη κλίμακα (lumped model): οι χρονοσειρές φόρτισης (βροχόπτωσης) ολοκληρώνονται σε όλη την έκταση της λεκάνης στην οποία οι παράμετροι ρυθμίζονται για το σύνολο της έκτασής της (Μαμάσης, 2009).
- με ημικατανεμημένη κλίμακα (semi- distributed), η λεκάνη χωρίζεται σε διακριτές περιοχές οι οποίες αντιστοιχούν είτε σε περιοχές με όμοια γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά αλλά σε καθεμία λεκάνη αντιστοιχεί διαφορετική χρονοσειρά φόρτισης και διαφορετική παραμετροποίηση. Στο τέλος των ξεχωριστών προσομοιώσεων για την κάθε περιοχή το σύνολο των υπολογισμών –η απορροή- μεταφέρεται στην έξοδο της υδρολογικής λεκάνης.

- με κατανεμημένη χωρική κλίμακα (distributed models) στην οποία γίνεται κατάτμηση της υδρολογικής λεκάνης σε τμήματα (κύτταρα), στα οποία αντιστοιχεί διαφορετική χρονοσειρά φόρτισης (κατακρημνισμάτων) και διαφορετικές τιμές παραμέτρων.

Ανάλογα με τη δομή τους το υδρολογικά μοντέλα διακρίνονται σε:

- Τα μοντέλα φυσικής βάσης (physically-based models) είναι κατανεμημένα εξ' ορισμού και προσομοιώνουν τις υδρολογικές διεργασίες σε μικρή κλίμακα, βασιζόμενα σε φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού στην κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη καθώς και σε εμπειρικές σχέσεις. Συνήθως η χωρική κλίμακα των μοντέλων αυτών είναι πολύ μικρή. Ένα σημαντικό τους μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός οτι λόγω της ετερογένειας των φυσικών διεργασιών ακόμα και σε μικρού μεγέθους υδρολογικές λεκάνες , χρειάζεται μεγάλος αριθμός δεδομένων και παρατηρήσεων (Μαμάσης, 2009).
- Τα εννοιολογικά μοντέλα (lumped models) δε διατυπώνουν φυσικούς νόμους όπως τα μοντέλα φυσικής βάσης, αλλά παραμετρικές σχέσεις τις διάφορες υδρολογικές διεργασίες σε μια σχηματοποιημένη χωρική ενότητα. Μια συνηθισμένη δομή εννοιολογικού μοντέλου αποτελεί η σύνδεση υποθετικών δεξαμενών νερού που συνδέονται μεταξύ τους με κάποιες μαθηματικές και εμπειρικές σχέσεις. Σε σχέση με την πολυπλοκότητα των μοντέλων φυσικής βάσης, τα οποία προσπαθούν να μοντελοποιήσουν τις φυσικές διεργασίες στηριζόμενα στους φυσικούς νόμους, τα εννοιολογικά μοντέλα είναι πιο απλά στη δομή τους και επιτρέπουν την προσομοίωση και εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών με μικρότερο αριθμό παραμέτρων (Μαμάσης, 2009, Καλογερόπουλος, 2011).
- Μια άλλη κατηγορία υδρολογικών μοντέλων αποτελούν τα στοχαστικά μοντέλα (stochastic models) τα οποία βασίζονται στην πιθανοτική προσέγγιση των υδρολογικών διεργασιών οι οποίες αντιμετωπίζονται ως τυχαίες μεταβλητές (Ευστρατιάδης, 2008, Μαμάσης, 2009). Τα στοχαστικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τη στοχαστική δομή των φαινομένων και η παραμετροποίησή τους στηρίζεται περισσότερο στα στατιστικά χαρακτηριστικά των μετρούμενων παρατηρήσεων.

.

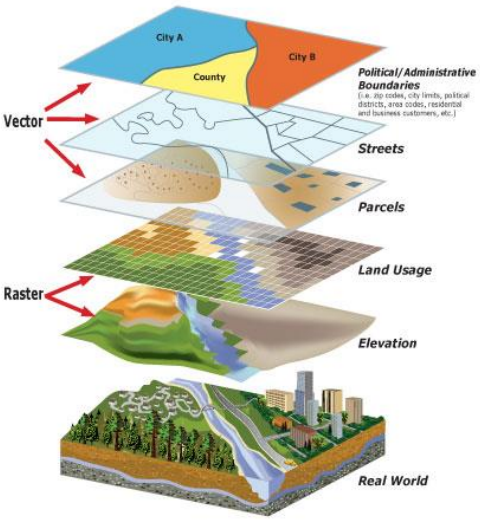
Υδρολογική μοντελοποίηση με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικής Πληροφορίας (GIS).

Τα GIS έχουν ως σκοπό την αξιοποίηση της γεωγραφικής πληροφορίας δεδομένων στο χώρο και συνιστούν ένα λογισμικό το οποίο επεξεργάζεται και απεικονίζει συνήθως με τη μορφή χαρτών την πληροφορία αυτή. Η βάση τους στηρίζεται στην επιστήμη της Γεωγραφίας και προσφέρουν τη δυνατότητα αξιοποίησης δεδομένων απο διάφορες πηγές. Αποτελεί ένα πολύ δυνατό σύμμαχο στις γεωεπιστήμες εφόσον παρέχει τη δυνατότητα αξιοποίησης πολυθεματικών επιπέδων πληροφορίας συνδυάζοντας χωρικά δεδομένα διαφόρων πηγών και συμβάλλοντας έτσι καθοριστικά στη διαχείριση φυσικών πόρων, στη μελέτη φυσικών φαινομένων, στη διαχείριση των φυσικών καταστροφών, στη χωρική ανάλυση, στην εκτίμηση των φυσικών κινδύνων και σε πολλούς άλλους τομείς των Γεωεπιστημών και όχι μόνο. Έχουν ως βασικό στόχο τη χωρική ανάλυση (spatial location) οργανώνοντας και δημιουργώντας χωρικές βάσεις (spatial databases) διάφορων θεματικών επιπέδων (ή στρωμάτων) πληροφορίας, μετασχηματίζοντας την πληροφορία αυτή εικονικά σε έναν χάρτη ή χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές τρισδιάστατης απεικόνισης. Ο ορισμός που δίνεται απο τους Goodchild (1985) είναι ο εξής: « Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφορίας (ΓΣΠ) ορίζεται ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης, αποθήκευσης, συλλογής, ανάλυσης και απόδοσης πληροφορίας που αναφέρεται σε φαινόμενα που εξελίσσονται στο γεωγραφικό χώρο». Ο Λαμπράκης, 2015 αναφέρει την πολύπλευρη δυναμική των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφορίας εφόσον προσφέρουν τη δυνατότητα αξιοποίησης πληροφορίας απο διάφορες πηγές ειδικότερα σε συνδυασμό με δεδομένα Τηλεπισκόπησης και δίκτυα ηλεκτρονικών υπολογιστών (Χαλκιάς 2015, Λαμπράκης, 2015). Η αντίληψη (ανθρωποκεντρική αντίληψη) του χώρου συνίσταται από συνεχή πεδία και οντότητες και σε αυτή τη λογική στηρίζονται τα Συστήματα Γεωγραφικής Πληροφορίας (Κουτσόπουλος, 2006). Πάνω σε μια τέτοια λογική έχουν αναπτυχθεί τα διάφορα είδη δεδομένων που αξιοποιεί ένα Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας.

Γίνεται λόγος έτσι για το διαχωρισμό διανυσματικών (vector) και ψηφιδωτών ή κανονικοποιημένων δεδομένων (raster) στο χώρο και το GIS απεικονίζει τις χωρικές τους σχέσεις. Οι γεωγραφικές οντότητες σε εναν χάρτη αποτελούν σημεία ή αντικείμενα με πεπερασμένα όρια και άκρες στο χώρο για παράδειγμα τα κτίρια ή οι δρόμοι μιας αστικής περιοχής, τα όρια ενος νομού, σημεία στο χώρο με συγκεκριμένες γεωγραφικές συντεταγμένες όπως υδρομετρήσεις σε μια υδρολογική λεκάνη, τα όρια μιας υδρολογικής λεκάνης ή το υδρογραφικό δίκτυο μιας υδρολογικής λεκάνης (stream network) αποτελούν vector δεδομένα στο GIS. Η γεωγραφική οντότητα ενός χάρτη (vector model) αποτελείται απο μοναδικές χωρικές και περιγραφικές ιδιότητες (location and attributes).

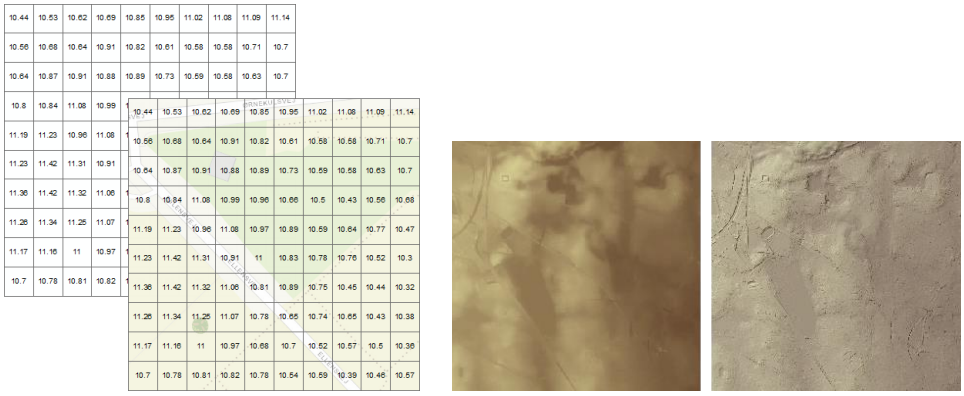
Εν αντιθέσει, τα raster δεδομένα, ή ψηφιδωτά δεδομένα αποτελούν συνεχή χωρικά πεδία όπως στο χώρο όπως η τοπογραφία, οι κλίσεις του εδάφους και συνήθως απεικονίζονται απο μια κανονικοποιημένη κατανομή στο χώρο συγκεκριμένων χωρικών μονάδων των κελιών ή φατνίων (grid cells) (Κουτσόπουλος, 2006). Έτσι το διανυσματικό μοντέλο (raster model) απεικονίζει τμήματα του χώρου (tiles) τα οποία αποτελούνται απο τις ψηφίδες (grid cells). Γίνεται έτσι σαφής διαχωρισμός μεταξύ του vector μοντέλου –γεωγραφικής οντότητας με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και τοπολογία και του ψηφιδωτού μοντέλου (raster model) ή κανονικοποιημένου μοντέλου (Καββαδά, 2012). Η σύνθεση θεματικών επιπέδων σε ένα νεο (όπως φαίνεται στο σχήμα) γίνεται μέσω της τεχνικής υπέρθεσης (layering). Έτσι παράγεται ενας πολυθεματικός χάρτης που απεικονίζει την υπάρχουσα εικόνα (εαν οχι ακριβώς αληθή για διάφορους λόφους) ενός γεωτόπου. Συνήθως τα τοπογραφικά δεδομένα ενός χάρτη (γεωλογικού, χρήσεων γης για παράδειγμα) εισάγονται στο GIS σύστημα ως διανυσματικά δεδομένα (χρήσεις γης ως πολύγωνα το ίδιο και οι γεωλογικοί σχηματισμοί) ενώ η τοπογραφία εισάγεται ως ενα ΨΜΕ (ψηφιακό μοντέλο εδάφους) δηλαδή ένα ψηφιδωτό/ κανονικοποιημένο μοντέλο εδάφους που αναπαριστά το ανάγλυφο της τοπογραφίας ή τη γεωμορφολογία σε διάφορες κλίμακες αναφοράς και σε διάφορα συστήματα προβολής (για τον Ελλαδικό χώρο ισχύει το προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ 1987-Greek Grid).

Στην Υδρολογία η κύρια συμβολή των GIS οφείλεται στην εισαγωγή των ψηφιακών μοντέλων εδάφους (ΨΜΕ) στην υδρολογική ανάλυση και στην ανάπτυξη αλγορίθμων στο GIS Toolbox (Spatial Analyst- Hydrology) ή την εφαρμογή ArcHydro. Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους έχουν συνεισφέρει σημαντικά στις Γεωεπιστήμες εφόσον παρέχουν τη δυνατότητα μοντελοποίησης της τοπογραφίας και γεωμορφολογίας μιας υδρολογικής λεκάνης με αρκετά μεγάλη ακρίβεια (τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη ανάλυσή της). Τα ΨΜΕ αποτελούν ένα κανονικοποιημένο μοντέλο που αποτελείται απο τις ψηφίδες (κελιά- cells) τα οποία αναπαριστούν τη μονάδα μέτρησης της επιφάνειας της τοπογραφικής επιφάνειας. Τα κελιά ή ψηφίδες (cells) αποτελούν συνεχή μοντελοποιημένα χωρικά τμήματα όπως η τοπογραφία και οι εδαφικές κλίσεις στα οποία η υδρολογική μοντελοποίηση αποτελείται απο την κίνηση της υδροσταγόνας στο χώρο προς διάφορες κατευθύνσεις (Καββαδά, 2012).



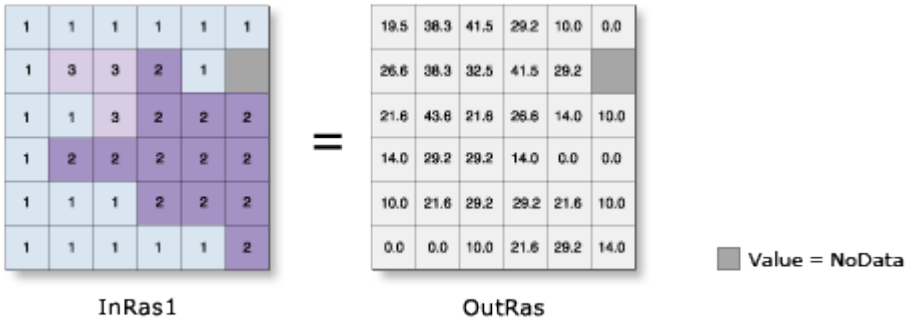
Σχήμα 6 : Υπέρθεση διαφορετικών θεματικών επιπέδων στο GIS.

Πιο συγκεκριμένα, οι αλγόριθμοι εφαρμόζονται στα ΨΜΕ -ή αλλιώς σε καννάβους του υψομέτρου- στα οποία το κάθε κελί του μοντέλου απεικονίζει μια διαφορετική τιμή υψομέτρου. Η εφαρμογή των αλγόριθμων αυτών παράγει καννάβους ιδίων διαστάσεων και ίδιων χαρακτηριστικών (μέγεθος κυττάρου και διάσταση καννάβου) οι οποίοι εκτιμούν τα εξής χαρακτηριστικά τοπογραφικού αναγλύφου:



Σχήμα 7: Παράδειγμα ενός καννάβου υψομέτρου (Πηγή: ESRI, https://learn.arcgis.com/en/related-concepts/digital-elevation-models.htm).

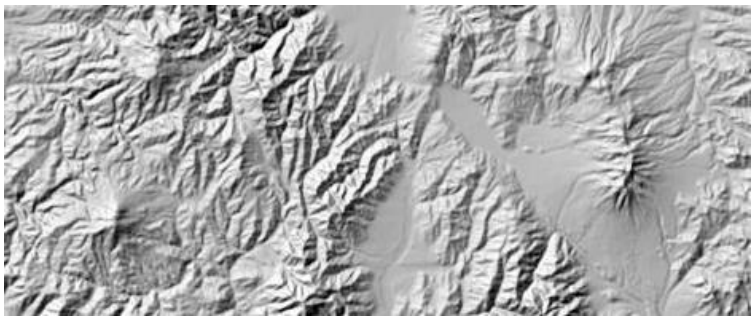
1) Κλίση (slope) στο κάθε κύτταρο του καννάβου υπολογίζεται η μεγαλύτερη κλίση του κελιού σε σχέση με τα οκτώ γειτονικά του.



Σχήμα 8: Υπολογισμός της κλίσης σε Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (πηγή: http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/slope.htm).

2) Άποψη (aspect) στο κάθε κύτταρο του καννάβου υπολογίζεται η διεύθυνση της μεγαλύτερης κλίσης του κελιού σε σχέση με τα οκτώ γειτονικά του.

3) Σκίαση (hillshade) αναγλύφου υπολογισμός της φωτοσκίασης του κάθε κελιού σε σχέση με οκτώ γειτονικά του.



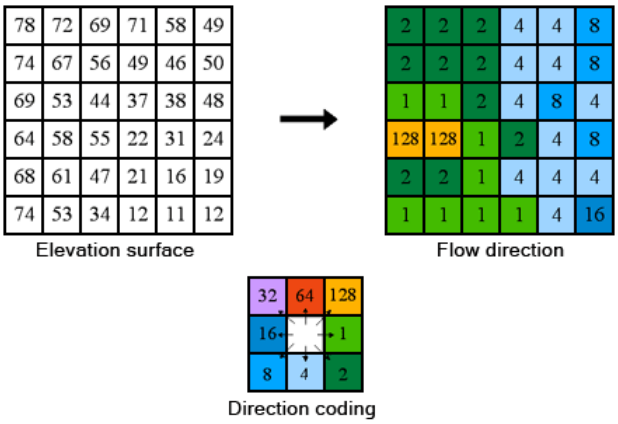
Σχήμα 9: Γραμμοσκιασμένη επιφάνεια Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους που χρησιμοποιείται στην ανάλυση και ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της επιφάνειας (πηγή: http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/hillshade-function.htm)

4) ισοϋψείς (contour lines) υπολογίζονται ισοϋψείς καμπύλες με επιλεγόμενη ισοδιάσταση. Στο κάθε κελί-κύτταρο του καννάβου (grid cell) αντιστοιχεί μια τιμή υψομέτρου και το σύνολο του καννάβου αναπαριστά ένα μοντέλο ισοϋψών της τοπογραφικής επιφάνειας της περιοχής μελέτης.

5) Εξάλειψη κοιλοτήτων (fill) που εφαρμόζεται σε κανναβους υψομέτρου απαλείφοντας της κοιλότητες.

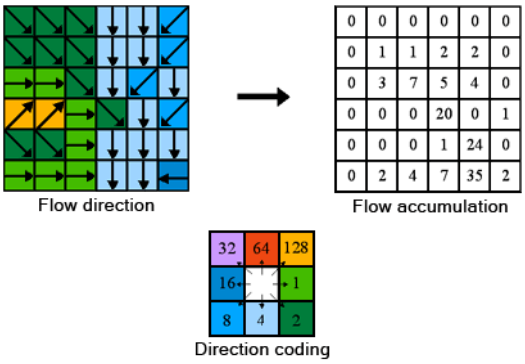
6) Κοιλότητας (sink) εφαρμόζεται και αυτός στο κανναβο υψομέτρου και εντοπίζει κύτταρα που είναι χαμηλότερα από τα οκτώ γειτονικά τους.

Για να υπολογιστούν υδρολογικές παράμετροι σε μια λεκάνη με τη βοήθεια των GIS αξιοποιείται το εργαλείο υπολογισμού της κατεύθυνσης ροής. Μετά το γέμισμα (fill) των cells (ψηφίδων) του καννάβου υψομέτρου, υπολογίζεται η ροή από τα κελιά με το μεγαλύτερο υψόμετρο σε αυτά με το μικρότερο υψόμετρο. Η διεργασία αυτή πραγματοποιείται προς τα οκτώ γειτονικά κελιά του κάθε φατνίου/κελιού, για κάθε κελί του καννάβου υψομέτρου. Ουσιαστικά, υπολογίζεται η κλίση την οποία ακολουθεί η ροή (flow direction) και κωδικοποιείται σε οκτώ διαφορετικές τιμές (η κλίση υπολογίζεται από το κελιά με το μεγαλύτερο υψόμετρο στα κελιά με το χαμηλότερο υψόμετρο).



Σχήμα 10: Υπολογισμός της κατεύθυνσης ροής (flow direction) στο GIS (πηγή: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-direction-works.htm).

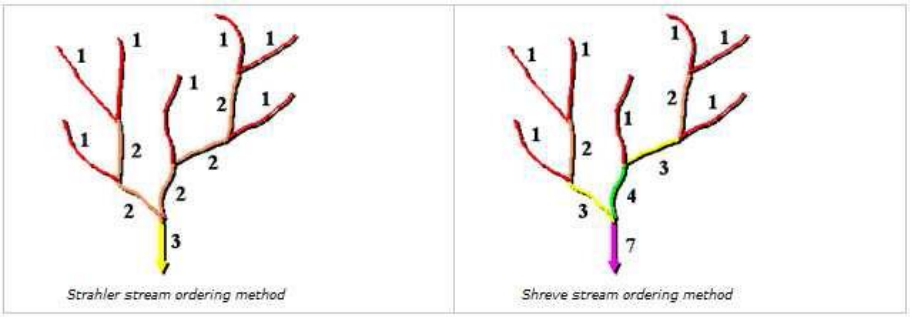
Ένας επίσης υδρολογικός αλγόριθμος αποτελεί ο flow accumulation, που είναι η προηγούμενη λειτουργία της κατεύθυνσης ροής για τον υπολογισμό των μέγιστων κλίσεων μεταξύ των κελιών (από τις υψηλότερες στις χαμηλότερες κλίσεις) και μετέπειτα ο υπολογισμός του αριθμού των κελιών που συσσωρεύονται στην κάθε κατεύθυνση.



Σχήμα 11: Ο αλγόριθμος που υπολογίζει το επίπεδο συγκέντρωσης ροής (πηγή: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm) .

Τάξη Κλάδου Υδρογραφικού Δικτύου (Stream Order)

Αποδίδεται στον κάθε υδρογραφικό κλάδο μια τιμή τάξεως ανάλογα με την ιεράρχησή του στο υδρογραφικό δίκτυο (και τον αριθμό συσσώρευσης των κελιών). Η λογική στηρίζεται στο ότι οι κύριοι υδρογραφικοί κλάδοι έχουν το μικρότερο υψόμετρο (άρα τη μεγαλύτερη συσσώρευση ροής) σε σχέση με τους παραπόταμους του κύριου υδρογραφικού κλάδου στους οποίους δε παρατηρείται η μέγιστη τοπογραφική ταπείνωση.



Σχήμα 12 : Η διαβάθμιση των υδρογραφικών κλάδων κατά Strahler με τη λειτουργεία Stream Order.

Stream Link

Με τη λειτουργία αυτή οι κόμβοι αποτελούν σημεία σύνδεσης του κύριου καναλιού με άλλους υδρογραφικούς κλάδους μικρότερης τάξεως και σημεία που συνενώνουν δυο κλάδους διαφορετικής τάξης και υπολογίζεται η απόσταση από το σημείο εξόδου της λεκάνης.

Μήκος Ροής (Flow length)

Βασική λειτουργία του υδρολογικού toolset στο GIS είναι η εκτίμηση του μήκους του επιμηκέστερου κλάδου από το σημείο εξόδου της υδρολογικής λεκάνης δηλαδή ο διαχωρισμός των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου ανάλογα με το χρόνο συγκέντρωσή τους. Όταν το μήκος του υδρογραφικού κλάδου διαιρεθεί με τη ταχύτητα της ροής που υπολογίζεται με τη μέθοδο της επιφάνειας τότε μπορούν να υπολογιστούν οι χρόνοι απορροής από ένα επιλεγμένο σημείο του υδρογραφικού κλάδου έως την έξοδο της υδρολογικής λεκάνης.

Μοντέλα βροχής-απορροής σε περιβάλλον GIS.

Απο τα πρώτα μοντέλα βροχής απορροής σε περιβάλλον GIS/GRASS προτάθηκαν απο τους Maidment, 1993 and Olivera and Maidment, 1996 and Olivera and Maidment, 1999. Ο Maidment ηταν πρωτοπόρος μηχανικός στην Αμερική ο οποίος πρότεινε τη χωρικά κατανεμημένη εκτίμηση του υδρογραφήματος (spatial decomposition of unit hydrograph) με τη βοήθεια των GIS υποθέτοντας τη χωρική κατανομή της ταχύτητας ροής στο κάθε κελί (cell) του καννάβου υψομέτρου αλλά χωρίς να διαφοροποιείται χρονικά (spatial variable but time and discharge invariant). Με τον τρόπο αυτό διαχώρησαν την υδρολογική λεκάνη σε υπο- περιοχές ίδιου χρόνου συρροής (ισόχρονες) απο το σημείο εξόδου της υδρολογικής λεκάνης και υπολογίστηκε το υδρογράφημα για κάθε υπο-περιοχή δημιουργώντας ένα γραμμικό μοντέλο ‘υστέρησης’ μεταξύ της βροχόπτωσης σε κάθε υπο-περιοχή και απόκρισης (απορροής) στο σημείο εξόδου της υδρολογικής λεκάνης. Θεώρησαν την ομοιόμορφη κατανομή της βροχής για όλη την έκταση της υδρολογικής λεκάνης (Olivera and Maidment, 1996 and Olivera and Maidment 1999). Ο υπολογισμός αυτός στηρίχτηκε στον υπολογισμό του χρόνου συρροής της υδρολογικής λεκάνης θεωρώντας χωρικά κατανεμημένη ταχύτητα ροής απο ψηφίδα σε ψηφίδα μέχρι το σημείο εξόδου της υδρολογικής λεκάνης. Το μοντέλο αυτό εφαρμόστηκε αρχικά στην λεκάνη Plynlimon της Ουαλίας και μετέπειτα στην υδρολογική λεκάνη Waller Creek του Τέξας.

Παρόμοια αποτελέσματα πέτυχε ο Muzik 1996, όταν υπολόγισε ένα χωρικά κατενεμημένο υδρογράφημα ανάλογα με τη μέθοδο της επιφάνειας- χρόνου υπολογίζοντας όμως τη ταχύτητα με την προσέγγιση του κύματος διάχυσης και χρησιμοποιώντας την καμπύλη SCS (Soil Conservation Service) για τον υπολογισμό της βροχής που αντιστοιχούσε στο κάθε κελί του καννάβου της τοπογραφίας (Muzik, 1996).

Οι Ajward and Muzik, 2000 υπολόγισαν για μια υδρολογική λεκάνη έκτασης 230km^2 στον Καναδά το πλημμυρικό υδρογράφημα με μεγάλη ακρίβεια χρησιμοποιώντας την εκτίμηση του χωρικά κατανεμημένου υδρογραφήματος προτεινόμενο απο τους Maidment et al, 1996 και τη καμπύλη ροής CN υπολογίζοντας τη βροχόπτωση ανα κελί του ΨΜΕ (Ajward and Muzik, 2000). Εκτίμησαν το υδρογράφημα ενός πλημμυρικού γεγονότος υπολογίζοντας το χρόνο συρροής της υδρολογικής λεκάνης ανάλογα με την προσέγγιση του κύματος διάχυσης όμοια με τον Muzik, 1996. Στον αντίποδα οι Maidment, 1993, Maidment 1996 και Maidment et al, 1999 υπολόγισαν το χρόνο συρροής της υδρολογικής λεκάνης εφαρμόζοντας χωρικά κατανεμημένο υδρογράφημα αλλά υπολογίζοντας το χρόνο συρροής στηριζόμενοι στη χωρικά διαφοροποιημένη ταχύτητα ροής (spatial distribution of velocity).

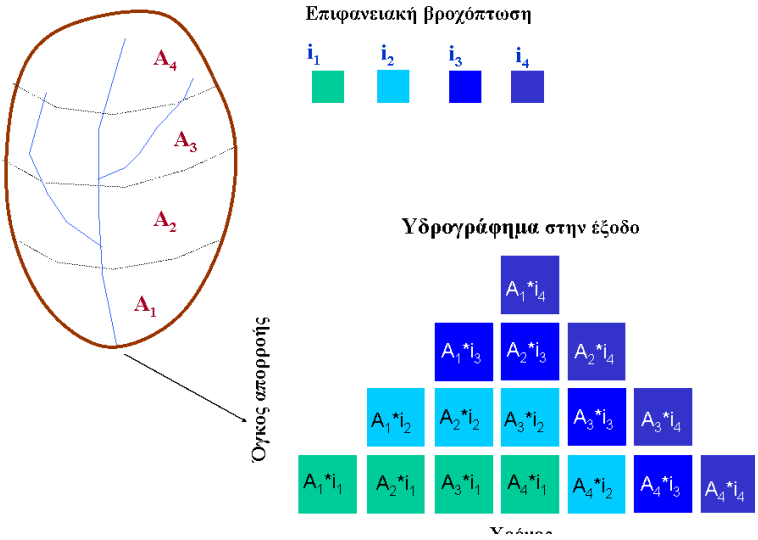
Οι Melesse and Graham, 2004 πρότειναν ενα μοντέλο για τη διόδευση της απορροής βασισμένο στον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης της υδρολογικής λεκάνης. Αρχικά διέκριναν την ταχύτητα της στρωματοροής (overland flow) απο την ταχύτητα στην κύρια κοίτη του υδατορέματος η οποία υπολογίστηκε βασισμένη στην εξίσωση του Manning και στην μέθοδο και την εξίσωση για συνθήκες ροής σταθερής κατάστασης (steady state equation). Για τη στρωματοροή συνδυάστηκαν οι υδραυλικές ιδιότητες και η κινηματική εξίσωση. Έτσι, οι χρόνοι συρροής στο κάθε κελί υπολογίστηκαν με βάση τις εξισώσεις κίνησης και του Manning και για τα δυο είδη ταχύτητας. Έπειτα η άμεση απορροή συνυπολογίστηκε απο τον όγκο της ροής στο κάθε κελί για κάθε χρονικό διάστημα Δt (Πέντερης, 2017, Melesse and Graham, 2004). Το υδρογράφημα παρουσίασε μια χρονική κατανομή και δεν υπολογίστηκε συγκεντρωτικά. Στον αντίποδα, οι Du et al, 2009 εφάρμοσαν ένα χρονικά διακυνούμενο μοναδιαίο υδρογράφημα λόγω της διακύμανσης της βροχόπτωσης (Du et al, 2009) για μια υδρολογική λεκάνη στη νοτιοανατολική Κίνα. Ομοίως, πολλές εφαρμογές του χωρικά κατανεμημένου υδρογραφήματος εφαρμόστηκε και απο άλλους ερευνητές μετέπειτα για την εκτίμηση του υδρογραφήματος πλημμύρας στον Ελλαδικό χώρο (Καλογερόπουλος et al, 2011, Χριστοφίδης, 2010, Gioti et al, 2012, Καββαδά, 2012, Καρύμπαλης et al, 2014, Πέντερης, 2017).

Μια από τις μεθόδους που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση βροχής-απορροής στο περιβάλλον GIS είναι η μέθοδος χρόνου-επιφάνειας προτεινόμενη από τους McCuen et al., (1989). Η αρχή της μεθόδου χρόνου-επιφάνειας αποτελεί το ιστόγραμμα χρόνου-επιφάνειας (time area method) που εκφράζει τη σχέση μεταξύ του χρόνου απορροής της επιφάνειας απορροής στην υδρολογική λεκάνη μέχρι την έξοδό της για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (Χριστοφίδης, 2010). Συσχετίζεται το μήκος διαδρομής (flow length) με το εμβαδό της λεκάνης. Συνεπώς οι ισόχρονες καμπύλες συνδέουν σημεία που ανήκουν στην ίδια έκταση της λεκάνης

και έχουν το ίδιο μήκος διαδρομής μέχρι το σημείο εξόδου τη υδρολογικής λεκάνης. Χαρακτηριστική ιδιότητα των ισόχρονων καμπυλών (isochrones) είναι ότι οι ισόχρονες καμπύλες δεν επικαλύπτονται μεταξύ τους καθώς ισχύουν οι αρχές της αναλογίας και της επαλληλίας (Λέκκας, 2000), επομένως δίνεται η δυνατότητα εύρεσης σημείων που ισαπέχουν χρονικά από την έξοδο της λεκάνης και με αυτό το τρόπο μπορεί να εκτιμηθεί η παροχή.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε μικρού και μεσαίου μεγέθους υδρολογικές λεκάνες λόγω του γεγονότος ότι δεν λαμβάνει υπόψη της την αποθηκευτική ικανότητα της λεκάνης. Επίσης ανεξαρτήτου της εντάσεως της βροχόπτωσης εφαρμόζεται η ίδια συνάρτηση για τον υπολογισμό της παροχής και της ταχύτητας ροής (Καββαδά, 2012, Saghafian& Julien, 2002).

Ο χρόνος απορροής του κάθε κελιού του καννάβου υψομέτρου μέχρι την έξοδο της υδρολογικής λεκάνης υπολογίζεται με βάση, α) το μήκος της διαδρομής που διανύεται μέχρι το σημείο εξόδου και β) τη ταχύτητα ροής της βροχόπτωσης σε κάθε κελί του καννάβου. Θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή της έντασης της βροχόπτωσης στην υδρολογική λεκάνη η ταχύτητα σε κάθε κελί του καννάβου θα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως την κλίση του εδάφους και τις χρήσεις γης.



Σχήμα 13: Μέθοδος υπολογισμού του υδρογραφήματος στην έξοδο της λεκάνης με βάση την εκτίμηση των ισόχρονων καμπυλών σε μια υποθετική υδρολογική λεκάνη η οποία χωρίζεται σε τέσσερις ζώνες ίσου εμβαδού δεχόμενες βροχόπτωση ίσης έντασης (απο Κουτσογιάννης, 1999).

2.Αριθμητική πρόγνωση καιρού

Η αριθμητική πρόγνωση του καιρού περιλαμβάνει την προσομοίωση της ατμοσφαιρικής κατάστασης και των δυναμικών αλληλεπιδράσεών της με τα υπόλοιπα υποσυστήματα της βιόσφαιρας με τη χρήση ατμοσφαιρικών μοντέλων. Οι διάφορες ατμοσφαιρικές διεργασίες όταν δεν μπορούν να διακριτοποιηθούν στο χώρο τότε εισάγονται στα ατμοσφαιρικά μοντέλα ως παράμετροι και αποτελούν τις διάφορες ροές ενέργειας με το έδαφος, τυρβώδη ροή, ηλιακή ακτινοβολία (Katsafados et al, 2015).

Η αριθμητική πρόγνωση καιρού ξεκίνησε αιώνες πριν με έναν Νορβηγό μετεωρολόγο τον Bjerknes ο οποίος υποστήριξε οτι η κατάσταση της ατμόσφαιρας μπορεί να προβλεφθεί (prognostic step) περιγράφοντας την κατάσταση της ατμόσφαιρας (θερμοκρασία, πίεση, πυκνότητα, υγρασία) στο χρόνο με ένα σύνολο εξισώσεων. Για την ιδέα αυτή ο Bjerknes δεν πραγματοποίησε κάποιο υπολογισμό. Η πρώτη αριθμητική απόπειρα πρόγνωσης της ατμόσφαιρας πραγματοποιηθήκε αργότερα απο τον Richardson το 1911 ο οποίος θεώρησε την ατμόσφαιρα ως ένα σύστημα μεταβλητών που αποτελείται απο επτά διαφορικές εξισώσεις και χωρίζοντάς την σε εξι κατακόρυφα επίπεδα και σε οριζόντιες ατμοσφαιρικές στήλες συγκεκριμένων γεωγραφικών διαστάσεων (Κατσαφάδος, 2015). Η απόπειρά του δεν ήταν επιτυχής λόγω της υπερεκτίμησης της πίεσης της ατμόσφαιρας στα 145hPa (Lynch, 2008, Κατσαφάδος, 2015). Ουσιαστικά όμως έθεσε τις βάσεις για την αριθμητική πρόγνωση του καιρού. Ακολούθησαν οι John von Neumann, Jules Charney και Ragnar Fjortoft το 1949 στο Princeton της ΗΠΑ, οι οποίοι κατάφεραν να προσομοιώσουν επιτυχώς την κατάσταση της ατμόσφαιρας εκτελώντας προσομοιώσεις στον υπολογιστή ENIAC (Lynch, 2008).

Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών καθώς και η εξέλιξη της γνώσης γύρω απο τις ατμοσφαιρικές διεργασίες συντέλεσε στην μετέπειτα δημιουργία προγνωστικών μοντέλων παγκόσμιας κλίμακας. Μερικά απο τα θεμελιώδη προγνωστικά μοντέλα παγκόσμιας κλίμακας αποτελούν το GFS (Global Forecasting System) που αναπτύχθηκε απο το NCEP (National Center of Environmental Prediction), IFS (Integrated Forecasting System) που αναπτύχθηκε απο την ομάδα επιστημόνων του ECMWF (European Center of Medium Range Forecasts) καθώς και το GEM (Global Environmental Multiscale Model) του Καναδά (Ευσταθίου, 2013). Η πρόγνωση του καιρού μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις κατηγορίες: α) στην μικρής κλίμακας πρόγνωση απο μια εως και δυο ημέρες, β) στην μεσαίας κλίμακα πρόγνωση του καιρού εως και δυο εβδομάδων και στην γ) μεγαλύτερη κλίμακας πρόγνωση καιρού που η πρόγνωση

πραγματοποιείται σε χρονικό διάστημα ενός μηνός εώς και μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (Κατσαφάδος, 2015).

Στην εποχική πρόγνωση του καιρού (seasonal foreast) η πρόγνωση του καιρού πραγματοποιείται σε χρονικό διάστημα εως και εξι μηνών. Σημαντικός σταθμός στην ιστορία των υδρολογικών και μετεωρολογικών προγνώσεων για την Ευρώπη αποτελεί η δημιουργία του ECMWF (European Center of Medium Range Forecasts). Η πρώτη επιχειρησιακή πρόγνωση καιρού επιτελέστη το 1979. Το σύστημα επιχειρησιακής πρόγνωσης του ECMWF αποτελείται απο semi-lagrangian χρονικά σχήματα, διαθέτει ολοκληρωμένη μεταχείριση των φυσικών διεργασιών (Lynch, 2008). Αποτελείται απο 91 κατακόρυφα επίπεδα και έχει οριζόντια ανάλυση 25km ενώ είναι συζευγμένο με ένα μοντέλο ωκεάνιας κυκλοφορίας (ocean model coupling). Το μοντέλο αυτό επίσης για τον υπολογισμό των αρχικών συνθηκών χρησιμοποιεί το σχήμα 4D-var αφομοίωσης το οποίο αξιοποιεί δεδομένα παρατηρήσεων απο δορυφόρους ανα 12ωρο. Ειδικά, δίνεται μεγάλη έμφαση στην αξιοποίηση των δορυφορικών δεδομένων για παρατηρήσεις και στην κατάλληλη αφομοίωσή τους διότι επηρρεάζουν την μετέπειτα ποιότητα της ακρίβειας (forecast quality) των ατμοσφαιρικών προσομοιώσεων και συνεπώς των μετεωρολογικών προγνώσεων (Lynch, 2008). Το επιχειρησιακό σύστημα του ECMWF λειτουργεί σε ενα ισχυρό περιβάλλον HPC (High Performance Computing Facility System) ανεπτυγμένο απο την IBM.

Τα μοντέλα περιφερειακής πρόγνωσης καιρού (regional models) έχουν αναπτυχθεί για την προσομοίωση των ατμοσφαιρικών διεργασιών περιορισμένης κλίμακας όπως τα καταιγιδοφόρα συστήματα (convective systems) και συμβάλλουν στην πρόγνωση των ατμοσφαιρικών διεργασιών μέσης συνοπτικής κλίμακας (Κατσαφάδος, 2003, Κατσαφάδος, 2015). Τέτοια μοντέλα είναι το MM5 (the Fifth Generation Mesoscale Model), το WRF (Weather Research Forecast Model) και το ETA.

2.1 Το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF.

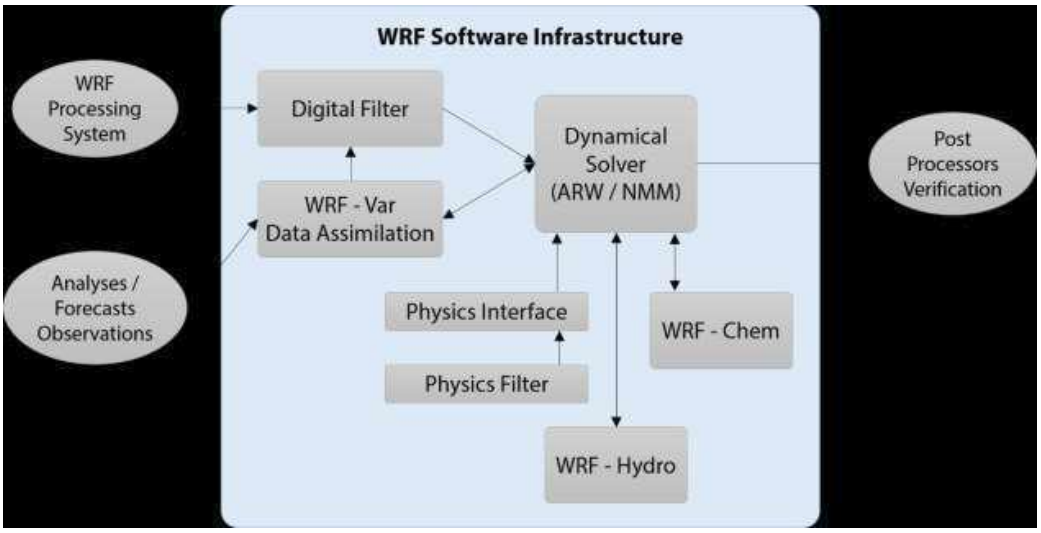
Πρόκειται για ένα σύστημα μετεωρολογικής πρόγνωσης νέας γενιάς σχεδιασμένο για ερευνητικούς και επιχειρησιακούς σκοπούς. Χρησιμοποιεί πραγματικά αλλά και εξιδανικευμένα δεδομένα για την πρόγνωση καιρού. Αποτελεί μια ευρεία προσπάθεια ανάπτυξης ενός συστήματος μετεωρολογικής πρόγνωσης ελεύθερης πρόσβασης, ξεκινώντας το 1990 με τη συνεργασία των NCEP (National Centre for Environmental Prediction), NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration), NCAR (National Centre for Atmospheric Research) Mesoscale and Microscale Meteorology (MMM) Division, Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory (NRL), Centre for Analysis and Prediction of Storms (CAPS), Πανεπιστήμιο της Οκλαχόμα, Federal Aviation Administration (FAA) καθώς και τη συμμετοχή από άλλα Πανεπιστήμια και ερευνητικές μονάδες των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (Ευσταθίου, 2013, Powers et al, 2016, Skamarock, 2008). Χαρακτηριστικό του μοντέλου αυτού είναι η ανοικτή πρόσβαση του κώδικα που επιτρέπει στους χρήστες παγκοσμίως να ανταλλάσσουν εμπειρίες και γνώση. Στο μοντέλο αυτό γίνονται ατμοσφαιρικές προσομοιώσεις – ευρείας (Global WRF) και περιορισμένης κλίμακας και για μέσης, βραχείας και πραγματικού χρόνου (real time) πρόγνωση καιρού (meso-scale, short scale and real time forecasting) (Powers et al, 2016). Η χρήση του περιλαμβάνει γενικά δυο φάσεις: στην πρώτη γίνεται ξεκινώντας από τον ορισμό του (των) τομέων προσομοίωσης (domains), εισαγωγή δεδομένων εισόδου και ορισμών αρχικών οριακών συνθηκών και στη δεύτερη φάση αποτελεί την προσομοίωση. Ο κώδικας του μοντέλου είναι γραμμένος με Fortran (UNIX λειτουργικό) επιτρέποντας και την λειτουργία MPI –Message Passing Information (Skamarock, 2008, Ευσταθίου, 2013).

Το μοντέλο ακολουθεί τη μη υδροστατική προσέγγιση για την επίλυση των ατμοσφαιρικών διεργασιών σε τοπικό επίπεδο (μοντέλο περιορισμένης περιοχής-regional scale). Η μη υδροστατική προσέγγιση χρησιμοποιείται για τη μελέτη των ατμοσφαιρικών διεργασιών σε οριζόντια μικροκλίμακα όπως τα φαινόμενα τυρβώδους ροής (Κατσαφάδος, 2015).
Τα ατμοσφαιρικά μοντέλα περιφερειακής κλίμακας (regional models) διέπονται από κάποια χαρακτηριστικά και χρησιμοποιούνται ως εργαλεία πρόγνωσης καιρού αλλά και για μελέτες αλληλεπίδρασης των φυσικών οικοσυστημάτων μεταξύ ατμόσφαιρας-υδρόσφαιρας (Κατσαφάδος, 2003).

Η μέθοδος που ακολουθείται για την επίλυση των μεταβλητών ενδιαφέροντος βασίζεται στην επίλυση με σημεία πλέγματος (gridded variables). Το σύνολο των εξαρτημένων μεταβλητών επιλύεται σε κάθε σημείο του πλέγματος-με αυτό το τρόπο λειτουργεί και η επίλυση στο δυναμικό πυρήνα ARW του μετεωρολογικού μοντέλου WRF. Το σύνολο των σημείων του πλέγματος αποτελεί το πεδίο ορισμού του μοντέλου. Οι αποστάσεις των σημείων στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση θεωρούνται σταθερές οπότε επιλέγονται ως ανεξάρτητες μεταβλητές στο σύστημα αναφοράς του Euler.

Ρυθμίζοντας μια περιοχή μελέτης (domain) στα μετεωρολογικά μοντέλα επιλέγεται ουσιαστικά ο γεωγραφικός χώρος για τον οποίο επιθυμούμε να γίνει η πρόγνωση /μελέτη αλληλεπίδρασης (Κατσαφάδος, 2003). Ο γεωγραφικός χώρος περιέχει φυσικά χαρακτηριστικά που επηρρεάζουν την κατανομή και την εκτίμηση των εξαρτημένων μεταβλητών για παράδειγμα, η ορογραφία μιας περιοχής μπορεί να αλλάξει ουσιαστικά την κατανομή της θερμοκρασίας σε μια περιοχή , η θάλασσα την κατανομή της πίεσης ή τη ταχύτητα του ανέμου. Οπότε δεν εφαρμόζεται καρτεσιανό σύστημα αναφοράς λόγω της ανομοιογένειας που παρατηρείται στα φυσικά χαρακτηριστικά των οικοσυστημάτων (Κατσαφάδος, 2003). Για αυτό το λόγο εφαρμόζονται συστήματα αναφοράς που ακολουθούν τη τοπογραφία μιας περιοχής.

Η δομή του WRF γενικά ακολουθεί το διάγραμμα του Skamarock et al, 2008 η οποία αποτελείται κυρίως από δυο πυρήνες (δυναμικά σχήματα επίλυσης-dynamic solvers) τον πυρήνα ARW (Advanced Research WRF) και τον πυρήνα NMM (Non hydrostatic Mesoscale Model). Το μοντέλο διαθέτει διάφορα σχήματα μικροφυσικής, παραμετροποίησης cumulus, επίλυσης πλανητικού οριακού στρώματος, σχήματα επιφάνειας εδάφους και σχήματα επίλυσης ισοζυγίου ακτινοβολίας (longwave/shortwave radiation).



Σχήμα 14: Δομή λειτουργίας πυρήνα WRF-ARW (Skamarock et al, 2008).

2.2 Σύστημα του λύτη (solver) ARW

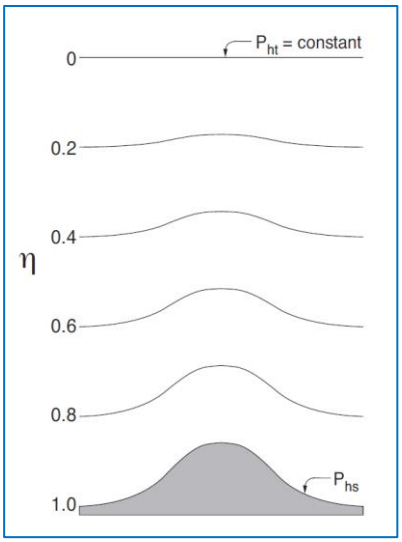
Ο πυρήνας ARW επιλύει πλήρως συμπιεστές , μη υδροστατικές εξισώσεις Euler. Οι εξισώσεις αυτές επιλύονται σε κάθε σημείο ενός πλέγματος που στη κατακόρυφή του δομή ακολουθεί την επιφάνεια του εδάφους με βάση την αδιάστατη μεταβλητή η. Η τιμή της μεταβλητής η είναι η χρησιμοποιούμενη μεταβλητή σ που χρησιμοποιείται στη μέτρηση της κατακόρυφης τιμής της πίεσης στα ατμοσφαιρικά μοντέλα και προσδιορίζεται απο το τύπο (2.2.1):

$\eta = (p_h - p_{ht})/\mu$ (2.2.1) όπου $\mu = p_{hs} - p_{ht}$

Η τιμή μ(x,y) αντιστοιχεί στη μάζα ανά μονάδα επιφάνειας εντός της στήλης στο πεδίο ορισμού (x,y) του μοντέλου.

Η μεταβλητή p_h αποτελεί την υδροστατική πίεση, η τιμή p_{hs} είναι η πίεση της επιφάνειας και p_{ht} η μετρούμενη κατακόρυφη συντεταγμένη της πίεσης στην κορυφή (άνω όριο) του

πλέγματος του ατμοσφαιρικού μοντέλου (Skamarock, 2008). Το η παίρνει τιμές από 1 (στην επιφάνεια του εδάφους) έως 0 (στο πάνω όριο του πεδίου ορισμού του μοντέλου).



Σχήμα 15: Η κατακόρυφη δομή του ατμοσφαιρικού μοντέλου WRF (Skamarock, 2008).

2.3 Βασικές εξισώσεις επίλυσης Euler (flux from Euler equations).

Οι βασικές σχέσεις της δυναμικής των ατμοσφαιρικών διεργασιών στο ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF αναπαρίστανται ως εξισώσεις ροής (Skamarock, 2008):

$F_U = \partial tU + (\nabla X V_u) - \partial_x (p\varphi_\eta) + \partial_\eta (p\varphi_\chi)$ (2.3.1)

$F_V = \partial tV + (\nabla X V_v) - \partial_y (p\varphi_\eta) + \partial_\eta (p\varphi_y)$ (2.3.2)

$F_w = \partial tW + (\nabla X V_w) - g(\partial_\eta p - \mu)$ (2.3.3)

$0 = \partial t\mu + (\nabla X V)$ (2.3.4) (2.3.4)

$0 = \partial t\varphi + \mu^{-1}[(\nabla_\varphi X V) - gW]$ *(2.3.5)*

σε συνδυασμό με τη διαγνωστική σχέση για την αντίστροφη πυκνότητα$\partial_\eta \varphi = -\alpha\mu$ (2.3.6)

και την καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων 2.3.6.

$p = p_o(R_d\theta/p_o\,\alpha)^{\gamma}$ (2.3.7)

όπου το α αντιπροσωπεύει μια γενική μεταβλητή. Η σταθερά $\gamma = c_p/c_u$ =1.4 είναι η αναλογία της θερμοχωριτικότητας για το ξηρό αέρα, R_d είναι η σταθερά των αερίων για το ξηρό αέρα και p_0 αποτελεί την πίεση αναφοράς. Βασικές εξισώσεις του πυρήνα ARW είναι επίσης οι εξής (Bianco, 2008, Ευσταθίου, 2013):

Η εξίσωση διατήρησης της μάζας:

$$0 = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \text{ (2.3.8)}$$

Η εξίσωση διατήρησης της ορμής:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + c_p \Theta \frac{\partial \pi}{\partial x} = -\frac{\partial U_u}{\partial x} - \frac{\partial V_u}{\partial y} - \frac{\partial W_u}{\partial z} + F_x \text{ (2.3.9)}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + c_p \Theta \frac{\partial \pi}{\partial y} = \frac{\partial U_v}{\partial x} - \frac{\partial V_v}{\partial y} + \frac{\partial W_v}{\partial z} + F_y \text{ (2.3.10)}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + c_p \Theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + gp = -\frac{\partial U_u}{\partial x} - \frac{\partial V_u}{\partial y} - \frac{\partial W_u}{\partial z} + F_z \text{ (2.4)}$$

Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας:

$$\rho Q = \frac{\partial \Theta}{\partial t} + \frac{\partial U\theta}{\partial x} + \frac{\partial V\theta}{\partial y} + \frac{\partial W\theta}{\partial z} \text{ (2.4.1)}$$

και ισχύουν οι σχέσεις

$U = \rho u$, $V = \rho u$, $W = \rho w$, $\Theta = \rho\vartheta$

όπου u, v, w οι συνιστώσες της ταχύτητας για τις κατευθύνσεις (x,y,z), θ το δυναμικό θερμοκρασίας και ρ είναι η πυκνότητα του αέρα. Οι μεταβλητή T αντιπροσωπεύει την απόλυτη θερμοκρασία και η συνάρτηση Exner π=(ρ/ρ_0)^(R_d / c_p) όπου ρ η πίεση και ρ_0=1000hPa, η τιμή αναφοράς της πίεσης. Οι όροι $F_x F_y F_z$ αποτελούν τις δυνάμεις τριβής που εφαρμόζονται στις αντίστοιχες κατευθύνσεις (Skamarock, 2008).

2.4 Χρονική διακριτοποίηση με το σχήμα ενσωμάτωσης Runge-Kutta (RK).

Η χρονική διακριτοποίηση αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό των ατμοσφαιρικών μοντέλων περιορισμένης κλίμακας και για το WRF χρησιμοποιείται το χρονικό βήμα R K_3 το οποίο παίρνει τη μορφή τριων βημάτων ανεπτυγμένης λύσης από Φ(t) έως Φ(t+Δt), θεωρώντας ως Φ=(U,V,W,Θ,φ',μ', q_m) το σύνολο των προγνωστικών μεταβλητών και την εξίσωση επίλυσης του μοντέλου Φt=R(t) τα τρία χρονικά βήματα επίλυσης παίρνουν την εξής μορφή:

$$\Phi^* = \Phi^t + \frac{\Delta t}{3}\Phi^t \quad (2.5.1)$$

$$\Phi^{**} = \Phi^t + \frac{\Delta t}{2}\Phi^* \quad (2.5.2)$$

$$\Phi^{t+\Delta t} = \Phi^t + \Delta t \Phi^{**} \quad (2.5.3)$$

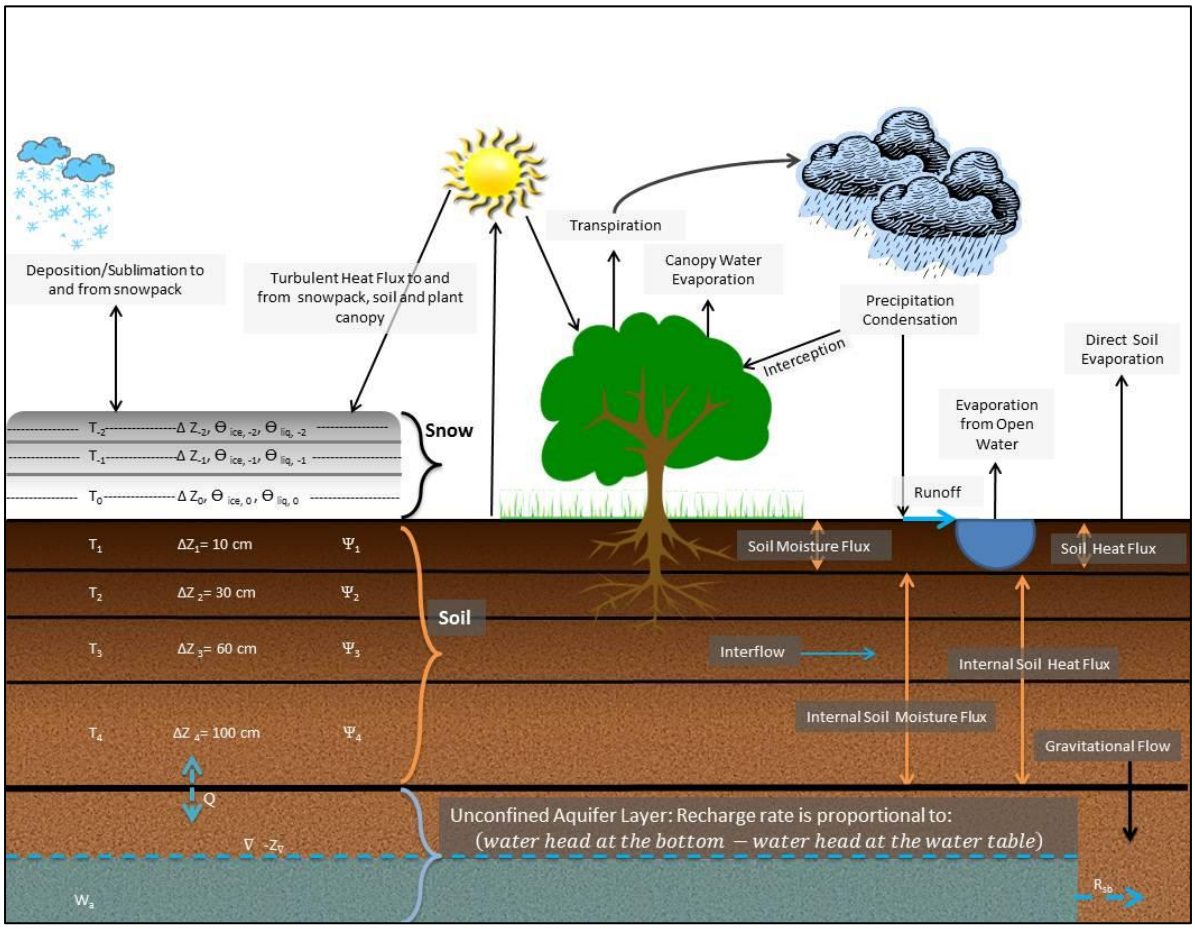
2.5 Σχήμα υπομοντέλου εδάφους NOAH Land Surface Model.

Σύμφωνα με τους Dirmeyer et al, 2019 τα μοντέλα ατμοσφαιρικών προσομοιώσεων αρχικά πριν απο την δεκαετία 1980 περίπου δεν λαμβάνανε υπόψη τους τις διεργασίες στο έδαφος οι οποίες όμως σύμφωνα με προγενέστερες μελέτες ερευνητών έχουνε επίδραση στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, στο ποσοστό της υγρασίας και του νερού που κατακρατείται απο την ατμόσφαιρα και συνεπώς στο νερό που τελικά εισέρχεται στην επιφάνεια του εδάφους μέσω των διάφορων μορφών κατακρημνισμάτων (Dirmeyer et al, 2019). Οι επιχειρησιακές μετεωρολογικές προγνώσεις αγνοούσαν τις διεργασίες στο έδαφος πριν τη δεκαετία του 1980 έχοντας σαν κύριο στόχο την αναπαραγωγή ντετερμινιστικών προγνώσεων βάση της αρχικής κατάστασης της ατμόσφαιρας. Το NOAH LSM αποτελεί ένα υπομοντέλο του ατμοσφαιρικού μοντέλου WRF το οποίο αναπτύχθηκε περίπου στις αρχές της δεκαετίας του 1990 απο το Oregon State University LSM (Pan and Mahrt, 1984) και λειτουργούσε ως υπομοντέλο εδάφους για τις μετεωρολογικές προγνώσεις απο την NWS (National Weather Station) των Η.Π.Α. Η δομή του αποτελούνταν απο δυο εδαφικά στρώματα μόνο, χρησιμοποιώντας την εξίσωση της διάχυσης της θερμότητας στο έδαφος και λαμβάνοντας υπόψη τις υδραυλικές ιδιότητες των εδαφικών στρωμάτων. Επίσης, περιλάμβανε σχήμα για την φυσική της χιονοκάλυψης και των διεργασιών της βλάστησης και διαπνοής.

Εκτός απο αυτές τις διεργασίες – το NOAH περιέχει και σχήμα φυσικής για την εκτίμηση του ενεργειακού ισοζυγίου της επιφάνειας της ατμόσφαιρας (Mahrt et Pan, 1984, Mahrt and Ek, 1984, Chen and Dudhia, 2001). Η μετέπειτα εξέλιξη του μοντέλου αυτού περιλαμβάνει βελτιώσεις στο τρόπο συνυπολογισμού των εδαφικών διεργασιών που αφορούν κυρίως σχήματα φυσικής για τις υδρολογικές διεργασίες διήθησης και επίγειας απορροής (Ek, 2003). Το NOAH ονομάστηκε απο τη συνεισφορά τεσσάρων οργανισμών οι οποίοι συνέβαλαν στην βελτίωσή του (NCEP-OSU-US Air Force- Office of Hydrology of NOAA US). Οι Niu et al, 2011 αργότερα στη μελέτη τους παρουσίασαν επιπρόσθετες βελτιώσεις όπως βελτιώσεις που αφορούν την προσομοίωση των διεργασιών τήξης χιονιού, των ροών ενέργειας απο και προς την επιφάνεια εδάφους, βελτιώσεις στον τρόπο εκτίμησης της επίγειας ροής (surface runoff) καθώς και στις διεργασίες μεταξύ του συστήματος υπόγειου νερού-εδαφικής υγρασίας και επιφανειακής απορροής

Η υδρολογικές αναβαθμίσεις του σημερινού NOAH και NOAH –MP (Multiphysics Parameterization) συνιστούν τη βάση για τη μετέπειτα εξέλιξη του WRF σε WRF-Hydro

εφόσον οι βελτιώσεις αυτές αφομοιώθηκαν στο μετεωρολογικό μοντέλο WRF και συντέλεσαν στην εξέλιξη του κώδικά του σε WRF-Hydro (Gochis, 2013, Gochis, 2015).



Σχήμα 16. Κύριες υδρομετεωρολογικές διεργασίες που μοντελοποιούνται στο υπομοντέλο εδάφους NOAH όπως η απορροή (runoff) η εξάμτιση και η διαπνοή. Με τις υδρολογικές αναβαθμίσεις που αναφέρονται σε επόμενες ενότητες βετιώνεται η εκτίμηση των υδρολογικών διεργασιών καθώς εισέρχονται και άλλες υδρολογικές διεργασίες (subsurface flow, overland flow) μαζί με τις διοδεύσεις ροής στην κοίτη υδατορεμάτων στο GIS (πηγή εικόνας http://www.jsg.utexas.edu/noah-mp).

Στο υπομοντέλο εδάφους NOAH υπολογίζεται η επιφανειακή και υπεδάφια απορροή καθώς και οι ροές θερμότητας και υγρασίας σε 4 υπεδάφια στρώματα μέχρι βάθους περίπου 2 μέτρων (Κατσαφάδος, 2010). Μια απο τις πιο βασικές μεταβλητές του σχήματος NOAH είναι η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία Θ η οποία προκύπτει απο τη μαθηματική σχέση (Dudhia, 2009):

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(D \frac{\partial \Theta}{\partial z}\right) + \frac{\partial K}{\partial z} + F_\theta \quad (2.5.1)$$

όπου D η διάχυση του νερού στο έδαφος, και K η υδραυλική αγωγημότητα δυο μεταβλητές που υπολογίζονται στο σχήμα εδάφους NOAH συναρτήση της μεταβλητής Θ και το F_Θ αντιστοιχεί στις πηγές και υδρολογικές απώλειες (εξάτμιση, απορροή, υετίσιμο νερό). Η επιφανειακή απορροή δίνεται γενικά απο το μαθηματικό τύπο

$$R = P_{d-} I_{\max,} \quad (2.5.2)$$

όπου P_d I_{max} ο υετός που δε συγκρατείται απο τη βλάστηση και η μέγιστη διήθηση του νερού στο έδαφος αντίστοιχα.

2.6 Υδρολογική αναβάθμιση των σχημάτων υπολογισμού απορροής στο υπομοντέλο εδάφους NOAH.

Η υδρολογική αναβάθμιση του υπομοντέλου εδάφους NOAH συνίσταται στη δημιουργία κώδικα για κάποιες επιπλέον υδρολογικές διεργασίες σε σχέση με την προϋπάρχουσα μορφή του , οι οποίες του επιτρέπουν εν τέλει να : α) εκτιμήσει την παροχή στο υδρογραφικό δίκτυο της υδρολογικής λεκάνης και β) την αλληλεπίδραση μεταξύ ατμόσφαιρας – υδρόσφαιρας. Οι παραπάνω λειτουργίες έχουνε ενσωματωθεί στον κώδικα του υπομοντέλου εδάφους ως αναβάθμισή του απο τους Gochis&Chen, 2003. Οι κώδικες αυτοί πιο συγκεκριμένα περιλαμβάνουν βελτιώσεις που αφορούν το τρόπο εκτίμησης της χερσαίας και υποδόριας ροής (surface and subsurface flow), την εκτίμηση της παροχής του υδρογραφικού δικτύου (μέσω της τεχνικής διόδευσης 1D μονοδιάστατης και 2D δυσδιάστατης ροής), την εκτίμηση της υπόγειας ροής (groundwater flow) καθώς και την εκτίμηση επιφανειακού υδατικού δυναμικού σε ταμιευτήρες (reservoirs) και λιμνών (lakes). Για την εκτίμηση της παροχής του υδρογραφικού δικτύου ενεργοποιούνται στον κώδικα απαραίτητα οι δυο πρώτες λειτουργίες δηλαδή η εκτίμηση της χερσαίας και υπεδάφιας ροής καθώς και οι διοδεύσεις μονοδιάστατης και δυσδιάστατης ροής στο υδρογραφικό δίκτυο. Οι κώδικες που αφορούν την εκτίμηση της υπόγειας ροής, υδατικού δυναμικού λιμνών/ ταμιευτήρων είναι προαιρετικοί και εφαρμόζονται (configuration) κατα περίπτωση.

2.6.1 Σχήματα φυσικής για την χερσαία (overland) και υποδόρια (subsurface) απορροή.

Η υποδόρια απορροή (ροή στο υπέδαφος) υπολογίζεται πριν τον υπολογισμό της χερσαίας ροής (overland flow) και αυτό διότι στην τελική ποσότητα του νερού το οποίο μέσω της διόδευσης (routing) θα υπολογιστεί ως ροή υδατορέματος στα κατάντη της υδρολογικής λεκάνης, προστείθεται πρώτα το κορεσμένο νερό απο τη διήθηση (infiltration excess) του νερού στο υπέδαφος καθώς και το νερό που προέρχεται απο τον κορεσμό του νερού στην επιφάνεια του εδάφους (saturation excess).

Η κίνηση του νερού στο υπέδαφος πριν την εκφόρτισή του υδροφόρου ορίζοντα στο υδατόρεμα διέπεται απο τους νόμους του Dupuit-Forschheimer για την κίνηση ροής σε ελεύθερους (φρεάτιους υδροφόρους ορίζοντες) έχει ως εξής (Gochis, 2013, 2018):

$q_{i,j} = -T_{i,j}\beta_{i,j}w_{i,j}$ όπου $\beta_{i,j} \quad < 0$ (2.6.1.2)

και $q_{i,j} = 0$ όπου $\beta_{i,j} \geq$ (2.6.1.3)

όπου $q_{i,j}$ η ροή σε διπλανές ψηφίδες του ΨΜΕ (ψηφιακού μοντέλου εδάφους)

όπου $-T_{i,j}$ η υδραυλική μεταβιβαστηκότητα μεταξύ των δυο κελιών

$\beta_{i,j}$ η στάθμη του νερού (water table)- η οποία υπολογίζεται ως η υδραυλική κλίση της πιεζομετρικής επιφάνειας

$w_{i,j}$ οι διαστάσεις της κάθε ψηφίδας του τοπογραφικού καννάβου (grid cell)

Η μεταβιβαστικότητα (transmissivity) εξαρτάται από την διαπερατότητα του εδάφους $Ksat_{ij}$ (saturated hydraulic conductivity) και το πάχος του εδαφικού ορίζοντα (D_{ij}) και ορίζεται ως εξής (Gochis, 2013,2018):

$T_{i,j} = \frac{K_{sat\,i,j}\ D_{i,j}}{n_{i,j}} \left(1 - \frac{Z_{i,j}}{D_{i,j}}\right)^{n_{i,j}}$ (2.7.1.4)

όπου $Z_{i,j} \leq D_{i,j}$

και $T_{i,j} = 0$ όπου $Z_{i,j} > D_{i,j}$

όπου z_{ij} το βάθος της στήλης του νερού και n_{ij} ορίζεται ως ένας εκθετικός συντελεστής μείωσης της $Ksat_{ij}$ συναρτήσει του βάθους (για λόγους διευκόλυνσης ισούται με μονάδα). δηλαδή η μεταβιβαστηκότητα στο κάθε κελί είναι ανάλογη του παράγοντα $\boldsymbol{Z_{i,j}}$ που είναι το βάθος της στήλης του νερού σε σχέση με το παχος του εδαφικού ορίζοντα

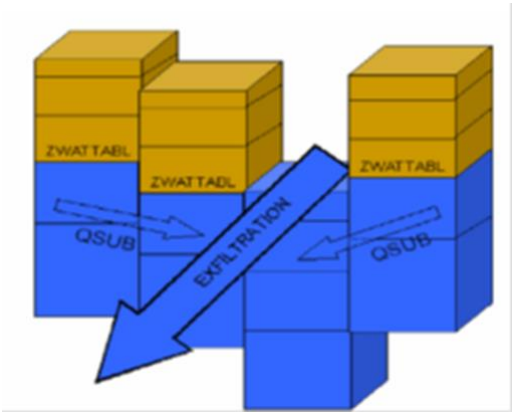
Η εξίσωση () όταν αντικατασταθεί στην πρώτη () τότε προκύπτει η εξίσωση της εκτίμηση της ροής στο υπέδαφος πλευρικά στην κάθε ψηφίδα της τοπογραφίας του μοντέλου (στο ΨΜΕ του υδρομετεωρολογικού μοντέλου) στην οριζόντια διεύθυνση x και στη διεύθυνση y

$Q_{NET\ I,J} = h_{i,j} \sum_x \gamma_{x\ (i,j)} + h_{i,j} \sum_y \gamma_{y\ (i,j)}$ *(2.7.1.5)*

όπου

$\gamma_{x\ (i,j)} = -\left(\frac{K_{sat\ i,j}\ D_{i,j}\ w_{i,j}}{n_{i,j}}\right) \beta_{i,j}$ όταν $\beta_{i,j} < 0$ (2.7.1.6)

και $h_{i,j} = \left(1 - \frac{Z_{i,j}}{D_{i,j}}\right)^{n_{i,j}}$ (2.7.1.7)

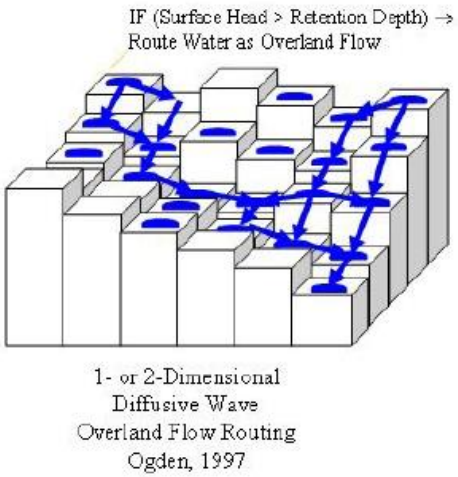


Σχήμα 17: Σχηματοποίηση της εκτίμησης της υποδόριας ροής (subsurface flow) στο υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro στην υδρολογική αναβάθμιση του υπομοντέλου εδαφους NOAH (Gochis, 2013, 2018).

2.6.2 Σχήμα φυσικής (routing physics) για τη διόδευση της επίγειας ροής (overland flow).

Σύμφωνα με τους Κουτσογιάννης, 1999 η διόδευση (flood routing) αποτελεί το φαινόμενο κατά το οποίο ένα πλημμυρικό κύμα αλλάζει τα χαρακτηριστικά του υδρογραφήματός του απο τα ανάντη μιας υδρολογικής λεκάνης στα κατάντη της και χρησιμοποιείται ως τεχνική για την εκτίμηση της χωροχρονικής εξέλιξης των χαρακτηριστικών μεγεθών ενός πλημμυρικού κύματος δηλαδή της παροχής και της στάθμης του νερού. Η διόδευση μπορεί να λαμβάνει υπόψη τα υδραυλικά χαρακτηριστικά ενός επιφανειακού υδροφορέα (πχ τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα) ή να είναι μια απλή υδρολογική διόδευση. Δηλαδή, γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά του υδρογραφήματος στην είσοδο της υδρολογικής λεκάνης υπολογίζεται ένα υδρογράφημα στην έξοδο της υδρολογικής λεκάνης και έτσι υπολογίζεται η χωρική και χρονική εξέλιξη των κύριων χαρακτηριστικών ενός υδρογραφήματος αλλά και η στάθμη του υδροφορέα στη διάρκεια μιας πλημμύρας (Κουτσογιάννης, 1999).

Οι υδραυλικές διοδεύσεις επιλύονται με τις δυναμικές εξισώσεις Saint Venant και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις συνθήκες ροής (ασταθής, μη ασταθής, ομοιόμορφη, μη ανομοιόμορφη ροή) οι οποίες χαρακτηρίζουν και την εξέλιξη της πλημμύρας (βραδεία/ταχεία).



Σχήμα 18: Σχηματοποίηση της εκτίμησης της επίγειας ροής στο υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro (Gochis, 2013,2018)

Στο υπομοντέλο εδάφους NOAH η επιφανειακή ροή προσεγγίζεται ως ένα δυναμικό κύμα διάχυσης όπως έχει περιγραφεί από τον Julien,1995 και τους Ogden, 1997 και ισχύουν οι εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της ορμής:

$$i_e = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial t} \text{ (2.7.2.1.)}$$

Η αποτελεί τη γραμμική εξίσωση συνέχειας, όπου h το βάθος ροής, q η παροχή και i_e οι πλευρικές εισροές (inflows) αποτέλεσμα της ροής που στην προκειμένη περίπτωση, στον υπολογισμό της επίγειας ροής απο ψηφίδα σε ψηφίδα στο υπομοντέλο εδάφους, από περίσσεια διήθησης (infiltration excess) όπως προαναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα (Gochis, 2018). Η εξίσωση συνδυάζεται με την η οποία αποτελεί τη εξίσωση ορμής (momentum) ή η εξίσωση διατήρησης της κίνσης και εφαρμόζεται με την προσέγγιση του δυναμικού μοντέλου (Julien 1995, Gochis, 2013 and 2018):

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} \qquad (2.7.2.2)$$

όπου $\boldsymbol{S_{fx}}$, είναι η κλίση της γραμμής ενέργειας, S_{ox} είναι η κλίση του πυθμένα (βάση του κελιού) του υδατορέματος που είναι ορισμένο στο υπομοντέλο εδάφους και ο παράγοντας $\frac{\partial h}{\partial x}$ εκφράζει τη μεταβολή της ροής (υδραυλικό φορτίο ,Κουτσογιάννης, 1999 σ. 93).

Οι απώλειες τριβών υπολογίζονται ως απώλειες των τριβών λόγω του τραχύτητας της επιφάνειας και υπολογίζονται με την εξίσωση του Manning :

$$q_x = a_x h^{\beta} \quad (2.7.2.3)$$

$$\alpha_\chi = \frac{S_{fx}^{1/2}}{n_{ov}}, \beta = \frac{5}{3} \qquad (2.7.2.4)$$

όπου n_{ov} είναι ο συντελεστής Manning, S_{fx} η κλίση της γραμμής ενέργειας και β ένας συντελεστής με μονάδες μέτρησης SI.

Η μαθηματική προσέγγιση της μονοδιάστατης ροής (1D) στο υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro δηλαδή η κίνηση του νερού στο υδατόρεμα (channel routing) προσεγγίζεται διόδευση του απλού κύματος διάχυσης (diffusive wave). Για την περίπτωση αυτή ισχύουν οι εξισώσεις διατήρησης της ορμής και η εξίσωση της συνέχειας λαμβάνοντας υπόψη τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδατορέματος :

Η εξίσωση συνέχειας (continuity equation):

$$q_{lat} = \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x}$$

(2.7.2.5)

όπου A η επιφάνεια της υγρής διατομής της ψηφίδας του υπομοντέλου εδάφους NOAH (gridded routing) , Q η παροχή κατά μήκος του κύριου άξονα x, q_{lat} η πλευρική παροχή ανά μονάδα μήκους και t η μονάδα μέτρησης του χρόνου.

Η εξίσωση διατήρησης γραμμικής ορμής (momentum):

$$-gAS_f = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} + gA\,\frac{\partial Z}{\partial x}$$

(2.7.2.6)

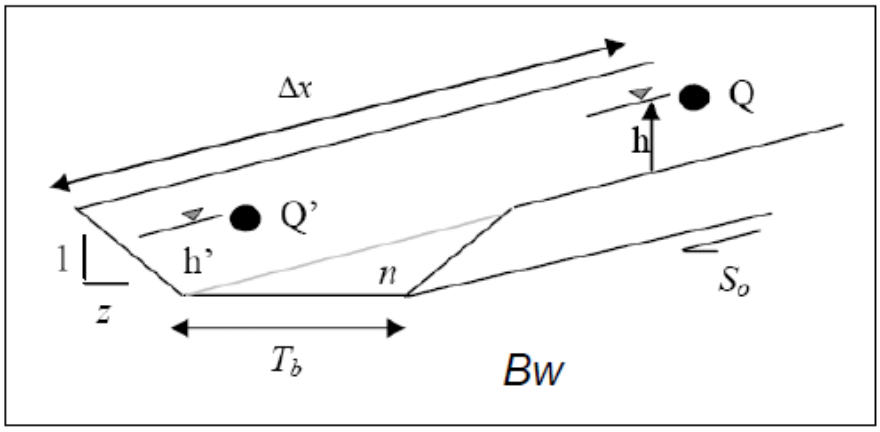
όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας, β ένας συντελεστής διόρθωσης της ορμής Z το βάθος της στάθμης του νερού και S_f η κλίση της γραμμής ενέργειας (η κλίση κατα την οποία μειώνωνται οι τριβές απώλειας λόγω της τραχύτητας επιφάνειας) η οποία υπολογίζεται ως το τετράγωνο του κλάσματος της παροχής κατά μήκος του κύριου άξονα x προς τη παροχετευτική ικανότητα K του υδατορέματος (Κουτσογιάννης, 1999, Gochis et al, 2013&2018):

$$s_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \quad (2.7.2.7)$$

και η παροχετευτική ικανότητα του υδατορέματος K υπολογίζεται ως εξής:

$$K = \frac{c_m}{n} AR^{2/3} \quad (2.7.2.8)$$

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μονοδιάστατης διόδευσης ροής 1D, περιγράφονται παρακάτω σχήμα όπου So η κλίση της επιφάνειας του ρέματος, Δχ το μήκος του μοντελοποιημένου τμήματος του ρέματος (modelled reach), z οι κλίσεις των παρόχθιων περιοχών, το πλάτος του κελιού Bw και n ο συντελεστής τραχύτητας .



Σχήμα 19: Χαρακτηριστικά της κοίτης υδατορέματος τα οποία λ αμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της παροχής στο υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro μέσω της διόδευσης ροής (Gochis et al, 2013, 2018).

2.6.3.Η αυτόνομη λειτουργία GIS Pre-processing toolbox για την εισαγωγή του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους υψηλής ανάλυσης στο υδρομετεωρολογικό μοντέλο Wrf-Hydro.

Μια απο τις υδρολογικές αναβαθμίσεις του υδρομετεωρολογικού μοντέλου WRF-Hydro, αποτελεί η 'σύνδεσή' του με ένα αυτόνομο σύστημα GIS μέσω του οποίου γίνεται ο υπολογισμός υδρολογικών μεταβλητών σε κλίμακα υψηλής ανάλυσης. Μέσω αυτής της επεξεργασίας εισάγονται δυο στοιχεία:

Το GEOGRID αρχείο σε netCDF μορφή σε χαμηλή κλίμακα ανάλυσης (τάξεως χιλιομέτρων) που παράγεται απο το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF και περιέχει τις εξής παραμέτρους:

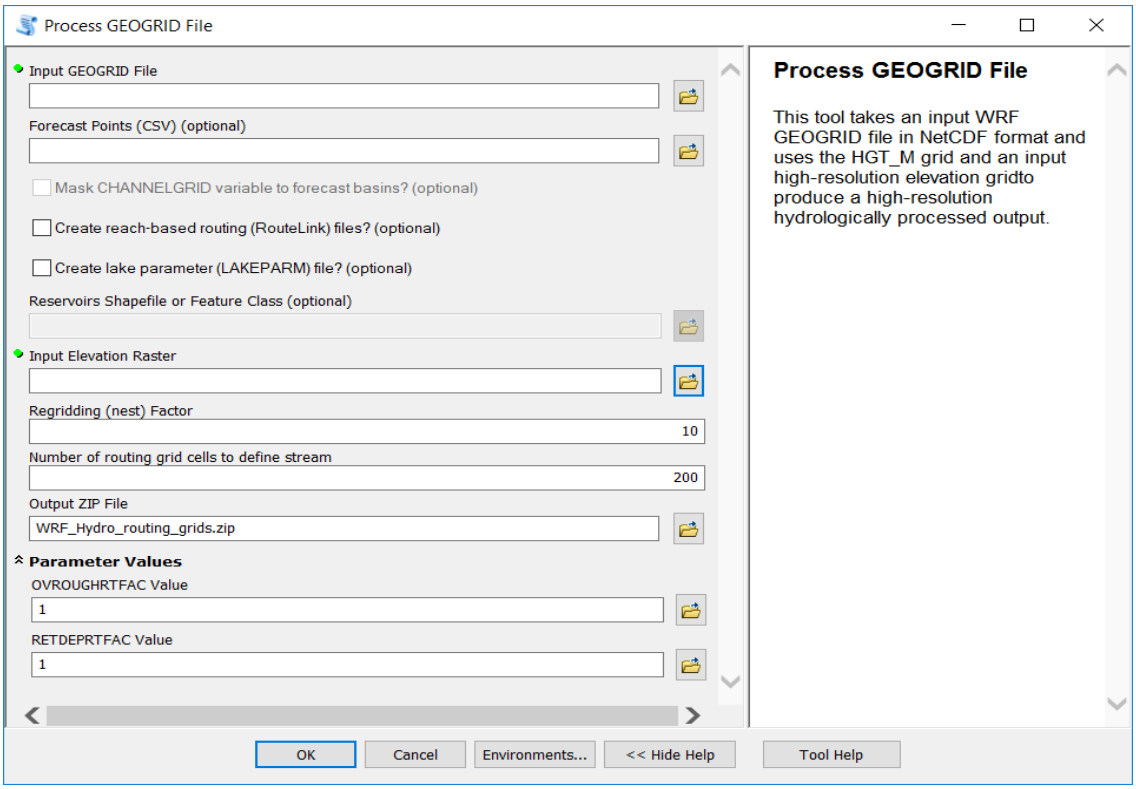
-Τοπογραφία χαμηλής ανάλυσης πλεγματικής μορφής

-Γεωγραφικές συντενταγμένες των τομέων μοντελοποίησης

Φυσικές παράμετροι σε πλεγματική μορφή όπως το ποσοστό εδαφικής υγρασίας, η θερμοκρασία εδάφους, το πάχος χιονοκάλυψης και άλλες παραμέτρους που χρησιμοποιούνται κυρίως απο το υπομοντέλο εδάφους NOAH.

Το δεύτερο στοιχείο που εισάγεται στην εφαρμογή αυτή είναι το ΨΜΕ υψηλής ανάλυσης το οποίο έχει επεξεργαστεί κατάλληλα για την εκτίμηση των υδρολογικών επιπέδων χρησιμοποιώντας τους αλγόριθμους ροής του GIS. Το ΨΜΕ μπορεί να επιλεχθεί απο διάφορες πηγές: για τη συγκεκριμένη μελέτη επιλέχθηκε απο τη βάση δεδομένων HYDROSHEDS με ανάλυση ψηφίδας περίπου 100m. Για να εισαχθεί το ΨΜΕ στο GIS Preprocessing toolbox θα πρέπει να είναι υδρολογικά επξεργασμένο ώστε η τοπογραφία να απεικονίζει τους κύριους υδρογραφικούς κλάδους της υδρολογικής λεκάνης. Σε πολλές περιπτώσεις όμως αυτό δε συμβαίνει για διάφορους λόγους. Ένας απο τους λόγους είναι η ανάλυση του ΨΜΕ η οποία όταν δεν είναι λεπτομερής δεν μπορεί να απεικονίσει με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της κοίτης των υδρογραφικών κλάδων. Επίσης, η πηγή δημιουργίας του ΨΜΕ επηρρεάζει την ποιότητα της ακρίβειας του. Για παράδειγμα οι Li and Wong, 2010 διέκριναν μια συστηματικά καλύτερη απεικόνιση των υδρογραφικών κλάδων στα LIDAR DEM σε σχέση με τα SRTM DEMS.

Στην προκειμένη περίπτωση το HYDROSHEDS γεωαναφέρθηκε σε σύστημα Lambert Conformal Conic για την εισαγωγή το στο υδρομετεωρολογικό μοντέλο και ορίστηκε μια υποπεριοχή (domain) που αποτελεί τα όρια του υποτομέα μοντελοποίησης D04 του υδρομετεωρολογικού μοντέλου (τα όρια της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού ποταμού όπως φαίνεται στο **χάρτη 1**).



Σχήμα 20: Η εφαρμογή στην οποία εισάγονται η πλεγματική δομή της τοπογραφίας που έχει δημιουργηθεί με το ατμοσφαιρικό μοντέλο σε nc μορφή (Input GEOGRID file) και το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους υψηλότερης ανάλυσης (Input elevlation raster) για τη δημιουργία υδρολογικών θεματικών επιπέδων υψηλής ανάλυσης για τον υπολογισμό της παροχής και της στάθμης νερού στο υδρογραφικό δίκτυο (WRF-Hydro output routing high resolution grids).

Η τεχνική που εφαρμόζεται ονομάζεται regridding, σημαίνει αλλαγή ανάλυσης (changing resolution) και ελέγχεται απο το χρήστη με κάποιους σταθμισμένους συντελεστές (weighting factors) οι οποίοι καθορίζουν το cell size του υδρολογικά αναβαθμισμένου ΨΜΕ και των λοιπών υδρολογικών θεματικών επιπέδων που αξιοποιούνται απο το υδρομετεωρολογικό μοντέλο.

Η ανάλυση με την οποία παράγονται τα διάφορα υδρολογικά επίπεδα βασίζεται στη τεχνική regridding, δηλαδή ορίζεται ένας παράγοντας (regridding factor) 10 ή 100 με τον οποίο το πλέγμα χαμηλότερης ανάλυσης του αρχείου εισόδου geogrid αναλύεται για την υδρολογική προσομοίωση σε πλέγμα υψηλότερης ανάλυσης (για παράδειγμα όταν η αρχική τοπογραφία που εισάγεται στο υπομοντέλο εδάφους είναι ανάλυσης 1km τότε με το εργαλείο αυτό ο τελικός υψομετρικός κάνναβος για την υδρολογική ανάλυση και εκτίμηση των υδρολογικών παραμέτρων με το WRF-HYDRO θα είναι ανάλυσης 1000m/10=100m.

Έτσι βελτιστοποιείται η εκτίμηση της ακρίβειας των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών απο την μεγαλύτερη ανάλυση (τάξεως χιλιομέτρων) του υπομοντέλου εδάφους NOAH στη μικρότερη ανάλυση (τάξεως μέτρων). Επόμενο βήμα στην εφαρμογή GIS-Preprocessing toolbox είναι ο ορισμός του regridding factor και της τιμής του κατωφλίου flow accumulation σύμφωνα με την οποία ορίζεται η έκταση των υδρολογικών λεκανών (και η ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου). Ο regridding factor καθορίζει την ανάλυση του τελικού αποτελέσματος των ψηφίδων σε σχέση με το εισαγόμενο raster (100km) και της αρχικής τοπογραφίας (HGT_M 1km). Στην προκειμένη περίπτωση ισούται με 1000m/100m=10. Όλα τα αποτελέσματα θα έχουν στη τελική τους επεξεργασία συντελεστή στάθμισης /10 θα αναλυθούν δηλαδή κατά 10 φορές περισσότερο σε σχέση με την αρχική ανάλυση του μετεωρολογικού μοντέλου.

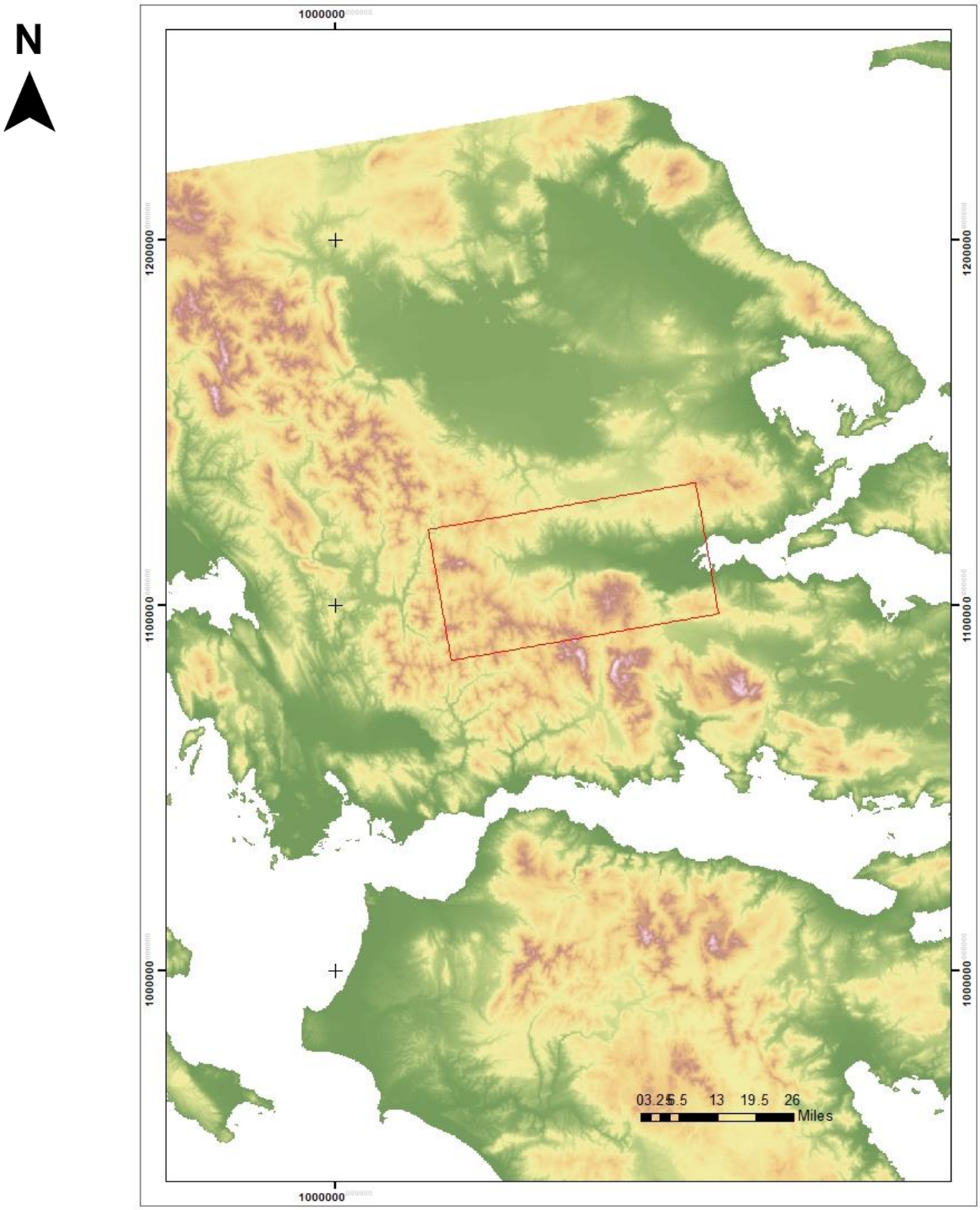
Έτσι με το GIS preprocessing toolbox παράγονται σε υψηλή ανάλυση τα εξής:

- Κάνναβος υψηλής ανάλυσης (high resolution) με το υδρογραφικό δίκτυο (CHANNELGRID σχήμα 20)
- Κάνναβος κατεύθυνσης ροής (FLOW DIRECTION GRID σχήμα 21)
- Κάνναβος συγκέντρωσης ροής υψηλής ανάλυσης (FLOW ACCUMULATION GRID)
- Κάνναβος υψηλής ανάλυσης με τη τάξη των υδρογραφικών κλάδων (STREAM ORDER σχήμα 22)

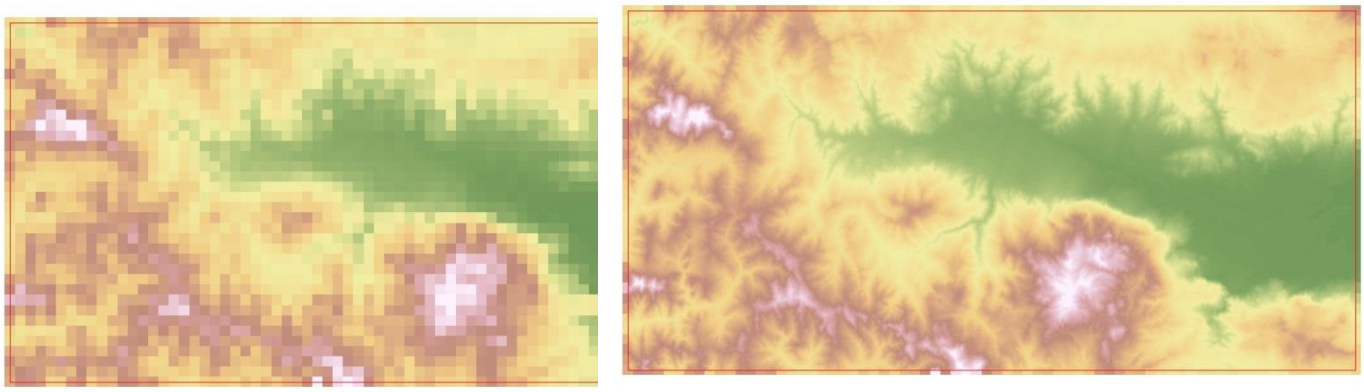
Πλέγμα υψηλής ανάλυσης τοπογραφίας (HIGH RESOLUTION TOPOGRAPHY σχήμα 19)

και άλλα επίπεδα υψηλής ανάλυσης όπως (LAKEGRID, LATITUDE, LONGITUDE, BASIN) καθώς και το επίπεδο υψηλής αναλυσης με τις χρήσεις γης LANDUSE (σχήμα 23).

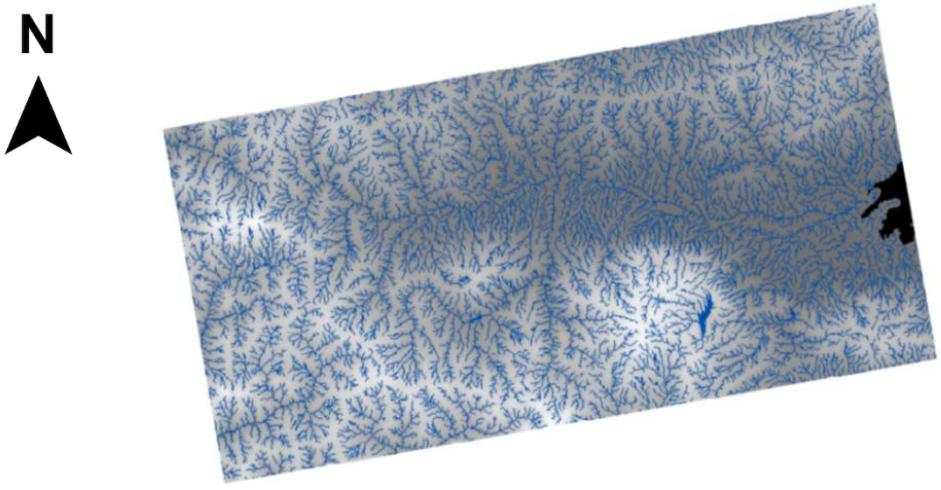
Τα παραπάνω επίπεδα εισάγονται στο υδρομετεωρολογικό μοντέλο για τον υπολογισμό της παροχής, της στάθμης νερού και της εκτίμησης της συνεισφοράς των άλλων υδρολογικών διεργασιών (επιφανειακή και υπεδάφια ροή, υγρασία εδάφους).



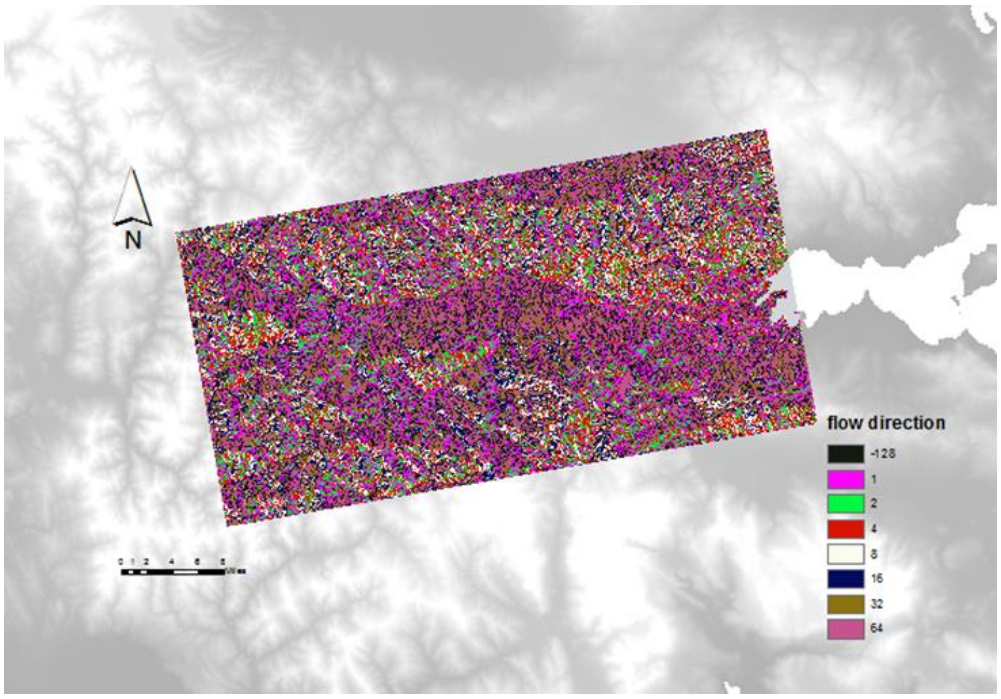
Χάρτης 1: Ορισμός του τομέα μοντελοποίησης (model domain) στο ΨΜΕ υψηλής ανάλυσης (100 km cell size) με το GIS σε σύστημα αναφοράς Lambert Conformal Conic.



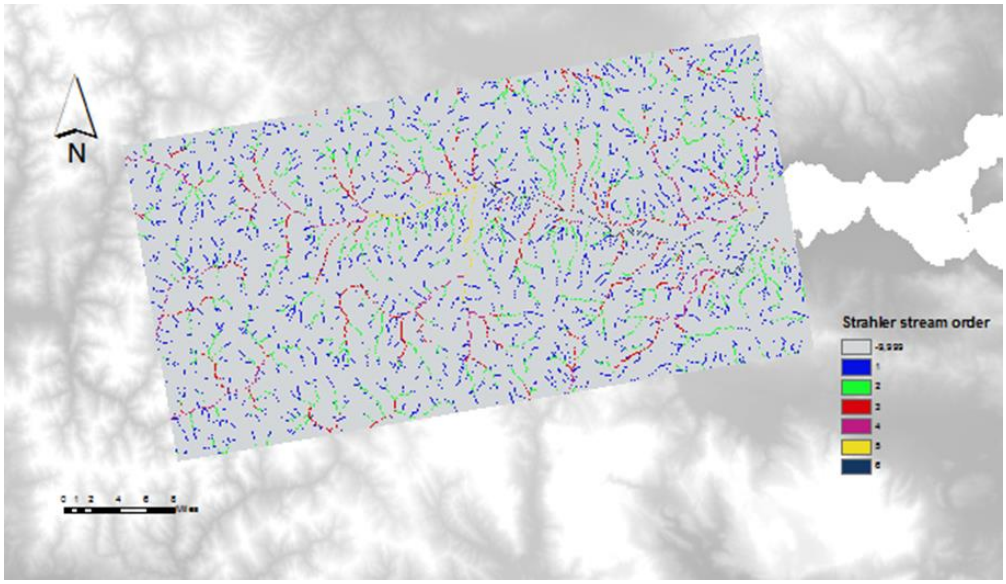
Σχήμα 21: Η τοπογραφία που εισάγεται στο GIS preprocessing toolbox που προέρχεται απο το GEOGRID netCDF αρχείο (πλεγματικό αρχείο του ατμοσφαιρικού μοντέλου) και δεξιά η εισαγωγή του ΨΜΕ υψηλής ανάλυσης για την παραγωγή των υδρολογικών επιπέδων υψηλής ανάλυσης (high resolution routing grids) που θα εισαχθούν στο WRF-Hydro. Η ανάλυση της ψηφίδας της τοπογραφίας αριστερά ισούται με 1km ενώ η ανάλυση του ΨΜΕ δεξιά ισούται με 100m.



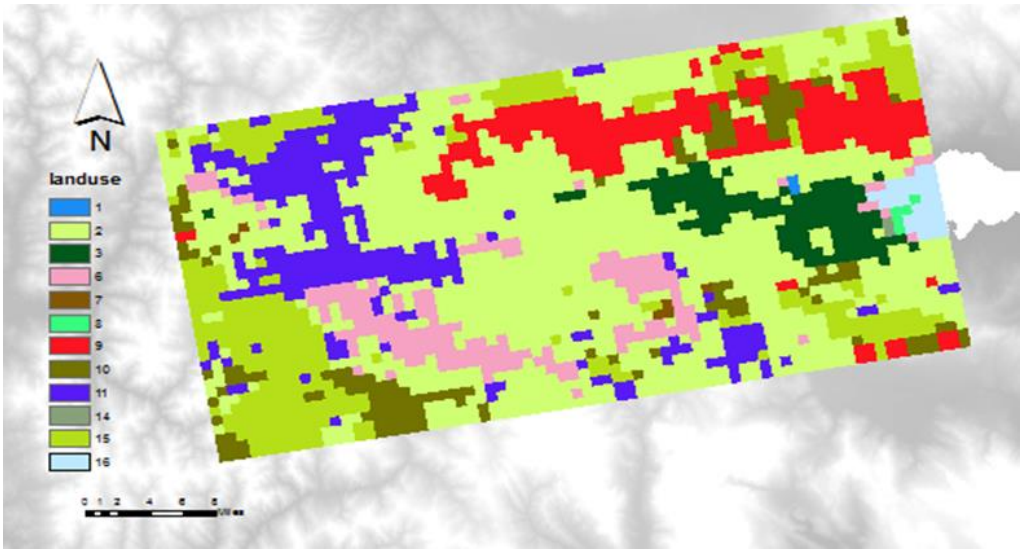
Σχήμα 22: Απεικόνιση του υδρογραφικού δικτύου της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού ποταμού ως μεταβλητή εξόδου του GIS preprocessing toolbox για την μετέπειτα χρησιμοποίησή του απο το υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro.



Σχήμα 23: Απεικόνιση της εκτίμησης της κατεύθυνσης ροής (flow direction) ου εισάγεται στο υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro.



Σχήμα 24: Οι τάξεις κατά Strahler του υδρογραφικού δικτύου που παράγονται απο το GIS preprocessing toolbox ως δεδομένο εισόδου στο υδρομετεωρολγικό μοντέλο WRF-Hydro.



Σχήμα 25: Οι χρήσεις γης που χρησιμοποιούνται απο το μοντέλο WRF-Hydro σύμφωνα με τη ταξινόμηση της USGS.

Land Use Category	Land Use Description
1	Urban
2	Dryland
3	Irrigated
4	Mixed Dryland/ Irrigated Cropland and Pasture
5	Cropland / Grassland
6	Cropland/ Woodland
7	Grassland
8	Shrubland
9	Mixed Shrubland

10	Savanna
11	Deciduous Broadleaf Forest
12	Deciduous Needleleaf Forest
13	Evergreen Broadleaf
14	Evergreen Needleleaf
15	Mixed Forest
16	Water Bodies
17	Herbaceous Wetland
18	Wooden Wetland
19	Barren or Sparsely vegetated
20	Herbaceous Tundra
21	Wooded Tundra
22	Mixed Tundra
23	Bare Ground Tundra
24	Snow or Ice

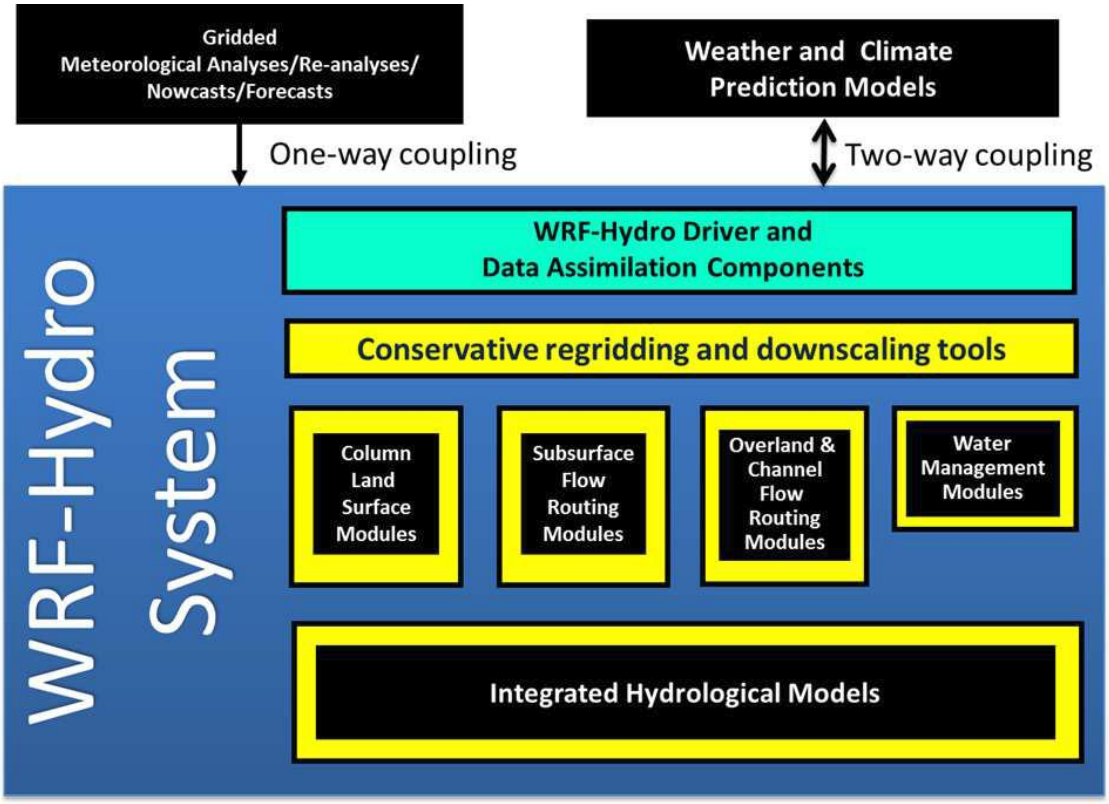
Πίνακας 1: Οι χρήσεις γης που χρησιμοποιούνται στο WRF-Hydro ανάλογα με τη ταξινόμηση της USGS.

Αξίζει να σημειωθεί οτι χωρίς τις υδρολογικές αναβαθμίσεις του υπομοντέλου εδάφους NOAH και την εισαγωγή της αυτόνομης λειτουργίας του GIS η εκτίμηση της απορροής και της στάθμης του νερού στην κοίτη των υδρογραφικών κλάδων δεν θα ήταν δυνατή. Οι παραπάνω λειτουργίες εισήχθηκαν στο σύστημα του πυρήνα WRF-ARW και στο υπομοντέλο εδάφους NOAH ως εξελίξεις στην ολική εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου και των υδρολογικών παραμέτρων όχι

μόνο στη διάρκεια ενος πλημμυρικού γεγονότος αλλά στη διάρκεια ενος υδρολογικού έτους και παρακολουθώντας την υδρολογική απόκριση της λεκάνης για μεγάλύτερα χρονικά διαστήματα.

Οι χρήσεις γης που παράγονται με το GIS preprocessing toobox επίσης εχει γίνει τροποποίηση της ανάλυσής τους με τη μέθοδο regirdding ώστε να συμπίπτει με την ανάλυση του ΨΜΕ. Έτσι η ανάλυση του ΨΜΕ επειδή είναι 100m τότε και οι χρήσεις γης που θα χρησιμοποιηθούν απο το υδρομετεωρολογικό μοντέλο θα έχουν ανάλυση ίση με 100m.

2.6.4.Το υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro.



Σχήμα 26: Η δομή του υδρομετεωρολογικού συστήματος WRF-Hydro.

Το υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro παρέχει τη ρύθμιση πολλαπλών σχημάτων φυσικής (multiphysics options) δίνοντας στο χρήστη να επιλέξει επίσης τη ρύθμιση πολλαπλών επιλογών κλίμακας προσομοίωσης των διεργασιών (multi scale physics) μέσω της επιλογής χρήσης πολλαπλών εμφωλιασμένων πλεγμάτων (nested grids) συνδυάζοντας δηλαδή τη λειτουργία πολλών υπο τομέων μοντελοποίησης μαζί (nested modelling domains). Το υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro μπορεί να προσομοιώσει τις διεργασίες του υδρολογικού κύκλου σε υψηλή κλίμακα ανάλυσης και λειτουργεί είτε συζευγμένο με το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF είτε χωρίς την επίδραση του ατμοσφαιρικού μοντέλου ή οποιουδήποτε άλλου κλιματικού μοντέλου. Μπορεί να λειτουργήσει εισάγοντας επεξεργασμένα δηλαδή ‘στατικά’ πλεγματικά μετεωρολογικά δεδομένα και να προσομοιώσει τις διεργασίες του υδρολογικού κύκλου σε υψηλή ανάλυση , μια λειτουργία που επιτυγχάνεται μέσω του υδρολογικά αναβαθμισμένου κώδικα του υπομοντέλου NOAH και χάρη στην εισαγωγή της υψηλής ανάλυσης ΨΜΕ με το GIS–preprocessing toolbox. Μπορεί να λειτουργήσει ως ένα πλήρως αυτόνομο μοντέλο ατμόσφαιρας-χερσαίου οικοσυστήματος για τη μελέτη του υδρολογικού κύκλου (standalone, offline coupling) χωρίς να λειτουργεί παράλληλα με το

ατμοσφαιρικό μοντέλο για την μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ χερσαίου οικοσυστήματος-υδρόσφαιρας –ατμόσφαιρας όπως γίνεται και στην περίπτωση της συζευγμένης ρύθμισής του.

Οι ρυθμίσεις του WRF-Hydro των σχημάτων φυσικής και ο κώδικάς του είναι πλήρως παραλληλοποιημένος σύμφωνα με το πρωτόκολλο του MPI (Message Passage Inofrmation) και φορητός δίνοντας τη δυνατότητα χρήσης του λογισμικού είτε απο μονάδα HPC είτε χρησιμοποιώντας laptop.

2.6.5. Μεταβλητές εισόδου και εξόδου στο wrf-Hydro.

Ως δεδομένα εισόδου το WRF-Hydro χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα των ατμοσφαιρικών προσομοιώσεων με το WRF και κάποιες απο τις μεταβλητές είναι οι εξής:

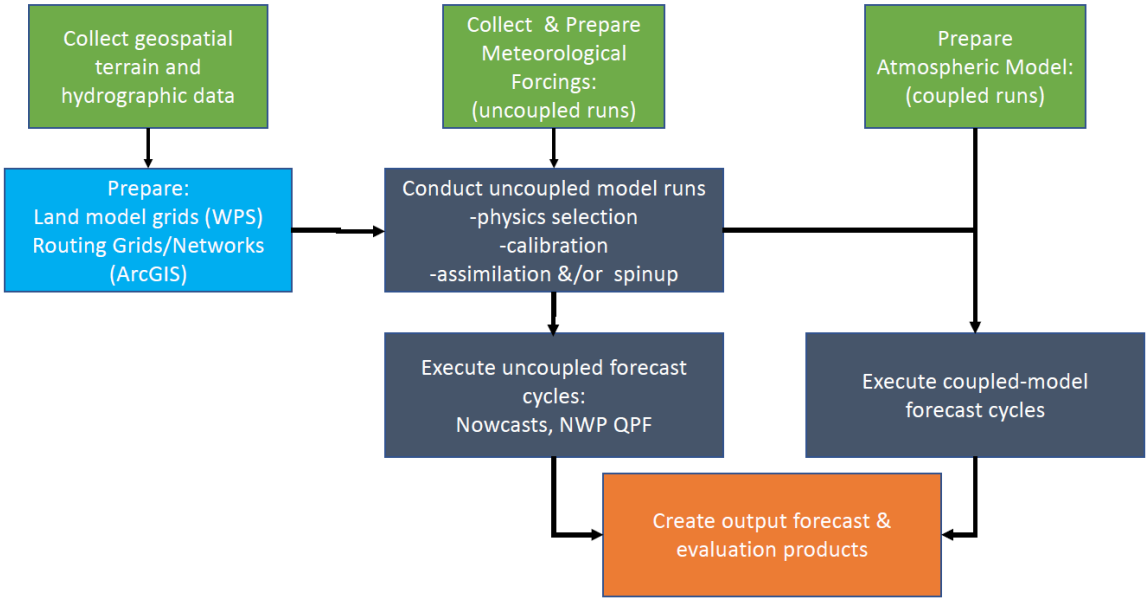
ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ	**ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ**
Ακτινοβολία μικρού μήκους (shortwave radiation)	(W/m^2)
Ακτινοβολία μεγάλου μήκους (longwave radiation)	(W/m^2)
Ειδική υγρασία (specific humidity)	(kg/kg)
Θερμοκρασία αέρα (air temperature)	(K)
Ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια εδάφους (surface pressure)	(Pa)
Συνιστώσες ανέμου (near surface wind in u- and v- components)	(m/sec)
Ρυθμός βροχόπτωσης (precipitation rate)	(mm/sec)
Τοπογραφία (topography)	meters
Flow direction raster Ψηφιδωτό επίπεδο διεύθυνσης ροής	meters

Flow accumulation raster Ψηφιδωτό επίπεδο συγκέντρωσης ροής	raster grid
Stream order Ψηφιδωτό επίπεδο με τις τάξεις ροής	raster grid
Land Use Χρήσεις γης	raster grid
Geographical coordinates (grids of lat/lon)	lat/lon

Πίνακας 2: Μεταβλητές εισόδου στο υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ	**ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ**
Αισθητή ροή θερμότητας (Sesnisble Flux)	Wm^2
Λανθάνουσα ροή θερμότητας (Latent Flux)	Wm^2
Διαπνοή (Transpiration)	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
Εξάτμιση (Evaporation)	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
Υγρασία εδάφους (Soil moisture)	$m^3\ /m^{-3}$
Βάθος επιφάνειας χιονοκάλυψης (Snow depth)	m
Παροχή στα υδατορέματα (Channel flow rate)	m^3/sec
Στάθμη παροχής στους υδατοταμιευτήρες Reservoir height and Discharge	m

Πίνακας 3: Μεταβλητές εξόδου που παράγονται με τις προσομοιώσεις του υδρομετεωρολογικού μοντέλου WRF-Hydro.



Διάγραμμα 1: Γενικό διάγραμμα ροής διεργασιών στο WRF-Hydro.

Οι μεταβλητές του ατμοσφαιρικού μοντέλου WRF και οι μεταβλητές του υπομοντέλου εδάφους NOAH αρχικά επεξεργάζονται κατάλληλα ώστε να εισαχθούν σε πλεγματική μορφή με ανάλυση ανάλογη της ανάλυσης των υποτομέων μοντελοποίησης και αυτή η επεξεργασία μπορεί να διαρκέσει αρκετές ώρες. Στο στάδιο αυτό εισάγονται επίσης πλεγματικής μορφής δεδομένα όπως η επιφανειακή ροή (overland flow) και πλευρική/υποδόρια απορροή (subsurface flow), τοπογραφία χαμηλότερης ανάλυσης που καλύπτει την περιοχή μοντελοποίησης και άλλες μετεωρολογικές παράμετροι και εδαφικές παράμετροι (πχ ποσοστό υγρασίας εδάφους).

Επίσης για τον υπολογισμό της παροχής συλλέγονται δεδομένα παρατηρήσεων όπως χρονοσειρές παροχής (για τη μετέπειτα σύγκριση των αποτελεσμάτων), ΨΜΕ ψηφιακό μοντέλο εδάφους υψηλής ανάλυσης.

Το υδρομετεωρολογικό μοντέλο μπορεί αρχικά να χρησιμοποιηθεί για τη βαθμοονόμηση των υδρολογικών διεργασιών και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του σε σχέση με όλες τις παραμετροποίησεις και τα δεδομένα εισόδου που έχουν επιλεχθεί (model calibration and model spin up).

3. Το μοντέλο απορροής-βροχόπτωσης ισόχρονων καμπύλων GIS

Η μέθοδος των ισόχρονων καμπύλων βασίστηκε στη μέθοδο του ιστογράμματος χρόνου-επιφάνειας (time –area method) όπου η λεκάνη χωρίζεται σε περιοχές οι οποίες αντιπροσωπεύουν ίσο χρόνο απορροής απο την έξοδό της – τις ισόχρονες ζώνες. Η ένταση και ο χρόνος της βροχόπτωσης ισούται με το χρόνο συγκέντρωσης της υδρολογικής λεκάνης έτσι ώστε να συνυπολογίζονται ταυτόχρονα οι χρόνοι που χρειάζεται η λεκάνη να γεμίσει και ο χρόνος που χρειάζεται μέχρι και η τελευταία υδροσταγόνα για να αδιάσει στον κάθε χρονικό παλμό βροχόπτωσης.

Κύριος στόχος του μοντέλου απορροής βροχόπτωσης είναι ο μετασχηματισμός των σεναρίων βροχόπτωσης σε απορροή και στον υπολογισμό του μοναδιαίου υδρογραφήματος για το πλημμυρικό γεγονός. Έτσι κατασκευάζονται τα πρότυπα απορροής για κάθε σενάριο βροχόπτωσης (Πέντερης, 2017).

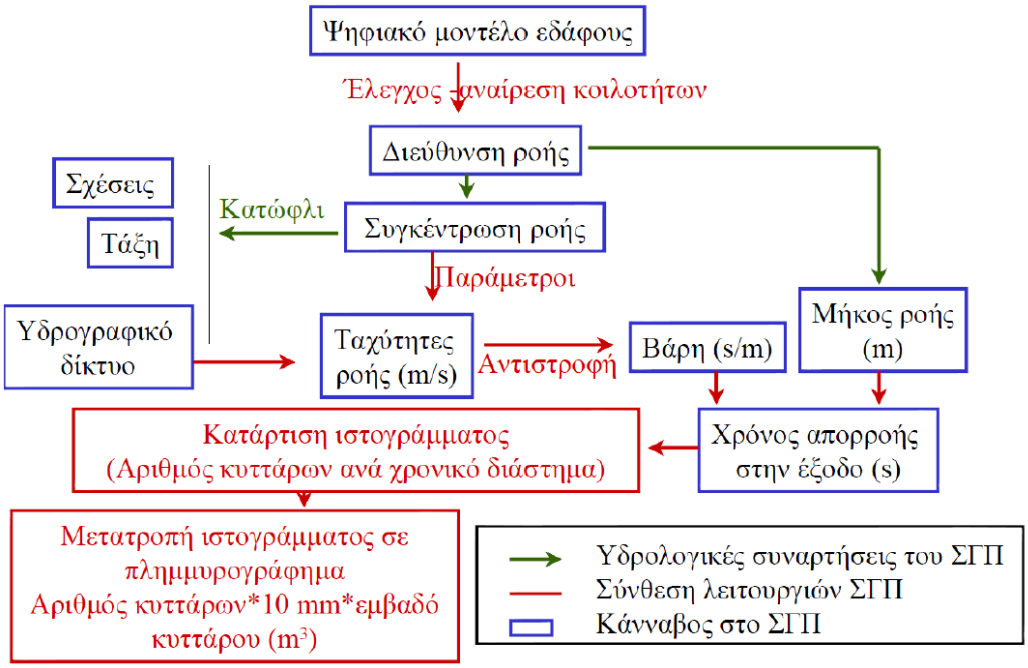
Στο ΨΜΕ ορίζεται η περιοχή μελέτης ως μια ‘μάσκα’ (Extract by mask). Για τον υπολογισμό των ισόχρονων καμπυλών ουσιασικά υπολογίζεται το μήκος απορροής της κάθε ψηφίδας του ΨΜΕ καθώς και η ταχύτητα ροής απο την έξοδο της υδρολογικής λεκάνης. Ο λόγος των δυο μεγεθών εν τέλει δίνει το χρόνο συγκέντρωσης της κάθε ψηφίδας του ΨΜΕ απο την έξοδο της υδρολογικής λεκάνης.

Η ταχύτητα της απορροής στο συγκεκριμένο μοντέλο εμφανίζεται ως η σύνθεση δυο διαφορετικών θεματικών επιπέδων: της ταχύτητας υδρογραφικού δικτύου και της χερσαίας ταχύτητας. Στο GIS οι δυο ταχύτητες υπολογίζονται για την ορισμένη περιοχή μελέτης στο ΨΜΕ λαμβάνοντας υπόψη τα εξής χαρακτηριστικά:

- την τοπογραφία της κάθε ψηφίδας του ΨΜΕ
- τις χρήσεις γης
- το συντελεστή τραχύτητας εδάφους

Οι δυο ταχύτητες διαφέρουν στις τιμές τους εφόσον η μία (ταχύτητα υδρογραφικού δικτύου) προσεγγίζει την ταχύτητα του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης και άρα είναι μεγαλύτερη της χερσαίας ταχύτητας. Πρώτα υπολογίζονται με το GIS τα θεματικά επίπεδα του υδρογραφικού

δικτύου και των τάξεων του υδρογραφικού δικτύου εφόσον ο υπολογισμός της ταχύτητας ροής είναι συνάρτηση αυτών των δυο παραμέτρων στο μοντέλο.



Διάγραμμα 2: Ροή εργασιών για το μοντέλο ισόχρονων καμπυλών (Μαμάσης, 2007).

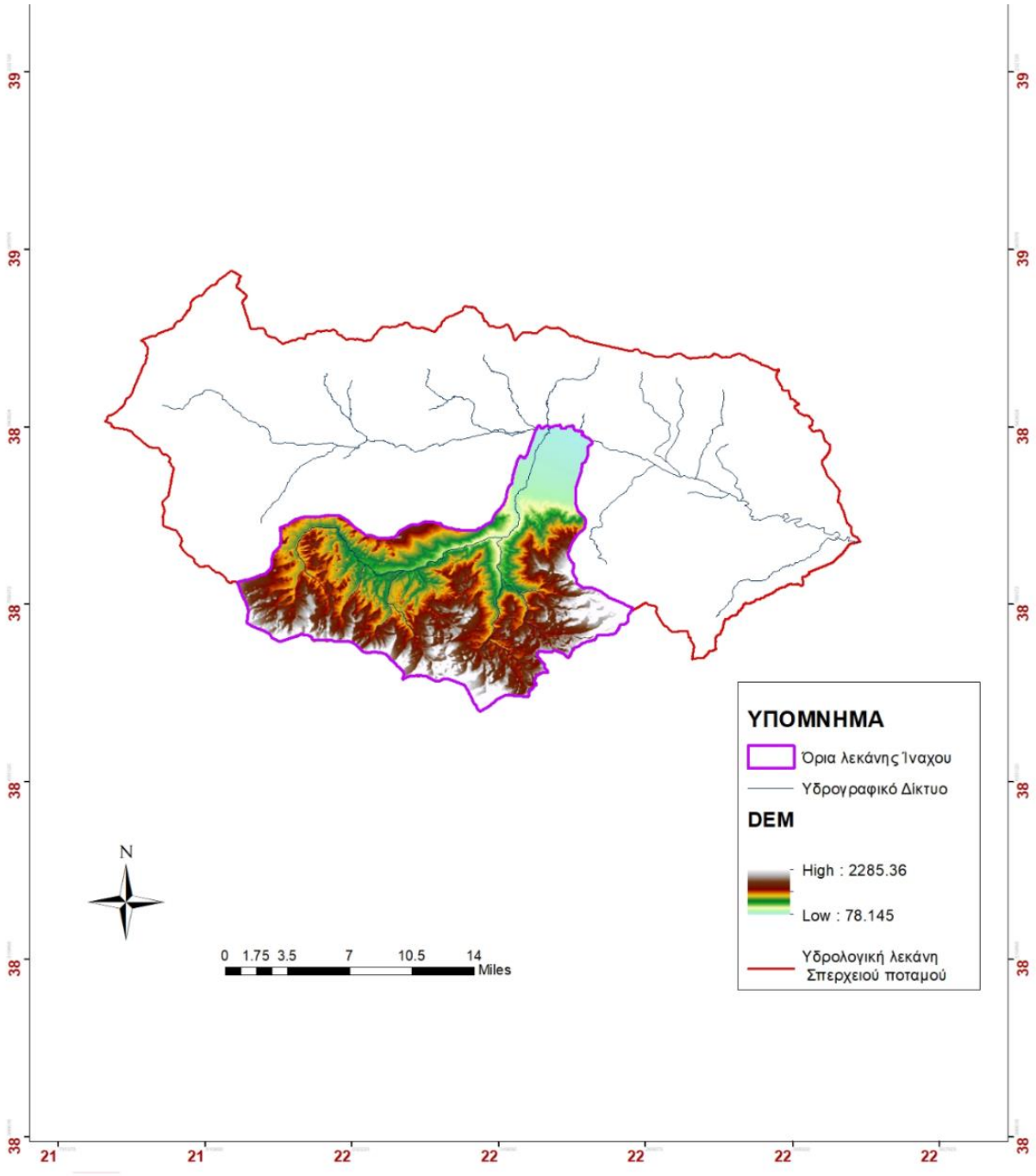
3.1. Δεδομένα εισόδου για το μοντέλο ισόχρονων καμπυλών.

3.1.1Το Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης.

Για την εκτίμηση των ισόχρονων καμπυλών με το GIS χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό μοντέλο εδάφους με ανάλυση ψηφίδας (cell size= 25m) το οποίο δημιουργήθηκε απο την Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού. Στην περιοχή μελέτης του Ίναχου ποταμού εφαρμόστηκε μάσκα 'Spatial Analyst- Extract by mask' για την οριοθέτηση της περιοχής μελέτης δηλαδή την οριοθέτηση της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού. Πολλοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει τα ΨΜΕ για υδρολογική ανάλυση όπως οι Maidment, 1996, Maidment & Olivera, 1999 για την ανάπτυξη υδρολογικών χωρικά κατανεμημένων μοντέλων για την εκτίμηση του μοναδιαίου υδρογραφήματος, οι Horitt and Bates, 2001 για την υδραυλική μοντελοποίηση των πλημμυρών, οι Li and Wong, 2010 στην προσομοίωση των πλημμυρών καθώς και οι Diakakis et al, 2014 στην εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας με GIS εφαρμογές.

Πιο συγκεκριμένα, οι Li and Wong, 2010 για την υδρολογική ανάλυση του ΨΜΕ της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Kansas χρησιμοποίησαν ΨΜΕ απο διαφορετικές πηγές και διαφορετικής ανάλυσης κανάβου για τη διερεύνηση της επίδρασης των παραγόντων αυτών στην εκτίμηση της διεύθυνσης ροής (flow direction), της συγκέντρωσης ροής (flow accumulation) και στην προσομοίωση των πλημμυρών (flood simulation). Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν ΨΜΕ απο την USGS (10m resolution & 30m resolution), ΨΜΕ απο SRTM ανάλυσης 30m και το ΨΜΕ που προήλθε απο LIDAR το οποίο είναι υψηλότερης ανάλυσης (2m resolution). Συμπέραναν οτι τα ΨΜΕ που προέρχονται απο LIDAR (2m resolution) παράγουν καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με το ΨΜΕ που προήλθε απο SRTM (Shutle Radar Terrestrial Mission Topography) στην παραγωγή του υδρογραφικού δικτύου (flow direction, flow accumulation) καθώς και στην προσομοίωση των πλημμυρών (flood simulations). Παρόλα αυτά, μειώνονας την ανάλυση του κανάβου στο LIDAR ΨΜΕ δηλαδή απο 2m σε 10m και 30m για τη σύγκρισή τους, τότε τα αποτελέσματα των προσμοιώσεων δεν ήταν ικανοποιητικά.

Εντούτοις, στην περίπτωση μείωσης της ανάλυσης του κανάβου με τη μέθοδο resampling στο GIS την καλύτερη απόδοση πέτυχε το ΨΜΕ χαμηλότερης ανάλυσης δηλαδή 10m και 30m της USGS. Η μελέτη αυτή συμπεραίνει οτι τα ΨΜΕ υψηλότερης ανάλυσης όπως τα LIDAR παρουσιάζουν πιο κατάλληλα για υδρολογικές αναλύσεις αλλά γενικότερα όταν η ανάλυση των ΨΜΕ τροποποιείται μετέπειτα για διάφορους λόγους τότε οι αποδόσεις των ΨΜΕ διαφέρουν ανάλογα με την προέλευση του κάθε ΨΜΕ (Li and Wong, 2010).



Χάρτης 2: Το ΨΜΕ της υδρολογικής λεκάνης της περιοχής μελέτης (Ίναχος-Βίστριτσα). Με κόκκινο σημειώνονται τα όρια της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού ποταμού.

3.1.2. Κατασκευή του καννάβου με τους συντελεστές τραχύτητας εδάφους.

Πριν τη δημιουργία των θεματικών χαρτών για το μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής χρειάστηκε η κατασκευή του χάρτη συντελεστή τραχύτητας εδάφους. Ο χάρτης της τραχύτητας του εδάφους μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κατανεμημένο ψηφιδωτό μοντέλο (raster) συντελεστών τραχύτητας εδάφους. Η αντιστοιχία των χρήσεων-γης του συντελεστή τραχύτητας έγινε κυρίως στηριζόμενη σε προηγούμενες μελέτες κατασκευής χαρτών τραχύτητας εδάφους και εμπειρικά (Καρύμπαλης, 2014 και Chow 1959).

Για την παραγωγή του χάρτη χρησιμοποιήθηκαν οι ψηφιοποιημένες χρήσεις γης από το πρόγραμμα Corine Land Cover (2018) με ανάλυση 100m. Η αντιστοιχία των χρήσεων γης με τις τιμές του συντελεστή τραχύτητας έγινε ως εξής:

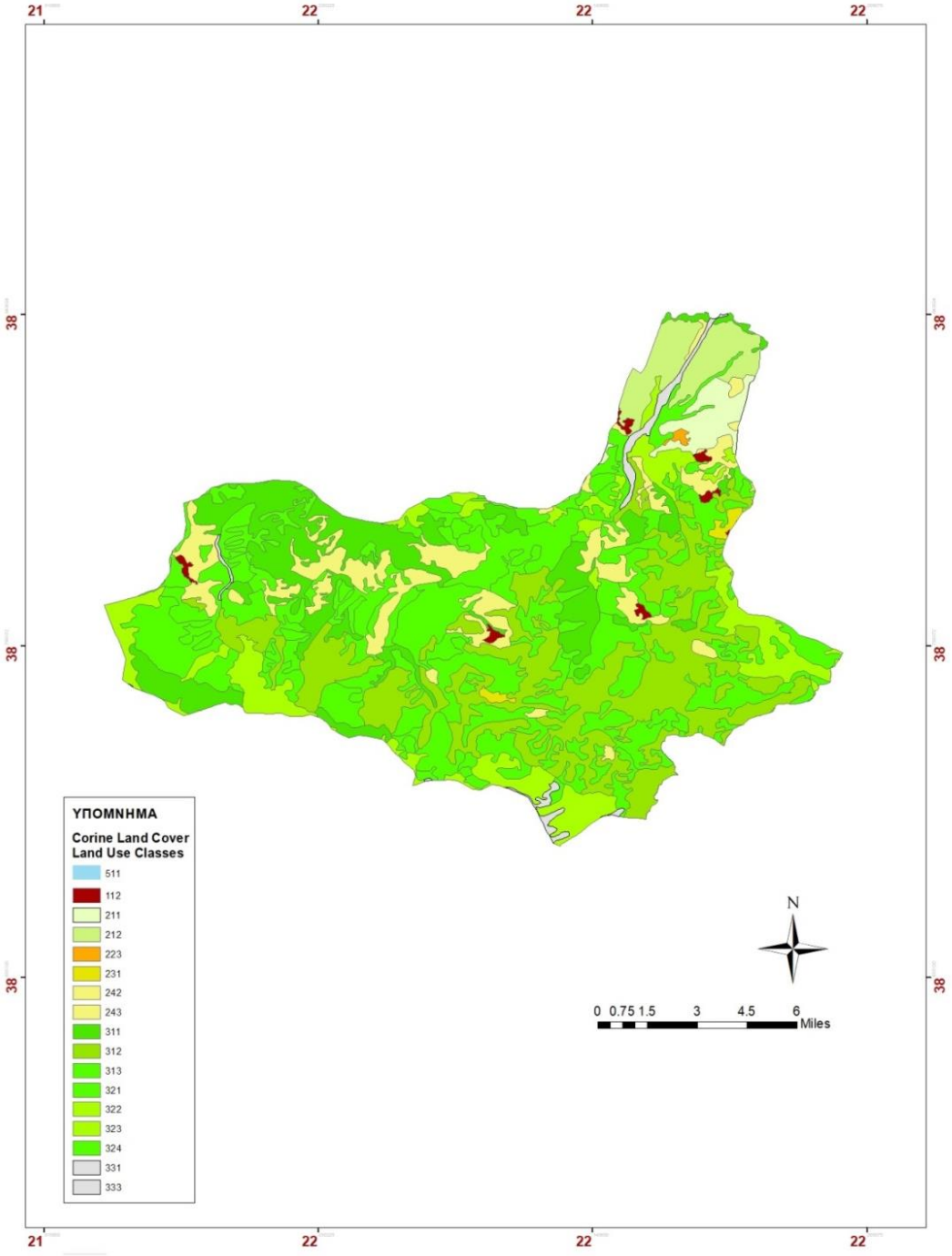
Στις αστικές περιοχές δόθηκε τιμή συντελεστή τραχύτητας εδάφους 0.015 ενώ στην κατηγορία των αρώσιμων εκτάσεων τιμή 0.1. Στις δασικές εκτάσεις δόθηκε η μεγαλύτερη τιμή συντελεστή τραχύτητας εδάφους 0.2 ενώ όλες οι άλλες υποκατηγορίες των χρήσεων γης κυμάνθηκαν σε ενδιάμεσες τιμές όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα κωδικοποίησης των χρήσεων γης ανάλογα με τους συντελεστές Manning.

ΚΩΔΙΚΟΣ CORINE LAND COVER	**ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ**	**ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ MANNING**
112	Discontinous urban fabric Ασυνεχής αστικός ιστός	0,015
211	Non-irrigated arable land Μη αρώσιμη καλλιεργίσημη γη	0,1
212	Permanently irrigated arable land Μονιμα αρώσιμη καλλιεργήσιμη γη	0,05
223	Olive groves Ελαιώνες	0,1
231	Pastures Αμπελώνες	0,05
242	Complex cultivation patterns Πολύπλοκα διαμορφωμένες	0,1

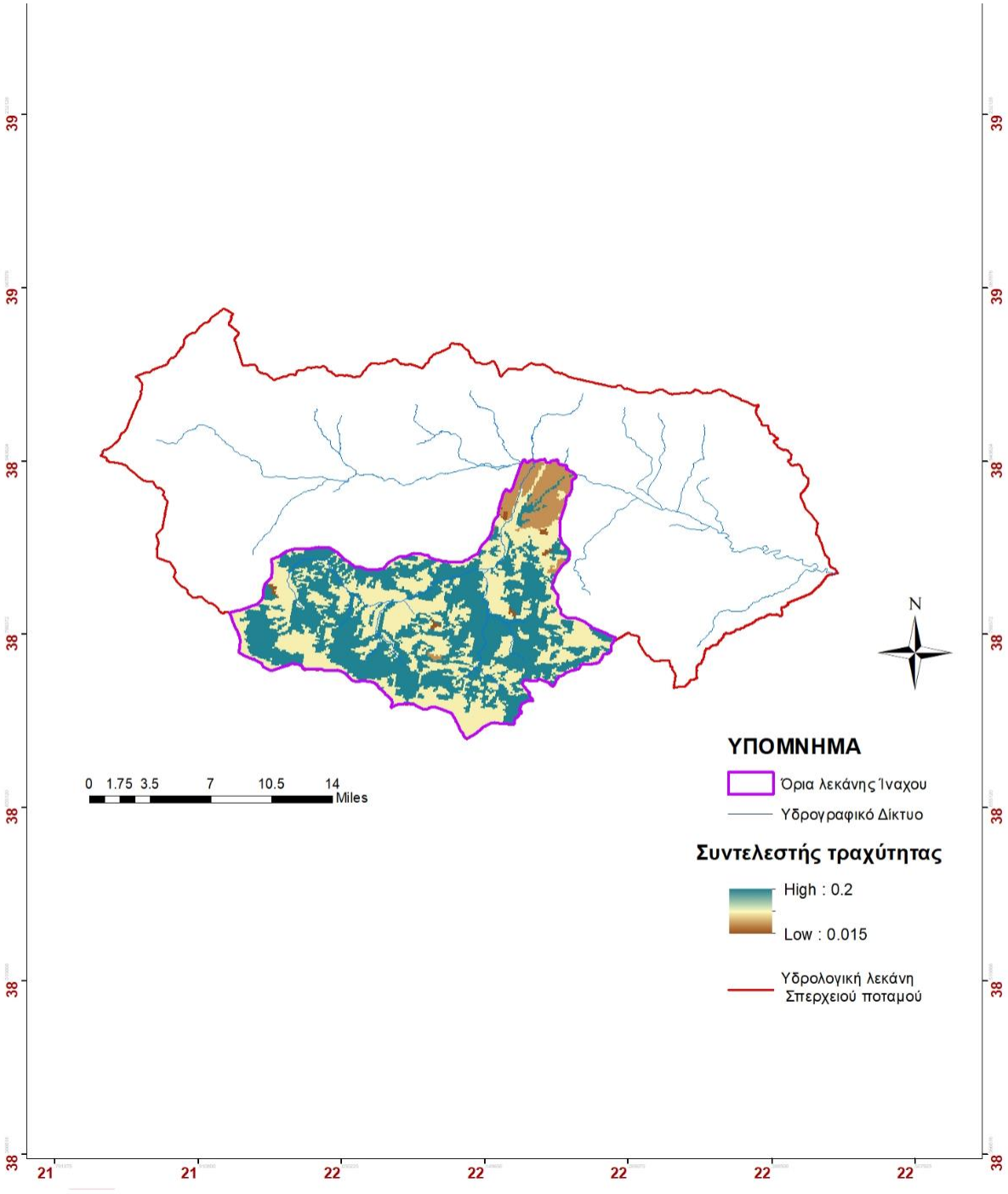
	καλλιεργήσιμες εκτάσεις	
243	Land principally occupied by agriculture Γη που καλύπτοταν απο καλλιεργήσιμες εκτάσεις	0,1
311	Broad-leaved forest Πλατύφυλλα δάση	0,2
312	Coniferous forest Κωνοφόρα δάση	0,2
313	Mixed forests Μικτά δάση	0,2
321	Natural grasslands Λειβάδια	0,1
32	Moors and heathland Θαμνώδεις και άγονες εκτάσεις	0,1
323	Sclerophylous vegetation Σκληρόφυλλη βλάστηση	0,1
324	Transitional woodland Μεταβατική βλάστηση	0,1
331	Beaches and sand plains Παραλίες και αμμώδεις εκτάσεις	0,05
333	Spasely vegetated areas Αραιή βλάστηση	0,05

Πίνακας 4: με τον ορισμό τιμών για το θεματικό χάρτη (επίπεδο) συντελεστή τραχύτητας γης (manning).

Για τη συγκεκριμένη μελέτη θα μπορούσε επίσης να εφαρμοστεί χαρτογράφηση του συντελεστή τραχύτητας με δεοδμένο τα ilots για την περιοχή μελέτης παρόλα αυτά εφαρμόστηκε το CORINE LAND COVER ωστε τα αποτελέσματα να είναι περισσότερο συγκρίσημα με τα αποτελέσματα του υδρομετεωρολογικού μοντέλου. Να σημειωθεί οτι το υδρομετεωρολογικό μοντέλο παράγει τελικά χωρικά κατανεμημένη πληροφορία χρήσεων γης μαζί με το υδρογραφικό δίκτυο, το επίπεδο διεύθυνσης ροής, το επίπεδο συγκέντρωσης ροής με ανάλυση ίση με 100m περίπου οπότε οι χρήσεις γης του υδρομετεωρολογικού μοντέλου με του μοντέλου GIS στην προκειμένη περίπτωση είναι σχετικά συγκρίσιμες. Εν τούτοις, να σημειωθεί οτι το υδρομετεωρολογικό ταξινομεί τις χρήσεις γης με το σύστημα των 24 κλάσεων της USGS ενώ το χωρικά κατανεμημένο μοντέλο ισόχρονων GIS τις ταξινομεί με το σύστημα CORINE LAND COVER.



Χάρτης 3: με τις χρήσεις γης Corine Land Cover που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του χάρτη συντελεστή τραχύτητας εδάφους. Η κλίμακα χαρτογράφησης ισούται με 100m.



Χάρτης 4: του χαρτογραφούμενου συντελεστή τραχύτητας Manning για την υδρολογική λεκάνη του Ίναχου ποταμού.

3.1.3. Υπολογισμοί θεματικών επιπέδων στο μοντέλο ισόχρονων καμπυλών με GIS και εκτέλεση του μοντέλου ισόχρονων καμπυλών με το GIS.

Το επίπεδο συγκέντρωσης ροής (flow accumulation) συνιστά το άθροισμα όλων των κελιών του καννάβου που αντιστοιχούν στους υδρογραφικούς κλάδους και ορίζεται από το χρήστη, για διαφορετική τιμή κατωφλίου. Η τιμή αυτή καθορίζει μέχρι ποιο αριθμό κελιών του καννάβου κατεύθυνσης ροής (flow direction) ορίζονται υδρογραφικοί αποδέκτες. Για παράδειγμα, τιμή 1000 ως κατώφλι σημαίνει ότι κάτω από 1000 κελιά στον κάνναβο της κατεύθυνσης ροής δεν αποτελούν υδρογραφικούς αποδέκτες επομένως δεν ανήκουν στους υδρογραφικούς κλάδους άρα στον υπολογισμό του επιπέδου συγκέντρωσης ροής flow accumulation και θα λάβουν τιμή ίση με 0 στο παραγόμενο τελικό επίπεδο GIS.

Γνωρίζοντας τον αριθμό των κελιών που αντιστοιχούν στους υδρογραφικούς αποδέκτες και τη ταξινόμησή τους σε κύριους και δευτερεύοντες (με την εντολή flow accumulation) μπορεί να γίνει ο υπολογισμός της παροχής της χερσαίας ροής (overland flow) και της ροής του υδρογραφικού δικτύου (channel flow), ως προς το σημείο της εξόδου της υδρογραφικής λεκάνης.

Η παροχή υδρογραφικού δικτύου υπολογίζεται από τον εξής τύπο (Kalogeropoulos et al, 2013, Gioti et al, 2013):

$$Q_{υδρογραφικού\ δικτύου} = \frac{Βροχόπτωση\ (mm) * 25m * 25m * Συγκέντρωση_ροής(flow\ accumulation)}{Διάρκεια\ βροχόπτωσης\ (sec)} \quad (3.1.3.1)$$

Η παροχή της επίγειας ροής (overland flow)

$$Q_{χερσαίας\ ροής} = \frac{Βροχόπτωση\ (mm) * Ανάντη\ μήκος\ ροής\ (Upstream\ flow\ length)}{Διάρκεια\ βροχόπτωσης} \quad (3.1.3.2.)$$

όπου στο μαθηματικό τύπο (3.1.3.1) η συγκέντρωση_ροής (flow accumulation) το παραγόμενο επίπεδο της συγκέντρωσης ροής, η βροχόπτωση συνιστά στη συνολική 24ωρη βροχόπτωση για την κάθε μέρα σε μονάδες μέτρησης mm πολλαπλασιασμένη επi την ανάλυση της ψηφίδας του επιπέδου της τοπογραφίας και η διάρκεια βροχόπτωσης στον παρονομαστή ανάγεται σε μονάδες μέτρησης sec (86400sec για συνολική διάρκεια 24 ωρών).

Στο μαθηματικό τύπο (3.1.3.2.) flowlength_upstream είναι το μήκος ροής στην ανάντη περιοχή της υδρολογικής λεκάνης που υπολογίζεται με την επιλογή Flow length>Upstream (ως παράγοντας στάθμισης).

Πριν τον υπολογισμό των καννάβων ταχύτητας (gridvelocities) υπολογίζεται το επίπεδο κλίσεων της υδρολογικής λεκάνης (με την εφαρμογή Spatial Analyst-Slope).

Ο υπολογισμός της ταχύτητας του υδρογραφικού δικτύου και της στρωματοροής βασίζεται στην εξίσωση του Manning (Kalogeropoulos et al, 2013, Gioti et al, 2013):

$V_{κανάλι} = KS^{3/8}\, Q_{κανάλι}^{0,25}\, n^{-0.75}$ (3.1.3.3)

και αντίστοιχα για τον υπολογισμό της ταχύτητας στρωματοροής (ή χερσαίας ροής):

$V_{στρωματοροής} = KS^{3/10}\, Q_{στρωματορής}^{0,4}\, n^{-0.6}$ (3.1.3.4)

όπου K ο συντελεστής διόρθωσης του συντελεστή τραχύτητας που ισούται με μονάδα, S το επίπεδο κλίσεων σε μονάδες m/m, Q η παροχή που έχει υπολογιστεί στους δυο προηγούμενους τύπους () και () σε μονάδες μέτρησης m^3/sec και n ο συντελεστής τραχύτητας Manning σε μονάδες μέτρησης s/$m^{1/3}$.

Για την εκτίμηση της τελικής ταχύτητας $v_{τελικο}$ γίνεται σύνθεση των δυο παραγόμενων επιπέδων ταχύτητας. Για την εκτίμηση αυτή αξιοποιείται η εντολή Con στην εργαλειοθήκη του ArcMap ArcToolbox-Spatial Analyst- Conditional. Η εντολή αυτή δημιουργεί ένα παραγόμενο επίπεδο raster βασισμένη σε μια σειρά απο κριτήρια που του θέτει ο χρήστης χρησιμοποιώντας Boolean εκτελεστές (AND, <,>) ή θέτοντας στα δεδομένα εισόδου της εντολής αυτής συγκεκριμένα κριτήρια με βάση τις ιδιότητες των εισερχόμενων δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, έχοντας ως εισερχόμενο raster επίπεδο το υδρογραφικό δίκτυο που έχει δημιουργηθεί με την εντολή του flow accumulation και ύστερα με την επανταξινόμηση των υδρογραφικών κλάδων

ως κύριοι υδρογραφικοί κλάδοι (VALUE=1) η εντολή Conditional ως Input true raster ψάχνει όλα τα κελιά στο flow accumulation που έχουν τιμή ίση με το 1 δηλαδή τα κελιά που περιέχουν τους υδρογραφικούς κλάδους της χερσαίας ροής (στρωματοροής) και ως Input false raster ψάχνει όλα τα υπόλοιπα δηλαδή εκείνα που έχουν τιμή ίση με 0 δηλαδή τους κύριους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου.

Έτσι παράγεται το τελικό επίπεδο ταχύτητας της ροής για την υδρολογική λεκάνη του Ίναχου ποταμού συνδυάζοντας τα δυο επίπεδα ταχύτητας (στρωματοροής και υδρογραφικού δικτύου). Το αντίστροφο της τελικής ταχύτητας του τύπου συνδυάζεται με την εξίσωση υπολογισμού του τελικού χρόνου συγκέντρωσης της λεκάνης σουρροής ως ο λόγος του συνολικού μήκους της ροής της καθε ψηφίδας και της τελικής της ταχύτητας μέχρι το σημείο εξόδου της υδρολογικής λεκάνης.

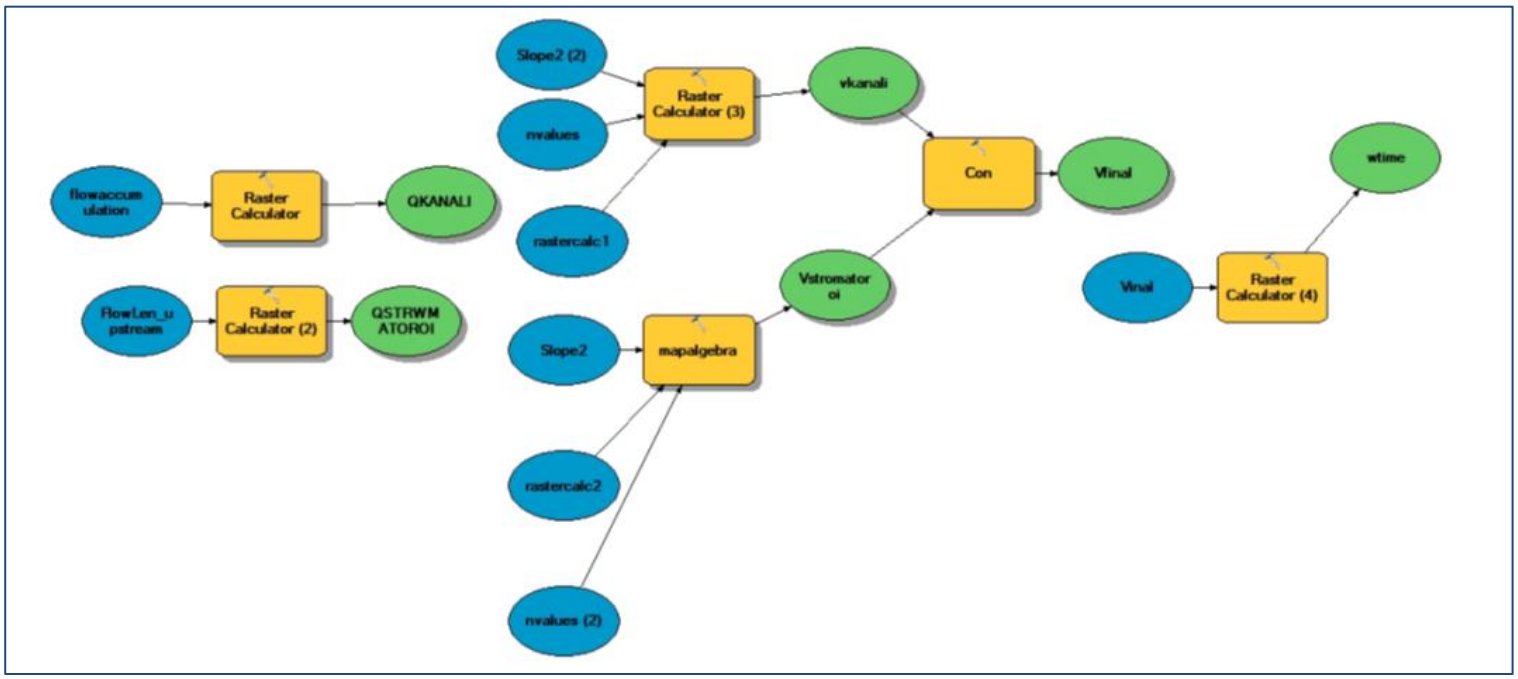
Έτσι ο πραγματικός χρόνος του κάθε κελιού του υδρογραφικού δικτύου μέχρι την έξοδο της λεκάνης υπολογίζεται απο τον εξής τύπο (Gioti, 2013, Kalogeropoulos et al, 2013):

$$t_{συρροής} = \frac{μήκος\ ροής\ (flow\ length)}{v_{τελική}} \quad (3.1.3.5)$$

Στο τελικό επίπεδο του μήκους ροής επαναταξινομείται ανά 3600sec (χρονική μονάδα ίση με 1 ώρα=3600sec) που αντιστοιχεί στο διαχωρισμό επιφανειών στον κάνναβο του χρόνου ροής ανά ωριαία διαστήματα. Η εφαρμογή αυτή παράγει το τελικό επίπεδο των ισόχρονων καμπυλών (isochrones). Η κάθε επιφάνεια αποτελεί έναν γεωμετρικό τόπο σημείων που ισαπέχουν χρονικά από το σημείο εξόδου της υδρολογικής λεκάνης. Έτσι η ισόχρονη καμπύλη 1ας ώρας αποτελεί το γεωμετρικό τόπο των σημείων της υδρολογικής λεκάνης που απέχουν απο την έξοδο της υδρολογικής λεκάνης (το σημείο εξόδου) 1 ώρα, η ισόχρονη καμπύλη 2ης ώρας αποτελεί την περιοχή των σημείων που ισαπέχουν 2 ώρες απο την έξοδο της υδρολογικής λεκάνης κτλ.

Το επόμενο βήμα αποτελεί ο υπολογισμός της έκτασης (εμβαδόν σε m^2) της κάθε ισόχρονης ζώνης με τη δημιουργία της στήλης AREA δίπλα απο τη στήλη COUNT που αποτελεί τον αριθμό των κελιών (grid cells) σε κάθε ισόχρονη ζώνη (isochrones). Η στήλη AREA υπολογίζεται απο τον αριθμό COUNT *(cell resolution)*25m*25m για την κάθε ισόχρονη ζώνη.

Ανάλογα με τον υπολογισμό του ύψους βροχής σε mm στην κάθε ώρα (σύνολο 24 ώρες) και την έκταση της κάθε ισόχρονης υπολογίζεται ο όγκος απορροής στην κάθε ισόχρονη ζωνών (για το σύνολο των ισόχρονων ζωνών στο κάθε σενάριο) για τον κάθε ωριαίο παλμό απορροής.



Διάγραμμα 3: Εφαρμογή του μοντέλου ισόχρονων καμπυλών με το Model Builder του ArcGIS.

Οι μαθηματικοί τύποι με τους οποίους γίνονται οι παραπάνω υπολογισμοί είναι οι εξής:

$V = \acute{\epsilon}\kappa\tau\alpha\sigma\eta\ (m^2) * \acute{\upsilon}\psi\circ\varsigma\ \beta\rho\circ\chi\acute{\circ}\pi\tau\omega\sigma\eta\varsigma$ (mm) (3.1.3.6)

$Q\ = \frac{\acute{O}\gamma\kappa\circ\varsigma\ (m^3)}{X\rho\acute{o}\nu\circ\varsigma\ (sec)}$ (3.1.3.7)

3.1.4 Τα σενάρια βροχόπτωσης με το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF.

Για την εκτέλεση του μοντέλου των ισόχρονων καμπυλών με το GIS και για τη διερεύνηση της χωρικής και χρονικής μεταβολής της παροχής σε σχέση με την κατανομή της βροχόπτωσης επιλέχθηκαν δυο σημεία τυχαίας θέσης στην υδρολογική λεκάνη του Ίναχου απο τα οποία λήφθηκαν 5 ήμερες χρονοσειρές βροχόπτωσης που προήλθαν απο τις μετεωρολογικές προσομοιώσεις του μοντέλου WRF. Έτσι με αυτό το τρόπο, δημιουργήθηκαν τα πρότυπα προγνωστικής βροχόπτωσης σε σημεία στα οποία απουσιάζουν μετρήσεις και τα οποία θα

εισέλθουν στο GIS μοντέλο των ισόχρονων καμπυλών για να εκτιμηθεί η απορροή και πιο συγκεκριμένα το υδρογράφημα πλημμύρας κατά τη χρονική διάρκεια που συνέβη το πλημμυρικό γεγονός δηλαδή το τριήμερο 30/01/2015 εως και 01/02/2015.

Να σημειωθεί οτι για τις προγνώσεις βροχόπτωσης, χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι μετεωρολογικές προσμοιώσεις με το WRF δηλαδή το μοντέλο ισόχρονων καμπυλών αξιοποιεί ως δεδομένα εισόδου τις μετεωρολογικές προγνώσεις των δυο σημείων και με GIS τεχνικές παράγει τα πρότυπα απορροής όπως αναφέρθηκαν και απο προηγούμενους ερευνητές (Πέντερης, 2017, Chalkias, 2016, Gioti, 2013, Καρύμπαλης, 2013). Η μετεωρολογική πρόγνωση με το WRF , δηλαδή τα σενάρια βροχόπτωσης για τα δυο σημεία προήλθαν χρησιμοποιώντας την κατάλληλη ρύθμιση του μοντέλου (model configuration). Για τις μετεωρολογικές προσομοιώσεις επιλέχθηκαν τέσσερις υπο- τομείς μοντελοποίησης (model domains) διαφορετικής οριζόντιας ανάλυσης που εκτείνονται απο τη Νότια Ευρώπη, τη Μεσόγειο εως τη Μαύρη Θάλασσα. Η έκταση του τελευταίου υπο τομέα μοντελοποίησης περιλαμβάνει τα όρια της έκτασης της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού. Οι οριζόντιες αναλύσεις των τεσσάρων υποτομέων μοντελοποίησης αντιστοιχούν σε 36, 12, 4 και 1km αντιστοίχως ενώ οι χρονικές διακριτοποιήσεις τέθηκαν ως 180, 60,20 και 5sec αντιστοίχως. Να σημειωθεί οτι η επίλυση των εξισώσεων των προγνωστικών μεταβλητών και των αρχικών οριακών συνθηκών για τις μετεωρολογικές προγνώσεις WRF βασίζεται στη μέθοδο του κλιμακωτού πλέγματος τύπου C (Κατσαφάδος, 2015) και η χρονική περίοδος των προγνώσεων ξεκινάει απο 29/01/2015 00 00 UTC εως και 03/02/2015 00 00 UTC. Για τις προγνώσεις βροχόπτωσης το WRF χρησιμοποιεί δεδομένα GFS για την εκτίμηση των αρχικών οριακών συνθηκών (για τη θερμοκρασία, τη ταχύτητα του ανέμου στις συνιστώσες ανατολής και δύσης, την πίεση στην επιφάνεια του εδαφους, την ειδική υγρασία και τις ακτινοβολίες μικρού και μεγάλου μήκους

4. Η υδρολογική λεκάνη του Σπερχειού ποταμού.

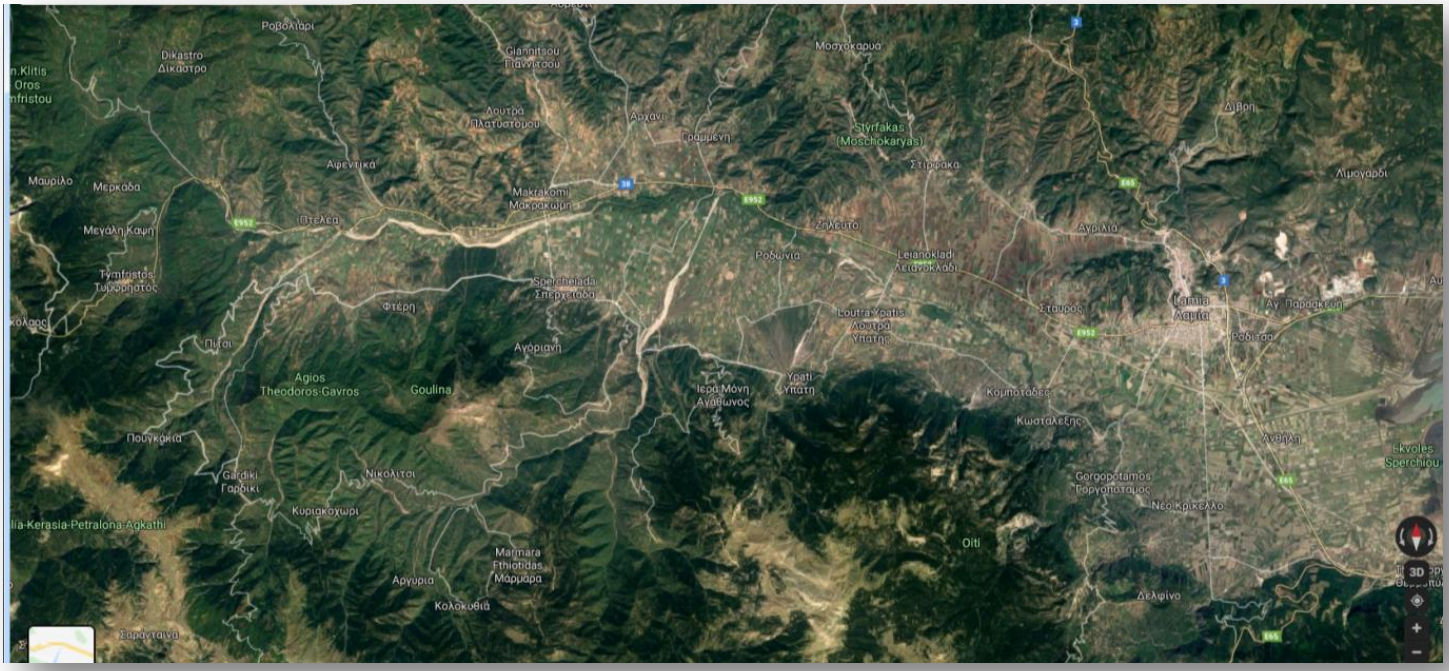
Η λεκάνη απορροής του Σπερχειού περικλείεται νοτιοδυτικά-βορειοδυτικά από τις οροσειρές των Βαρδουσίων, Οίτης και του Τυμφρηστού και νοτιοανατολικά από το όρος Καλλίδρομο ενώ ο υδροκρίτης του βόρειου και βορειοανατολικού άκρου σχηματίζεται από την οροσειρά του Όρθρυ. Η τοπογραφία επηρεάζει κυρίως την κατανομή των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στην περιοχή με φαινόμενα χιονόπτωσης και έντονων βροχοπτώσεων κατά τη χειμερινή περίοδο. Η συνολική έκταση της λεκάνης είναι 1.828m^2 ενώ το μέσο υψόμετρο περίπου 626m.

Το υδρογραφικό δίκτυο περιέχει πάνω από 60 κλάδους μόνιμης ή περιοδικής ροής οι κυριότεροι από αυτούς είναι ο Ρουστιανίτης, Ίναχος, Γοργοπόταμος, Βιτολιώτης, Ξηριάς Λαμίας και Ασωπός (εικόνα με υδρογραφικό δίκτυο). Η μέση ετήσια τιμή της παροχής του Σπερχειού (κύριος άξονας) ανέρχεται στα 60-80 m^3/sec με σημαντικές μεταβολές θερινής-χειμερινής παροχής (εως και 20-30 m^3 η θερινή και 100-150m^3 η χειμερινή (Ψωμιάδης, 2010).

Το έτος 1957 στη θέση Κόμμα διανοίχθηκε η Νέα Κοίτη για λόγους άρδευσης και διαχείρισης πλημμυρικών φαινομένων. Στη διευθέτηση αυτή δημιουργήθηκε διαχωρισμός της Παλιάς Κοίτης από τη Νέα ύστερα από την κατασκευή ενός μεριστή. Η πλημμυρική παροχή της τάφρου της Νέας Κοίτης εκτιμάται περίπου σε 300m^3/sec. Κυριότερες χρήσεις γης στην ευρύτερη κοιλάδα του Σπερχειού αποτελούν αρώσιμες εκτάσεις και καλλιέργειες και δάση (κωνοφόρα και πλατύφυλλα)

Μεγάλο μέρος της κοιλάδας του Σπερχειού χρησιμοποιείται για άρδευση (περίπου 110.000 στρέμματα) και εκμετάλλευση των διαθέσιμων υδατικών πόρων των επιφανειακών υδάτων, των υδροφορέων και του υπογείου νερού γίνεται με ρυθμούς εξαντλητικούς (Ψωμιάδης, 2010).

Η μέση ετήσια βροχόπτωση στη λεκάνη του Σπερχειού ανέρχεται περίπου στα 910mm λόγω της ορεινής τοπογραφίας και του έντονου αναγλύφου η οποία επηρεάζει και το μικρόκλιμα της περιοχής. Το ευρύ κλίμα στη λεκάνη του Σπερχειού είναι μεσογειακό υποτροπικό αλλά υπάρχουν διαφοροποιήσεις ανάλογα με το υψόμετρο και το ευρύτερο φυσικογεωγραφικό περιβάλλον. Οι μέσες τιμές απορροής κυμαίνονται γενικά από 693mm έως και 378mm με τις μέγιστες απορροές και παροχές να παρατηρούνται στο διάστημα Νοέμβριος-Απρίλιος και τις χαμηλότερες τιμές παροχής στο διάστημα Ιούνιος-Αύγουστος (Κουτσογιάννης, 2006).



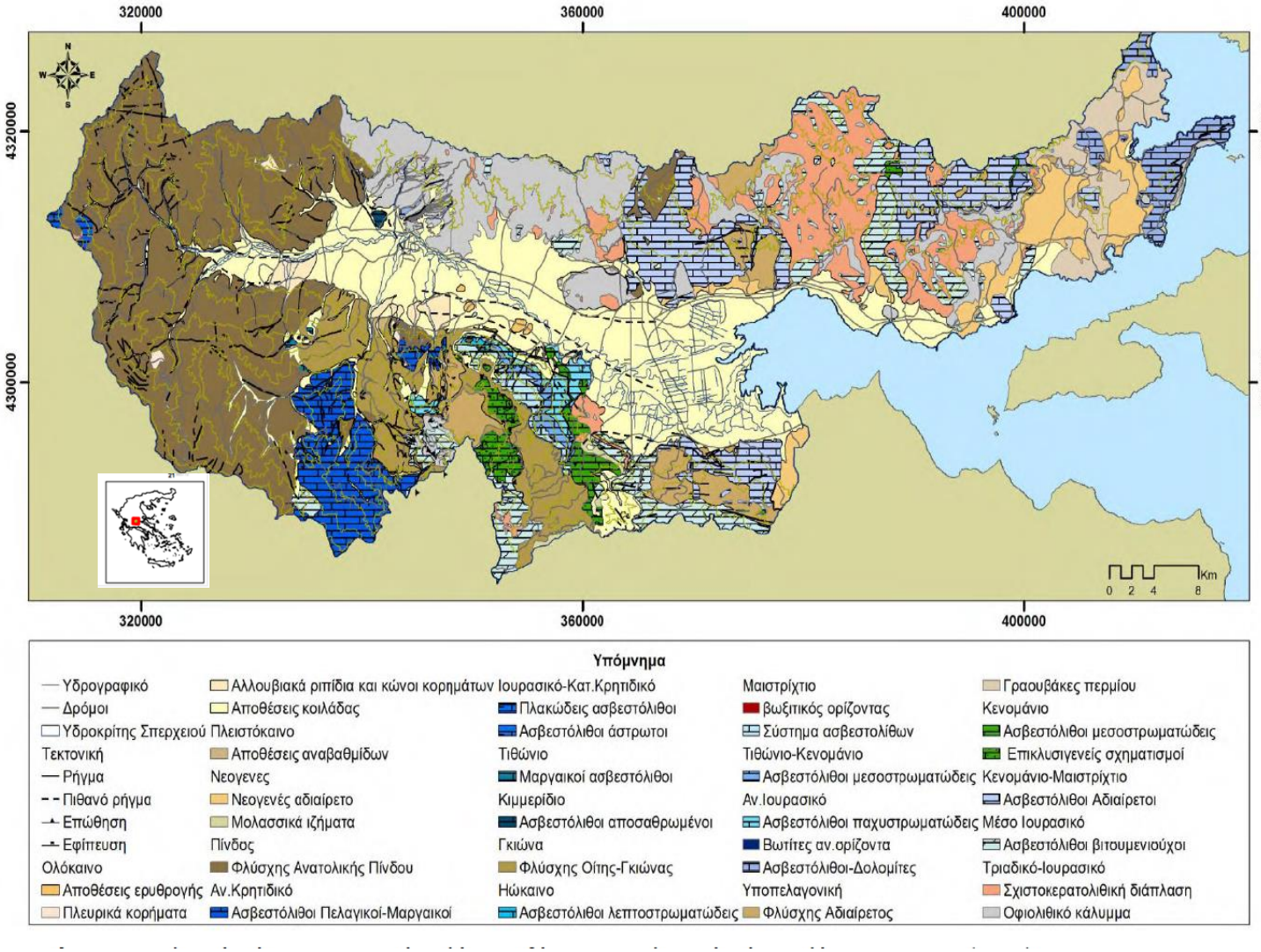
Χάρτης 5: Η ευρύτερη περιοχή της περιοχής της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού ποταμού. Ο κύριος υδρογραφικός κλάδος του Σπερχειού εκτείνεται σε Α-Δ διεύθυνση ανάμεσα στις οροσειρές του Τυμφρηστού (δυτικά της εικόνας) και της Οίτης (νότιο τμήμα της εικόνας). Η πηγήτηςεικόνας(https://www.google.com/maps/@38.8975563,22.2069902,33483m/data=!3m1!1e3).

Πλούσιο το γεωλογικό ιστορικό της περιοχής αφού οι κοιλάδα τέμνει από Δύση προς Ανατολή μια ποικιλία γεωλογικών σχηματισμών οι οποίοι έχουν συμβάλλει αρκετά στο υδρογεωλογικό δυναμικό της περιοχής καθώς και στην εξέλιξη του υδρογραφικού δικτύου του Σπερχειού (Καρλή, 2013). .

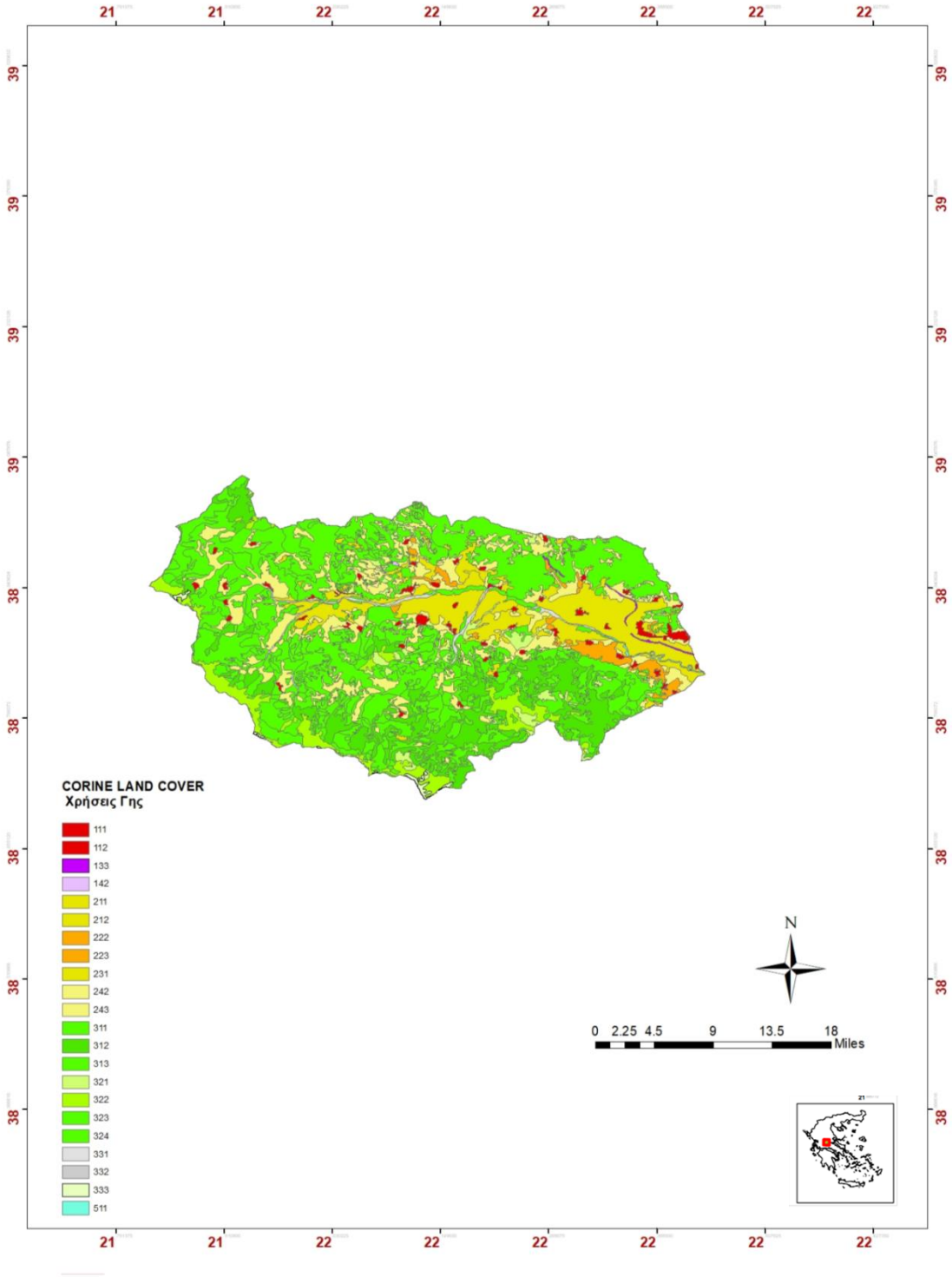
Οι κύριες γεωλογικές ενότητες που συναντώνται αποτελούν τους σχηματισμούς της ζώνης Πίνδου, σχηματισμοί της Υποπελαγονικής ζώνης (ΒΑ/ΝΑ), σχηματισμούς του Παρνασσού-Γκιώνας (Οίτη-νότια περιοχή της κοιλάδας) και κατά θέσεις παρατηρείται εμφάνιση της Βοιωτικής σειράς (εμφάνιση του Βοιωτικού φλύσχη) στη νότια περιοχή της κοιλάδας του Σπερχειού.

Οι μεταλπικοί σχηματισμοί (Νεογενή ιζήματα) είναι ηλικίας Πλειστοκαίνου-Ολοκαίνου πάχους 600m από ανατολικά και φτάνουν έως και 1000m δυτικά της κοιλάδας (Καρλή, 2013). Οι μεταλπικοί σχηματισμοί περιλαμβάνουν Τεταρτογενείς αποθέσεις (αποθέσεις αναβαθμίδων, κώνους κορημάτων) και Νεογενείς σχηματισμούς (λιμναίες αποθέσεις και μολασσικά ιζήματα).

Η κοιλάδα του Σπερχειού αποτελεί ένα τεκτονικό βύθισμα διεύθυνσης Δ-Α στο οποίο το βόρειο μέρος κατέρχεται και το νότιο ανέρχεται. Λεπτομερής μορφομετρική ανάλυση έχει αποδείξει τη τεκτονική επίδραση και της επίδραση της γεωλογίας στο υδρογραφικό δίκτυο του Σπερχειού. Στη μελέτη αυτή βρέθηκαν υψηλοί δείκτες συχνότητας υδρογραφικού δικτύου που σχετίζονται με μεγάλη απορροή (και αδιαπέρατο γεωλογικό υπόβαθρο) συνεπώς μεγαλύτερη πλημμυρική επικινδυνότητα (υψηλή τιμή δτο δείκτη υδρογραφικής συχνότητας για τη λεκάνη του κύριου άξονα του Σπερχειού σύμφωνα με τον Ψωμιάδη, 2010).



Χάρτης 6: Γεωλογικός χάρτης για την περιοχή της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού (κλίμακας 1:25000) απο ΙΓΜΕ. Απο Καρλή (2013).



Χάρτης 7: Χρήσεις γης για όλη την έκταση της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού ποταμού. Η ταξινόμηση των χρήσεων γης βασίστηκε στο πρόγραμμα Corine Land Cover 2018 ανάλυσης περίπου 25m (Πηγή: https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018).

4.1. Ποταμός Ίναχος (Βίστριτσα)

Η περιοχή της μελέτης συγκεκριμένα εστιάζεται νότια της λεκάνης του Σπερχειού ποταμού στην υδρολογική λεκάνη του Ίναχου –Βίστριτσας στην οποία έχουν σημειωθεί καταστροφικές πλημμύρες κυρίως λόγω της έντονης διάβρωσης της κοίτης και των παρόχθιων περιοχών απο τη μεταφορά ποσοτήτων ιζήματος στη διάρκεια των πλημμυρών. Το ίδιο συνέβη και με το πλημμυρικό γεγονός της 30^{ης} Ιανουαρίου 2015 όπου σημειώθηκαν εκτενείς καταστροφές στο οδικό δίκτυο κυρίως σε γέφυρες με αποτέλσμα τον αποκλεισμό ορεινών περιοχών που συνδέονταν με την κατάντη περιοχήτης υδρολογικής λεκάνης με τους οδικούς άξονες αυτούς. Το υδρογραφικό δίκτυο του Ίναχου ποταμού είναι εκτενές αλλά η παροχή του παρουσιάζει σημαντικές αυξομειώσεις στη διάρκεια του υδρολογικού έτους με τις μέγιστες τιμές να εκδηλώνονται κατά τους χειμερινούς μήνες.

Η περίμετρος της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού είναι περίπου 105km^2 ενώ το εμβαδό της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου περίπου 342km^2 (Ψωμιάδης, 2010). Η περιοχή της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου δομείται κυρίως απο Φλύσχη της ενότητας Πίνδου και του φλύσχη Οίτης –Γκιώνας με εμφανίσεις στο νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης ανθρακικών πελαγικών ασβεστολίθων (Καρλή, 2013, Ψωμιάδης, 2010). Η υψηλή ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου του Ίναχου οφείλεται στην ύπαρξη του αδιαπέρατου φλύσχη αλλά και στην έντονη διάβρωση της περιοχής στα ορεινά τμήματά της απο ρηγματογενή τεκτονική η οποία επιδράει στο ανάγλυφο της λεκάνης του Σπερχειού ποταμού (νότιο τμήμα της).



Φωτογραφία απο την καταστροφή της γέφυρας στην περιοχή Περιβόλι, ανάντη της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού στη διάρκεια της πλημμυ΄ρας της 30ης Ιανουαρίου (πηγή εικόνας **https://fonografos.net/v1/%CE%B2%CF%81%CE%BF%CF%87%CE%BF%CF%80%CF%84%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82/).**



Φωτογραφία απο το πλημμυρικό γεγονός της 30ης Ιανουαρίου 2015 στην περιοχή της γέφυρας του Ίναχου- Βίστριτσα (πηγή εικόνας **https://fonografos.net/v1/%CE%B2%CF%81%CE%BF%CF%87%CE%BF%CF%80%CF%84%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82/).**



Φωτογραφία απο το πλημμυρικό γεγονός στην υδρολογική λεκάνη του Ιναχου ποταμού το χρονικό διάστημα 30/01/2015 εως και 01/02/2015 στο γεφύρι της Βίστριτσας (πηγή εικόνας http://pyrgosnews.blogspot.com/2015/02/blog-post_1.html).

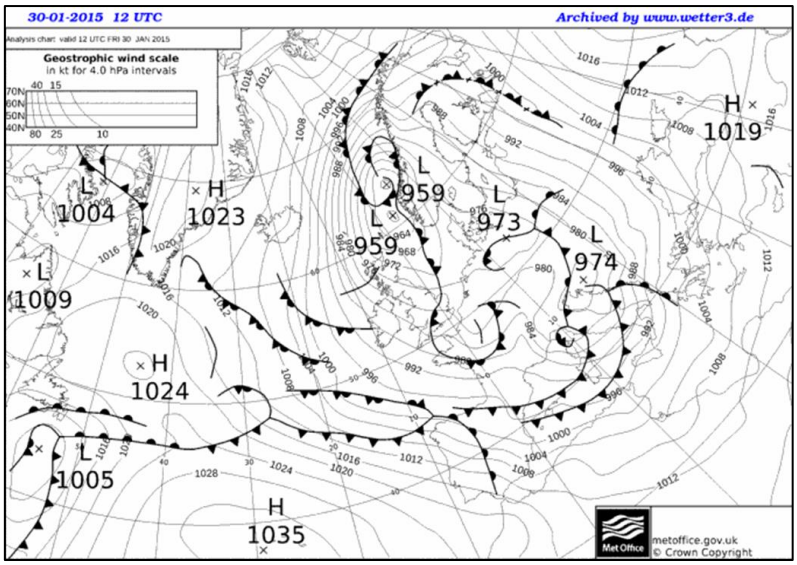
4.2. Το πλημμυρικό γεγονός του χρονικού διαστήματος 30/01/2015-01/02/2015 στον Ελλαδικό χώρο.

Τη χρονική περίοδο μεταξύ τέλη Ιανουαρίου 29/01/2015 εως και 03/02/2015 εμφάνιση χαμηλών βαρομετρικών στη Νότια Μεσόγειο όπως φαίνεται και απο τους χάρτες επιφάνειας 8 και 9. Την 29^{η} Ιανουαρίου 2015 στον πρώτο χάρτη επιφάνειας φαίνεται η εμφάνιση του χαμηλού βαρομετρικού στην περιοχή της Νότιας Ιταλίας και της Νότιας και Κεντρικής Ελλάδας, το οποίο συνεχίζει να υπάρχει μέχρι τις πρώτες ώρες της 1^{ης} Ιανουαρίου 2015. Τη χρονική περίοδο 30^{η} Ιανουαρίου μέχρι και τη 2^{η} Ιανουαρίου 2015 τα καιρικά φαινόμενα στον Ελλαδικό χώρο χαρακτηρίστηκαν ως ακραία (ΕΜΥ, 2015 https://meteo.gr/pdf/weatherCases/2015/2015_01_30.pdf). Σε πολλές περιοχές της Βορειοδυτικής και Στερεάς Ελλάδας κατέρευσαν τμήματα του οδικού δικτύου και γέφυρες ενώ στην περιοχή της Άρτας, λόγω των έντονων βροχοπτώσεων και της υπερχείλισης του Άραχθου ποταμού κατέρευσε το ιστορικό γεφύρι της Πλάκας, ένα απο τα πιο σημαντικά ιστορικά μνημεία στην περιοχή των Βαλκανίων. Υπερχείλιση των ποταμών και κατολισθήσεις σημειώθηκαν και στην ευρύτερη περιοχή της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού ποταμού. Οι μετεωρολογικοί σταθμοί στις θέσεις Μακρακώμη και Μυρίκη Ευρυτανίας σημείωσαν το τελευταίο διήμερο του Ιανουαρίου το 2015 και στις αρχές Φεβρουαρίου 2015 μέγιστες τιμές βροχόπτωσης. Πιο συγκεκριμένα, στο σταθμό της Μακρακώμης του νομού Φθιώτιδας καταγράφηκαν μέγιστες τιμές στο μέσο ημερήσιο ύψος βροχόπτωσης (24.4mm) την 31^{η} Ιανουαρίου και στο σταθμό της Μυρίκης (69 mm) στο νομό της Ευρυτανίας την ίδια ημερομηνία. Πολλές καταστροφές υπέστη το οδικό δίκτυο απο καθιζήσεις εδαφών και στο νομό της Ευρυτανίας λόγω κατολισθητικών φαινομένων όπου μεγάλα τμήματα του οδικού δικτύου κατέρευσαν και πολλές ορεινές κυρίως περιοχές αποκλείστηκαν λόγω των εκτεταμένων καταστροφών.

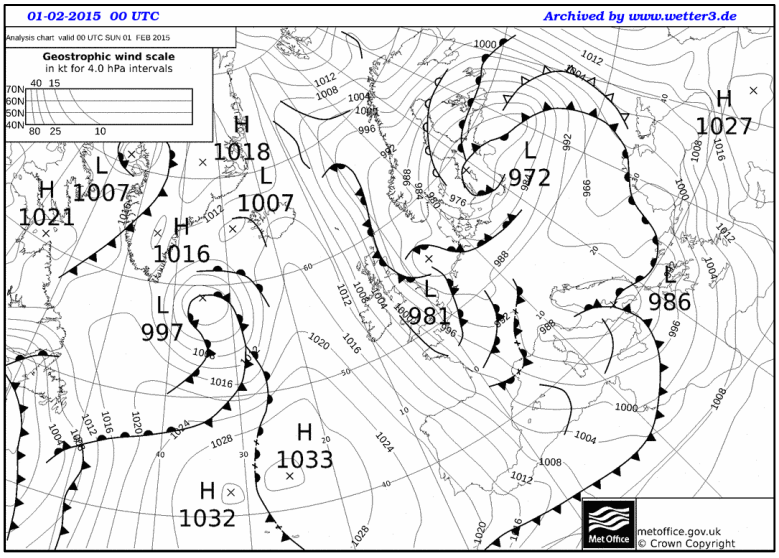
.

5. Εφαρμογή του υδρομετεωρολογικού μοντέλου WRF-Hydro.

8.

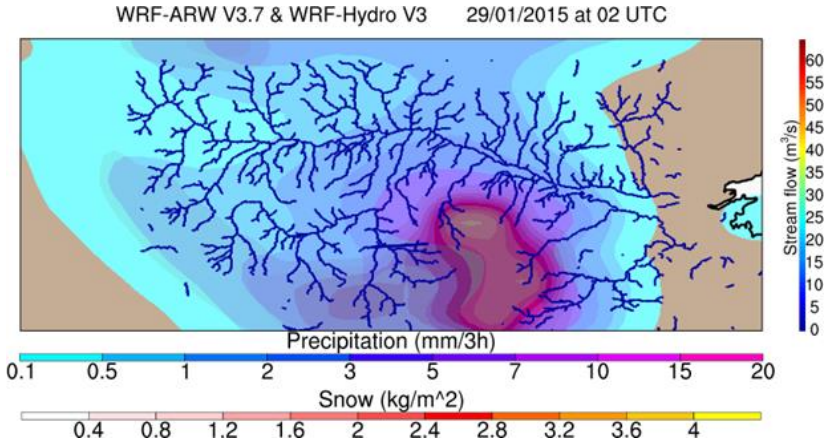


9.

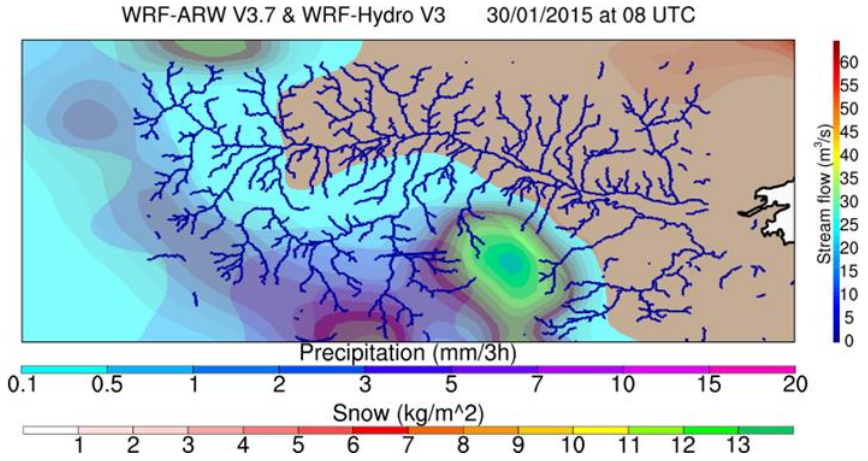


Χάρτες επιφάνειας 8, 9 : Συνοπτική κατάσταση του ευρύτερου χώρου της Ευρώπης και της Μεσογείου για τις ημερομηνίες 29/01/2015 , 30/01/2015 και 01/02/2015 (12 00 UTC , 12 00 UTC ,00 00 UTC χρονικά βήματα αντίστοιχα) στους οποίους διακρίνεται η παρουσία του βαρομετρικού χαμηλού στο Μεσογειακό χώρο. Πηγή των χαρτών επιφανείας (www.wetter3.de).

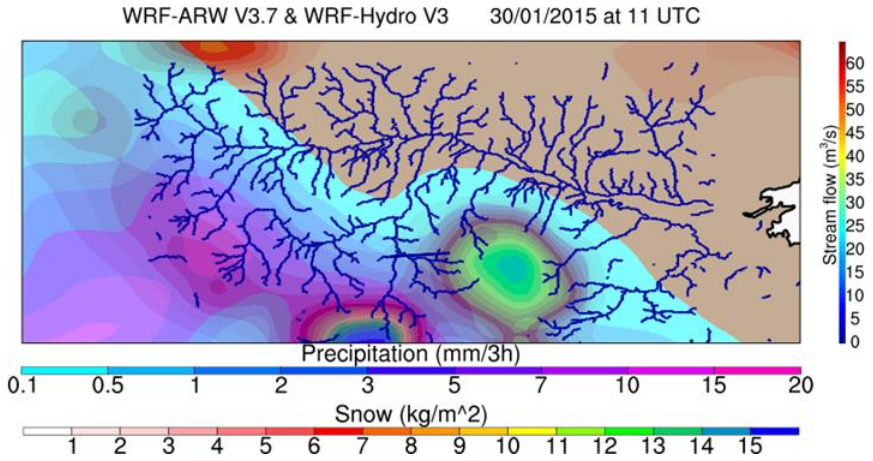
27.


WRF-ARW V3.7 & WRF-Hydro V3 29/01/2015 at 02 UTC
Stream flow (m3/s)
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60
Precipitation (mm/3h)
0.1 0.5 1 2 3 5 7 10 15 20
Snow (kg/m^2)
0.4 0.8 1.2 1.6 2 2.4 2.8 3.2 3.6 4

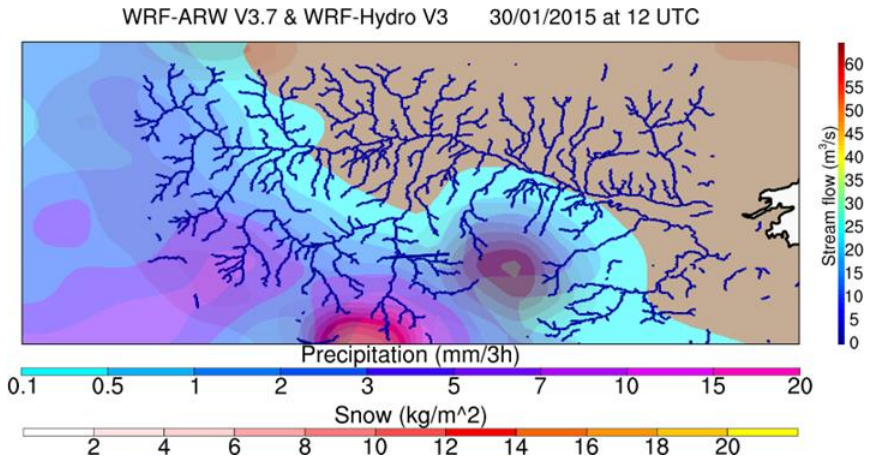
28.


WRF-ARW V3.7 & WRF-Hydro V3 30/01/2015 at 08 UTC
Stream flow (m3/s)
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60
Precipitation (mm/3h)
0.1 0.5 1 2 3 5 7 10 15 20
Snow (kg/m^2)
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13

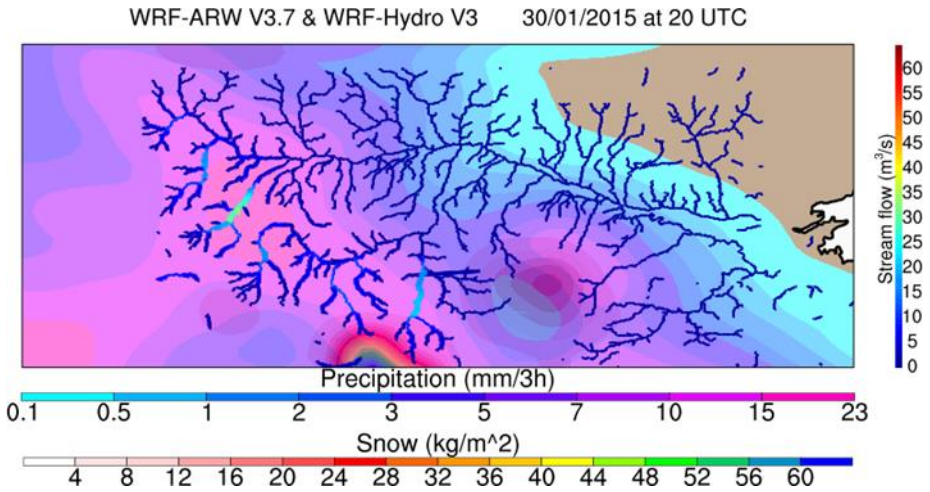
29.


WRF-ARW V3.7 & WRF-Hydro V3 30/01/2015 at 11 UTC
Stream flow (m3/s)
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60
Precipitation (mm/3h)
0.1 0.5 1 2 3 5 7 10 15 20
Snow (kg/m^2)
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

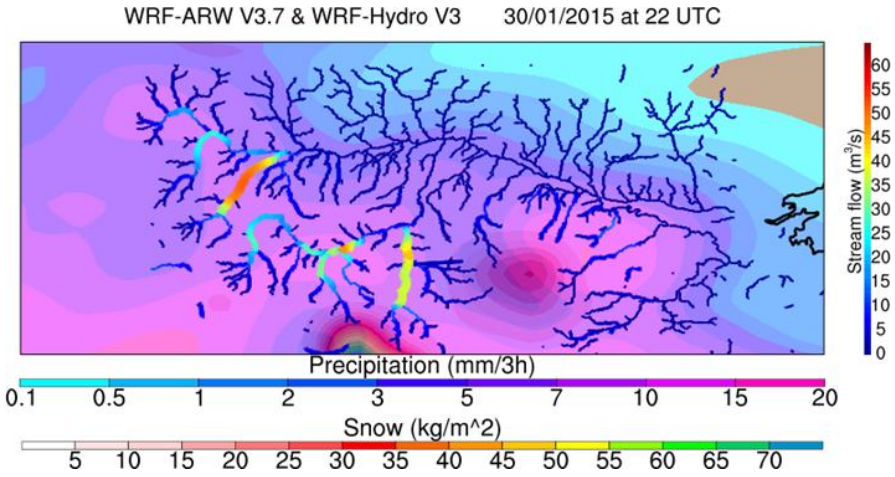
30.


WRF-ARW V3.7 & WRF-Hydro V3 30/01/2015 at 12 UTC
Stream flow (m3/s)
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60
Precipitation (mm/3h)
0.1 0.5 1 2 3 5 7 10 15 20
Snow (kg/m^2)
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20

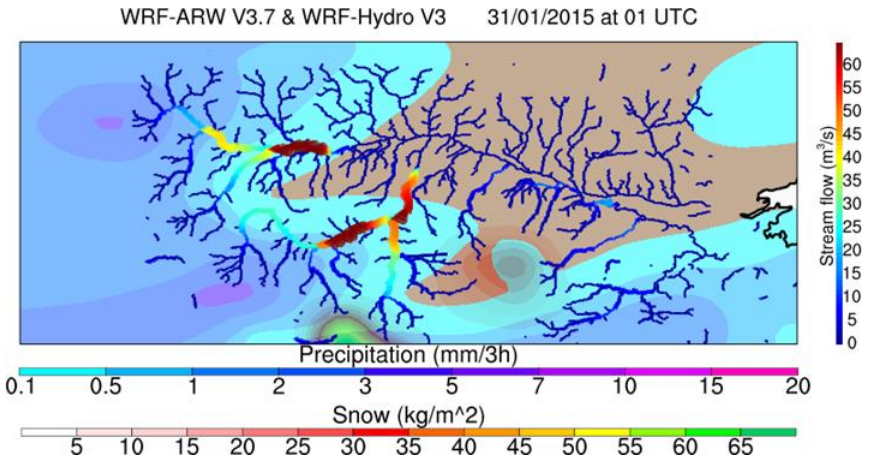
31.


WRF-ARW V3.7 & WRF-Hydro V3 30/01/2015 at 20 UTC
Stream flow (m3/s)
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60
Precipitation (mm/3h)
0.1 0.5 1 2 3 5 7 10 15 23
Snow (kg/m^2)
4 8 12 16 20 24 28 32 36 40 44 48 52 56 60

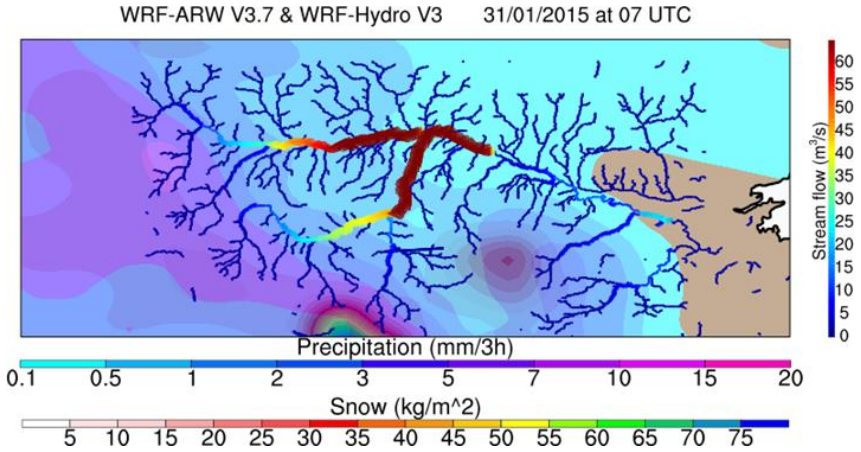
32.


WRF-ARW V3.7 & WRF-Hydro V3 30/01/2015 at 22 UTC
Stream flow (m3/s)
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60
Precipitation (mm/3h)
0.1 0.5 1 2 3 5 7 10 15 20
Snow (kg/m^2)
5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70

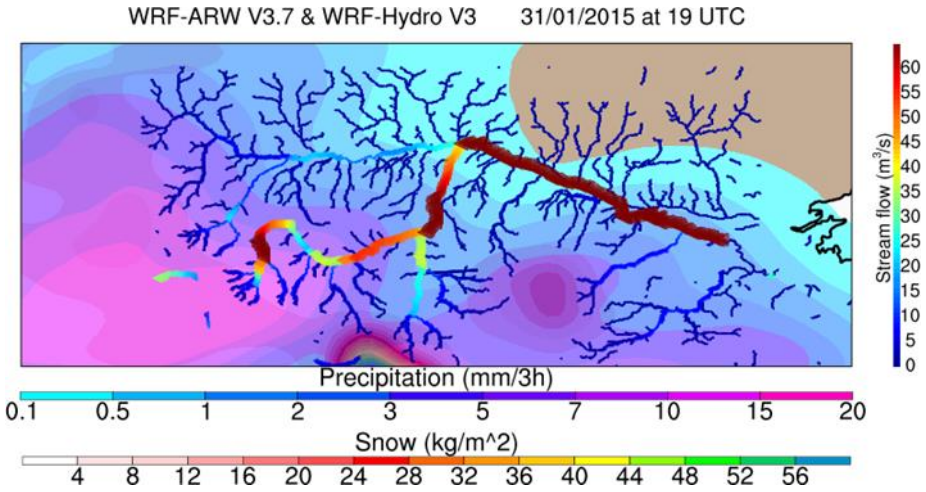
33.


WRF-ARW V3.7 & WRF-Hydro V3 31/01/2015 at 01 UTC
Stream flow (m3/s)
60 55 50 45 40 35 30 25 20 15 10 5 0
Precipitation (mm/3h)
0.1 0.5 1 2 3 5 7 10 15 20
Snow (kg/m^2)
5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65

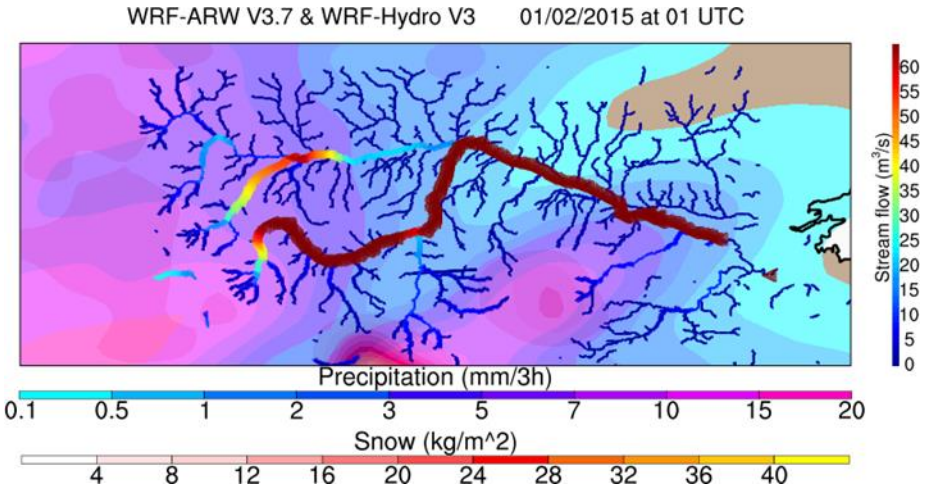
34.


WRF-ARW V3.7 & WRF-Hydro V3 31/01/2015 at 07 UTC
Stream flow (m3/s)
60 55 50 45 40 35 30 25 20 15 10 5 0
Precipitation (mm/3h)
0.1 0.5 1 2 3 5 7 10 15 20
Snow (kg/m^2)
5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75

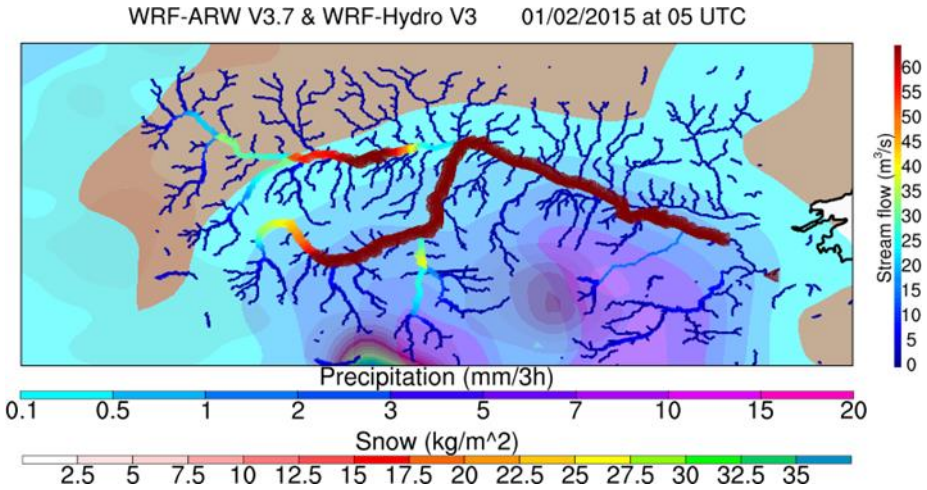
35.


WRF-ARW V3.7 & WRF-Hydro V3 31/01/2015 at 19 UTC
Stream flow (m3/s)
60 55 50 45 40 35 30 25 20 15 10 5 0
Precipitation (mm/3h)
0.1 0.5 1 2 3 5 7 10 15 20
Snow (kg/m^2)
4 8 12 16 20 24 28 32 36 40 44 48 52 56

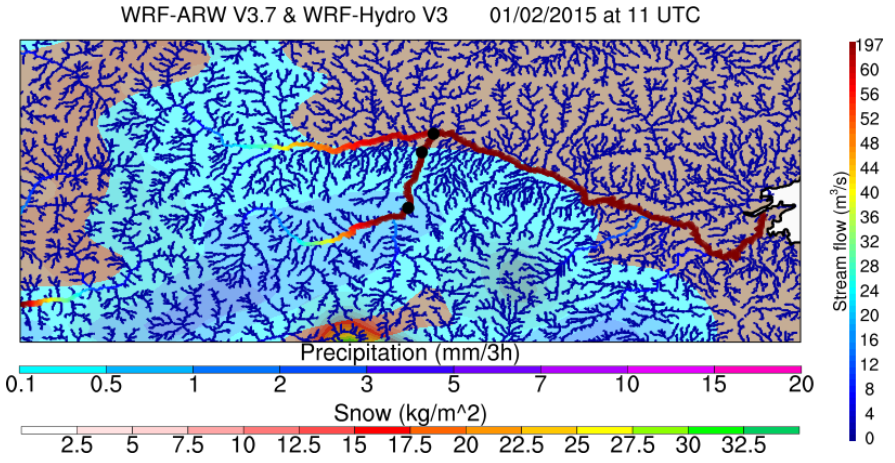
36.


WRF-ARW V3.7 & WRF-Hydro V3 01/02/2015 at 01 UTC
Stream flow (m3/s)
60 55 50 45 40 35 30 25 20 15 10 5 0
Precipitation (mm/3h)
0.1 0.5 1 2 3 5 7 10 15 20
Snow (kg/m^2)
4 8 12 16 20 24 28 32 36 40

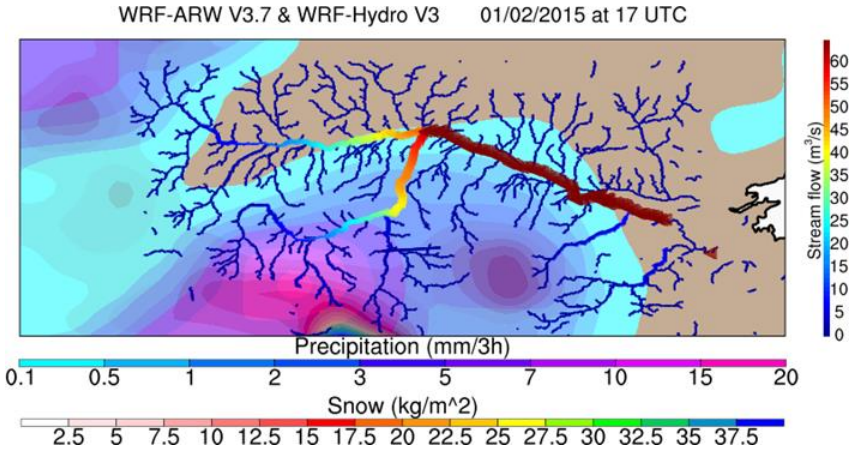
37.


WRF-ARW V3.7 & WRF-Hydro V3 01/02/2015 at 05 UTC
Stream flow (m3/s)
60 55 50 45 40 35 30 25 20 15 10 5 0
Precipitation (mm/3h)
0.1 0.5 1 2 3 5 7 10 15 20
Snow (kg/m^2)
2.5 5 7.5 10 12.5 15 17.5 20 22.5 25 27.5 30 32.5 35

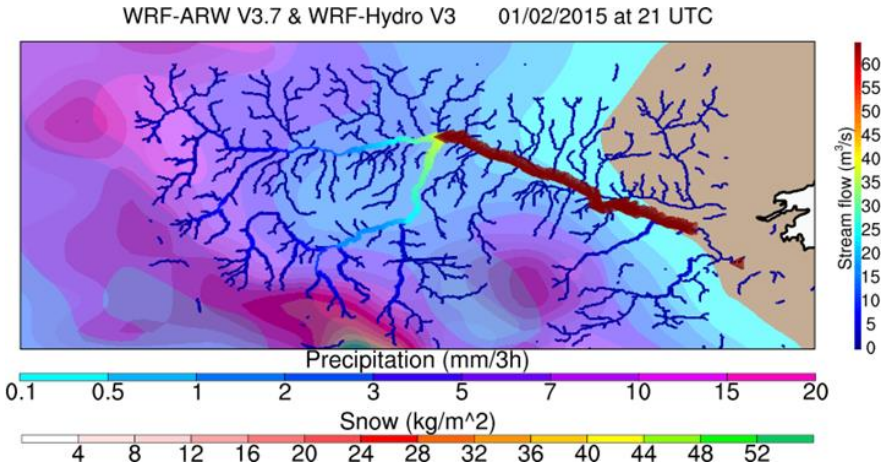
38.


WRF-ARW V3.7 & WRF-Hydro V3 01/02/2015 at 11 UTC
Stream flow (m3/s)
197 60 56 52 48 44 40 36 32 28 24 20 16 12 8 4 0
Precipitation (mm/3h)
0.1 0.5 1 2 3 5 7 10 15 20
Snow (kg/m^2)
2.5 5 7.5 10 12.5 15 17.5 20 22.5 25 27.5 30 32.5

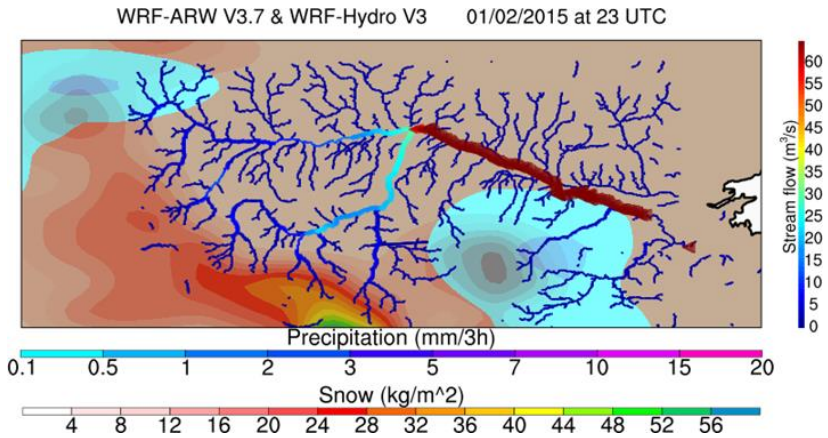
39.


WRF-ARW V3.7 & WRF-Hydro V3 01/02/2015 at 17 UTC
Stream flow (m3/s)
60 55 50 45 40 35 30 25 20 15 10 5 0
Precipitation (mm/3h)
0.1 0.5 1 2 3 5 7 10 15 20
Snow (kg/m^2)
2.5 5 7.5 10 12.5 15 17.5 20 22.5 25 27.5 30 32.5 35 37.5

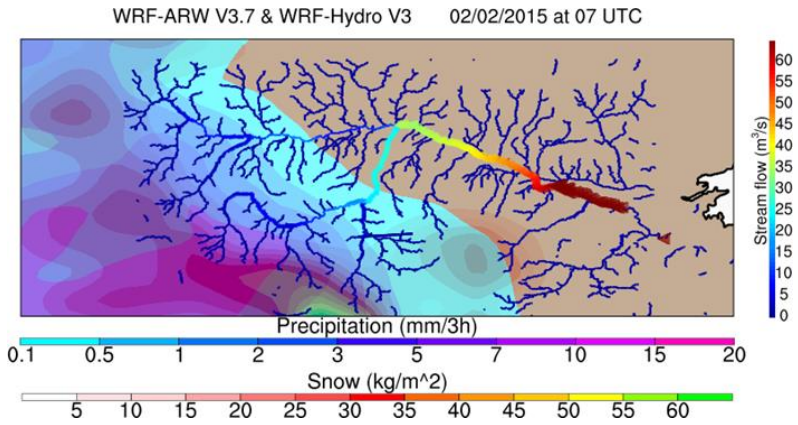
40.


WRF-ARW V3.7 & WRF-Hydro V3 01/02/2015 at 21 UTC
Stream flow (m3/s)
60 55 50 45 40 35 30 25 20 15 10 5 0
Precipitation (mm/3h)
0.1 0.5 1 2 3 5 7 10 15 20
Snow (kg/m^2)
4 8 12 16 20 24 28 32 36 40 44 48 52

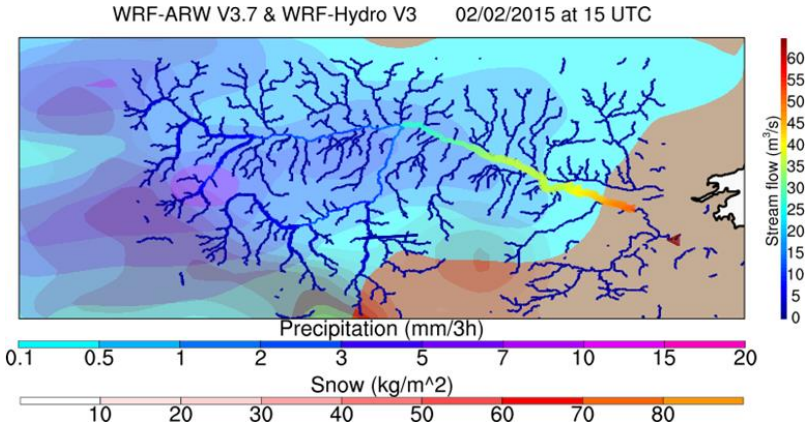
41.


WRF-ARW V3.7 & WRF-Hydro V3 01/02/2015 at 23 UTC
Stream flow (m3/s)
60 55 50 45 40 35 30 25 20 15 10 5 0
Precipitation (mm/3h)
0.1 0.5 1 2 3 5 7 10 15 20
Snow (kg/m^2)
4 8 12 16 20 24 28 32 36 40 44 48 52 56

42.



43.



Σχήματα 27 εως 43: Υδρομετεωρολογικές προσομοιώσεις με το WRF-Hydro ξεκινώντας απο 29/01/2015 00 00 UTC 02/02/2015 00 00 UTC για την υδρολογική λεκάνη του Σπερχειού ποταμού.

Για την εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής στη διάρκεια της προσομοίωσης επιλέχθηκαν σημεία στην κοίτη του ποταμού Ίναχου (βασικός παραπόταμος του Σπερχειού) καθώς και στο σημείο πριν το διαχωρισμό της κοίτης κατάντη της υδρολογικής λεκάνης.

Για τη βαθμονόμηση (calibration) του υδρομετεωρολογικού μοντέλου επιλέχθηκαν κάποιες default τιμές για το συντελεστή τραχύτητας Manning (Manning roughness coefficient) ανάλογα με τη τάξη κλάδου του υδρογραφικού δικτύου . Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες (Arnault et

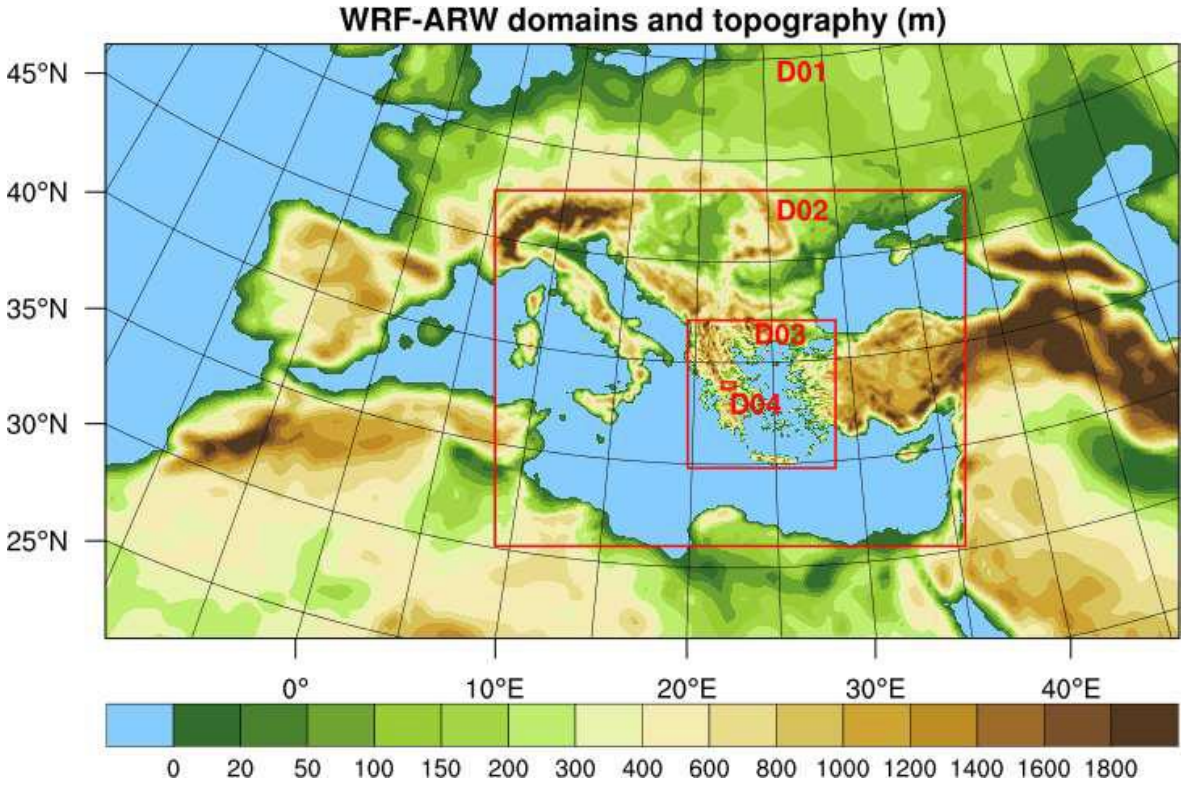
al, 2016) η ρύθμιση του υδρογραφικού δικτύου στην hydronamelist του υδρομετεωρολογικού μοντέλου, θα επηρρεάσει και την εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής – συγκεκριμένα, βρήκανε υποεκτίμηση της παροχής για λιγότερο ανεπτυγμένο υδρογραφικό δίκτυο (λιγότεροι κλάδοι) γεγονός που τονίζει τη σημασία της υδρολογικής βελτίωσης (hydrological enhancement) του υδρομετεωρολογικού μοντέλου WRF-Hydro.

Με εντολές FORTRAN95 τροποποιήθηκαν οι διάφορες τιμές του συντελεστή τραχύτητας ανάλογα με τη τάξη του υδρογραφικού κλάδου (namelist). Οι εκτιμήσεις παροχής για το πλημμυρικό γεγονός είναι ενδεικτικές καθώς δεν υπάρχουν παρατηρούμενες χρονοσειρές παροχής και βασίζονται σε περιγραφή των μοντελοποιημένων χρονοσειρών βροχής και παροχής για τις δυο περιπτώσεις σε δυο σημεία της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού.

Οι προσομοιώσεις με το WRF-Hydro γίνανε για το χρονικό διάστημα 29/01/2015 0000 UTC μέχρι 03/02/2015 0000 UTC με χρονικό βήμα 3600sec περίπου.

Οι offline προσομοιώσεις έγιναν στο HPC σύστημα του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου το οποίο αποτελείται απο 4 επεξεργαστές και σε κώδικα πλήρως παραλληλοποιημένο με πρωτόκολλο MPI (Message Passage Information) (Βάρλας, 2017). Το σύστημα πρόγνωσης του ΧΠΑ (Χαροκοπείου Πανεπιστημίου Αθηνών) χρησιμοποιεί το μετεωρολογικό μοντέλο WRF για τις ατμοσφαιρικές προσομοιώσεις που επιλύει είτε με τον πυρήνα ARW είτε μη υδροστατικά (NMM) (Κατσαφάδος, 2010).

Οι υδρομετεωρολογικές προσομοιώσεις του WRF-Hydro ρυθμίστηκαν για το τελευταίο υποτομέα μοντελοποίησης D4 που περιλαμβάνει κυρίως την έκταση της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού (σχήμα 41).



Σχήμα 44 : Παράδειγμα ρύθμισης του πηυρήνα ARW-WRF του ατμοσφαιρικού μοντέλου και των τεσσάρων υποτμέων μοντελοποίησης D01, D02, D03, D04.

Στα σχήματα 23 έως και 40 περγράφεται η εξέλιξη της υδρομετεωρολογικής προσομοίωσης. Στην παρούσα εργασία σχολιάζονται τα αποτελέσματα για τη βροχόπτωση και την εκτιμώμενη παροχή. Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της χωρικής και χρονικής μεταβολής της παροχής σε σχέση με την εξέλιξη της βροχόπτωσης και η διερεύνηση της καταλληλότητας του υδρομετεωρολογικού μοντέλου σε σύγκριση με το μοντέλο ισόχρονων καμπυλών GIS για την εκτίμηση της παροχής. Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στον Ίναχο ποταμό τον κύριο παραπόταμο του Σπερχειού ποταμού καθώς λόγω των σημαντικών καταστροφών που συνέβησαν στη διάρκεια του πλημμυρικού γεγονότος όπως την κατάρρευση της γέφυρας στην περιοχή Περιβόλι της Σπερχειάδας και τον αποκλεισμό των περιοχών που βρίσκονται στην ορεινή περιοχή ανάντη της λεκάνης του Ίναχου ποταμού (ΕΜΥ, 2015).

Αυξημένη 3 ωρη αθροιστική βροχόπτωση παρουσιάζει το νότιο- νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης του Σπερχειού ποταμού (3 hour accumulated rainfall) παρατηρώντας το χρονικό διάστημα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης μεταξύ 29/01/2015 00 00 UTC και 31/01/2015 00 00 UTC.

Τις πρώτες ώρες της 31ης Ιανουαρίου και συγκεκριμένα ύστερα απο την 30η Ιανουαρίου 21 00 UTC παρατηρείται μια αύξηση της παροχής στον Ίναχο ποταμό και στην νοτιοδυτική πλευρά της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού ποταμού στην περιοχή του Ρουστιανίτη (σχήματα 28,29,30). Αυτή η πληροφορία είναι αρκετα σημαντική εφόσον παρέχεται εκτίμηση για τη χωρική και χρονική έκταση της βροχόπτωσης και πού παρατηρείται η μέγιστη (τρίωρη αθροιστική) συγκέντρωσή της που στην προκειμένη περίπτωση παρατηρείται αρχικά νότια με κατεύθυνση νότια προς νοτιο ανατολικά.

Πιο συγκεκριμένα, μέγιστες τιμές 3ωρης αθροιστικής πρόγνωσης για τη βροχόπτωση στην υδρολογική λεκάνη του Σπερχειού παρατηρούνται στις χρονικές στιγμές:

- μεταξύ 10 00 UTC και 22 00 UTC την 30η Ιανουαρίου 2015 (στα σχήματα 23,24,25,26 υψηλές αθροιστικές συγκεντρώσεις βροχής άνω των 20mm).
- μεταξύ 07 00 UTC και 02 00 UTC την 31η Ιανουαρίου 2015 (σχήματα 28,29,30,31 υψηλές αθροιστικές συγκεντρώσεις βροχής άνω των 15mm).

και μικρότερα γεγονότα βροχής την 29η του Ιανουαρίου (σχήμα 23) και στις 2 Φεβρουαρίου 2015 (σχήμα 38) που συμβάλλουν στην εκτίμηση της συνολικής απορροής στην υδρολογική λεκάνη του Ίναχου.

Οι μέγιστες παροχές στον Ίναχο ποταμό παρατηρούνται μεταξύ του χρονικού διαστήματος:

- απο 31/01/2015 00 00 UTC εως τις τελευταίες ώρες της 01/02/2015 συγκεκριμένα στις 20 00 UTC (σχήματα 30,31,32,33 παρατηρώντας την περιοχή της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού).
- η παροχή αιχμής παρατηρείται στο χρονικό βήμα περίπου 80-85h απο την έναρξη της προσομοίωσης με τιμές μεταξύ 150-180m^3/sec (διαγράμματα 1 και 2 με τις χρονοσειρές παροχής στον Ίναχο ποταμό).

Για τον Σπερχειό ποταμό οι μέγιστες τιμές της παροχής παρατηρούνται κυρίως το χρονικό διάστημα:

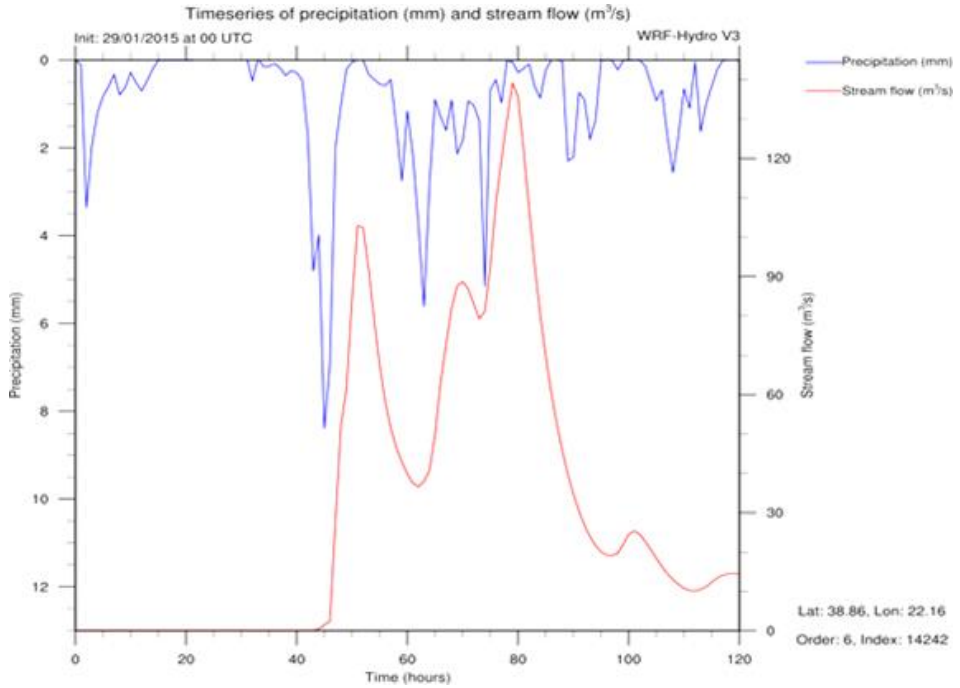
- για την ανάντη περιοχή της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού ποταμού μέχρι το σημείο συμβολής του Ίναχου με το Σπερχειό απο τις πρώτες ώρες της 31/01/2015 01 00 UTC μέχρι το τέλος περίπου της ίδιας μέρας δηλαδή μέχρι 20 00 UTC (σχήματα 30,31,32).

- για την κατάντη περιοχή της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού ποταμού μέχρι την περιοχή Κόμμα (πριν τη διευθέτηση της κοίτης) όλη τη μέρα της 1^{ης} Ιανουαρίου μέχρι τις πρώτες ώρες της 02/02/2015 (σχήματα 33 έως 40).

Θα πρέπει να σημειωθεί οτι η βαθμονόμηση του μοντέλου στηρίχτηκε κυρίως στη default επιλογή των συντελεστών υδραυλικής αγωγημότητας στο υπομοντέλο εδάφους NOAH και στους συντελεστές Manning του υδρογραφικού δικτύου στην υδρολογική λεκάνη του Σπερχειού, καθώς και στη ρύθμιση παραμέτρων για τις γεωμετρικές ιδιότητες της κοίτης του υδρογραφικού δικτύου (channel bottom / channel width).

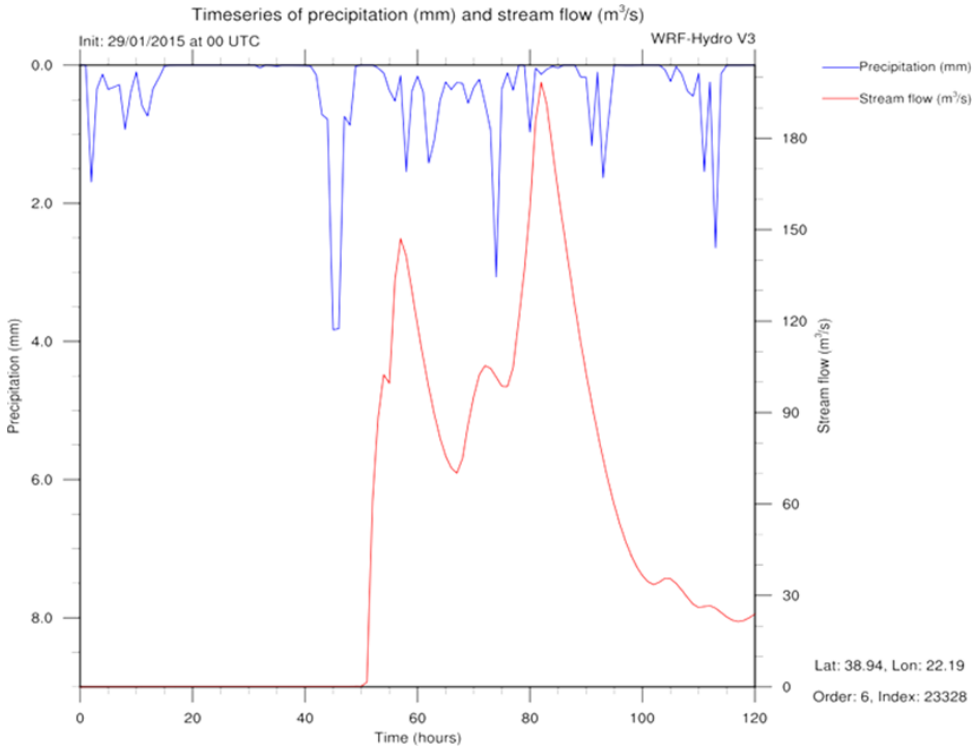
Οι προσομοιώσεις με το υδρομετεωρολογικό μοντέλο WRF-Hydro παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα- πρόκειται για 5 ήμερη πρόγνωση βροχής και παροχής για την υδρολογική λεκάνη του Σπερχειού πριν το πλημμυρικό γεγονός ενω οι παρατηρήσεις απουσιάζουν και για τις δυο μεταβλητές, όσον αφορά τη χωρική τους και τη χρονική τους κατανομή. Καταρχάς δίνεται ποσοτική πληροροφορία για το μέγεθος της βροχής (3 ωρες προγνώσεις αθροιστικής βροχόπτωσης) και για το μέγεθος της αθροιστικής χιονόπτωσης νερού (ισοδυναμία νερού σε mm) για όλη την έκταση της λεκάνης χωρικά και χρονικά (χρονοσειρές πρόγνωσης) οι οποίες μετέπειτα μπορούν να συγκριθούν με τις παρατηρούμενες τιμές (ημερήσιες τιμές) για τους μετεωρολογικούς σταθμούς. Επίσης, παρατηρείται επίσης η προσομοίωση της χιονοκάλυψης (snow kg/m^{-2}) ή η ισοδυναμία σε mm νερού στις προσμοιώσεις (παρατηρείται στο νότιο τμήμα των προσμοιώσεων). Η παρουσία χιονιού υδρολογικά μπορεί να τροποποιήσει την απόκριση των υδρολογικών λεκανών στη διάρκεια μιας πλημμύρας ιδιαίτερα όταν συνδέεται με τήξη χιονιού.

Ο χρόνος υστέρησης (time lag) μεταξύ των μέγιστων της βροχόπτωσης και της απόκρισης (παροχής) υπολογίζεται περίπου στις 35 – 40 ώρες δηλαδή άνω της ημέρας (διαγράμματα παροχής 5 και 6).



Διάγραμμα 4: Χρονοσειρά εκτίμησης πλημμυρικής παροχής (lat lon συντενταγμένες 38.86, 22.16 στην κοίτη του Ίναχου ποταμού) για το χρονικό διάστημα από 29/01/2015 έως 03/02/2015.

Για το πρώτο σημείο (lat lon συντενταγμένες 38.86, 22.16 στην κοίτη του Ίναχου ποταμού) η έναρξη των προσομοιώσεων ξεκινώντας απο 29/01/2015 UTC εως και 03/02/2015 (120 ώρες δηλαδή 5 ήμερη διάρκεια προσομοίωσης) οι μέγιστες τιμές για την βροχόπτωση δείχνουν περίπου 50 ώρες ύστερα απο την έναρξη του γεγονότος και της προσομοίωσης αντίστοιχα δηλαδή περίπου 2 ημέρες ύστερα απο την 29^{η} Ιανουαρίου 2015 δηλαδή στην έναρξη της 31^{ης} Ιανουαρίου. Η μέγιστη τιμή της πλημμυρικής παροχής παρατηρείται περίπου στις 81 ώρες. Η χρονική καθυστέρηση (lag time) μεταξύ του μέγιστου βροχόπτωσης και μέγιστης εκτιμούμενης πλημμυρικής παροχής (maximum discharge) απο τα μοντελοποιημένα υδρογραφήματα είναι περίπου 81-50=31 ώρες δηλαδή εκδηλώνεται στην έναρξη της 1^{ης} Ιανουαρίου. Παρόμοια αποτελέσματα ισχύουν και για το σημείο συμβολής του Ίναχου ποταμού (lat lon 38.94 , 22.19) με τη διαφορά εκτιμούμενης μέγιστης παροχής περίπου 190m^3/sec σε σχέση με την πρώτη εκτίμηση μέγιστης παροχής 130 m^3/sec.



Διάγραμμα 5: Χρονοσειρές πρόγνωσης βροχόπτωσης και παροχής (forecasted values) για χρονικό διάστημα 120 h από 29/01/2015 UTC εως και 03/02/2015 UTC στο σημείο συμβολής του Σπερχειού ποταμού με τον Ίναχο.

6. Εφαρμογή του μοντέλου ισόχρονων καμπυλών με GIS

Ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνται το ΨΜΕ για την υδρολογική λεκάνη του Ίναχου ποταμού ανάλυσης 25x25, οι προγνώσεις του μετεωρολογικού μοντέλου WRF σε δυο σημεία που επιλέχθηκαν τυχαία για την εφαρμογή του μοντέλου ισόχρονων καμπυλών καθώς και GIS θεματικά επίπεδα για την παραγωγή των διάφορων στρωμάτων όπως οι χρήσεις γης και το υδρογραφικό δίκτυο. Για την παρούσα μελέτη παράχθηκαν συνολικά 5 διαφορετικά σενάρια ισόχρονων καμπυλών – ένα για το κάθε 24ωρο πρόγνωσης των επιλεγμένων σημείων.

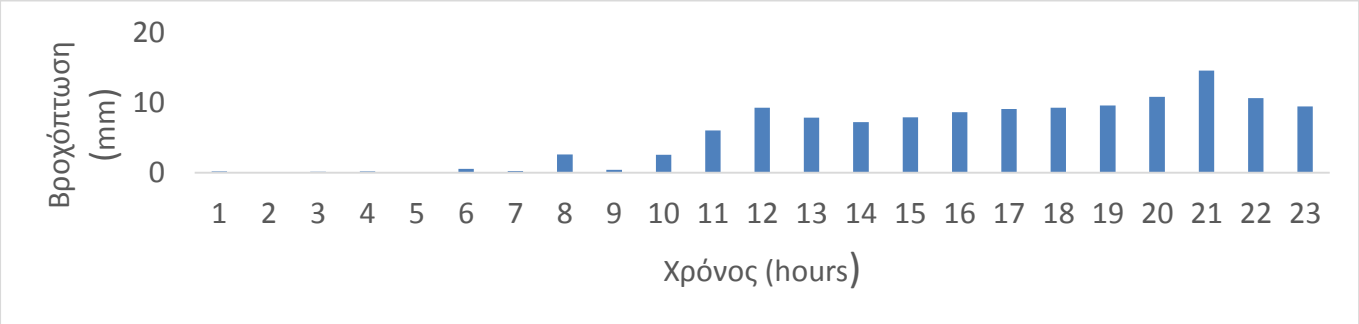
Δηλαδή η 24 ωρη πρόγνωση του WRF για το κάθε σημείο για το χρονικό διάστημα της πλημμύρας (30/01/2015 έως και 01/02/2015) παράγει 6 διαφορετικά σενάρια αθροιστικής συγκέντρωσης βροχόπτωσης (τρια 24ωρα για δυο διαφορετικά σημεία στην υδρολογική λεκάνη του Ίναχου ποταμού). Για τον υπολογισμό του υδρογραφήματος εφαρμόστηκε η εκτίμηση του ιστογράμματος χρόνου-επιφάνειας (time –area method) και μετέπειτα υπολογίστηκε ο όγκος απορροής και η παροχή ανά ώρα του 24ωρου.

Σενάριο 1ο

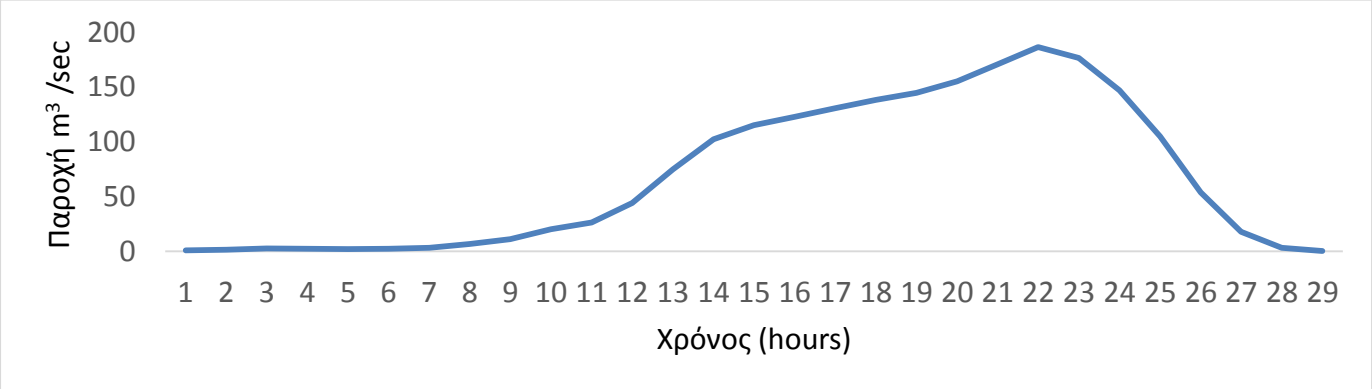
Συνολικά για το σενάριο 1 της πρόγνωσης βροχόπτωσης με το WRF για το 24 ωρο της 30ης Ιανουαρίου 2015, υπολογίστηκαν για την υδρολογική λεκάνη του Ίναχου ποταμού 6 ισόχρονες (χάρτης 11Α) καμπύλες με συνολικό χρόνο συρροής 20.932 sec (χάρτης 11Β). Αυτό σημαίνει στην πράξη ότι το πιο απόμακρο σημείο της λεκάνης με βάση τη συγκεκριμένη πρόγνωση του σημείου (το οποίο βρίσκεται στην περιοχή Δάφνη γεωγραφικά) χρειάζεται περίπου 6 ώρες με βάση την εκτιμούμενη βροχόπτωση να διανύσει από την ανάντη πλευρά της υδρολογικής λεκάνης μέχρι το σημείο συμβολής του Ίναχου με το Σπερχειό ποταμό. Κατά ένα μεγάλο ποσοστό των ισόχρονων καμπυλών ανήκουν στην ισόχρονη 3 δηλαδή κατά μέσο ώρο η βροχόπτωση δημιουργεί χρόνο συρροής περίπου 3-4 ώρες με βάση το συγκεκριμένο μοντέλο ισόχρονων όπως φαίνεται στον Πίνακα 5. Το μέγιστο της βροχόπτωσης παρατηρείται την 21η ώρα της 30ης Ιανουαρίου ενώ το μέγιστο του υδρογραφήματος (κατά προσέγγιση) παρατηρείται 1 ώρα ύστερα την εκδήλωση του μέγιστου της βροχής με παροχή αιχμής 186 m^3/sec (διάγραμμα 6β).

VALUE	Value_Time	COUNT	Area (km^2)
1	3600	31895	1,9934375
2	7200	92301	5,7688125
3	10800	200048	125,030000
4	14400	147594	92,246250
5	18000	56765	3,5478125
6	21600	8861	5,538125

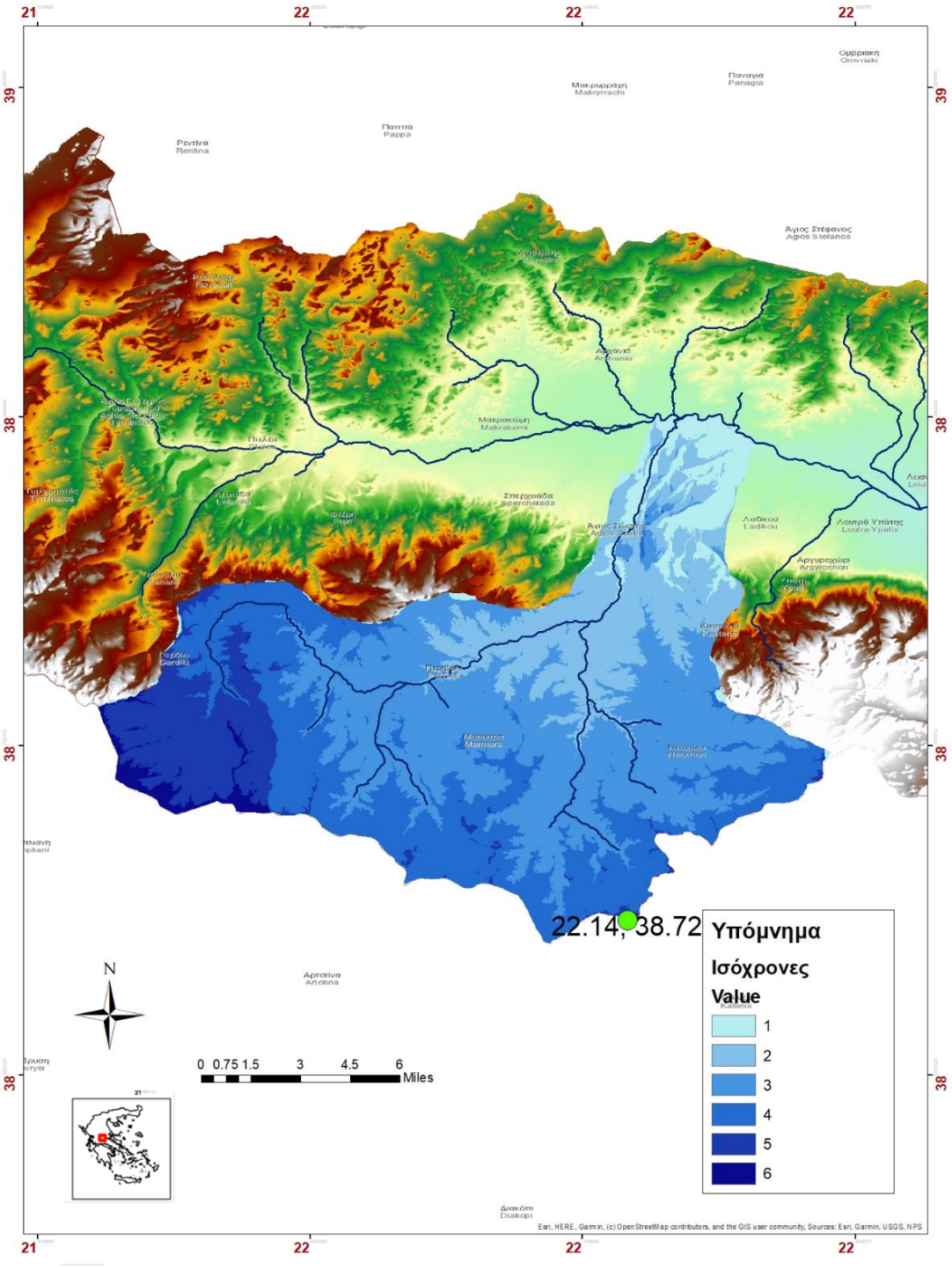
Πίνακας 5: Στατιστικά στοιχεία για τις ψηφίδες (cells) του επιπέδου των ισόχρονων καμπυλών του Σεναρίου 1. Στον Πίνακα η τιμή VALUE αντιπροσωπεύει τη τιμή της κάθε ισόχρονης καμπύλης για το χάρτη 11Α , η στήλη VALUE_Time αντιστοιχεί στη χρονική διάρκεια της κάθε ισόχρονης καμπύλης (ξεκινώντας με χρονικό βήμα μιας ώρας ίσο δηλαδή με το χρονικό βήμα της μέτρησης της βροχόπτωσης, η στήλη COUNT αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ψηφίδων που περιέχονται στην κάθε ισόχρονη καμπύλη και η στήλη AREA αποτελεί την έκταση της κάθε ισόχρονης ζώνης).



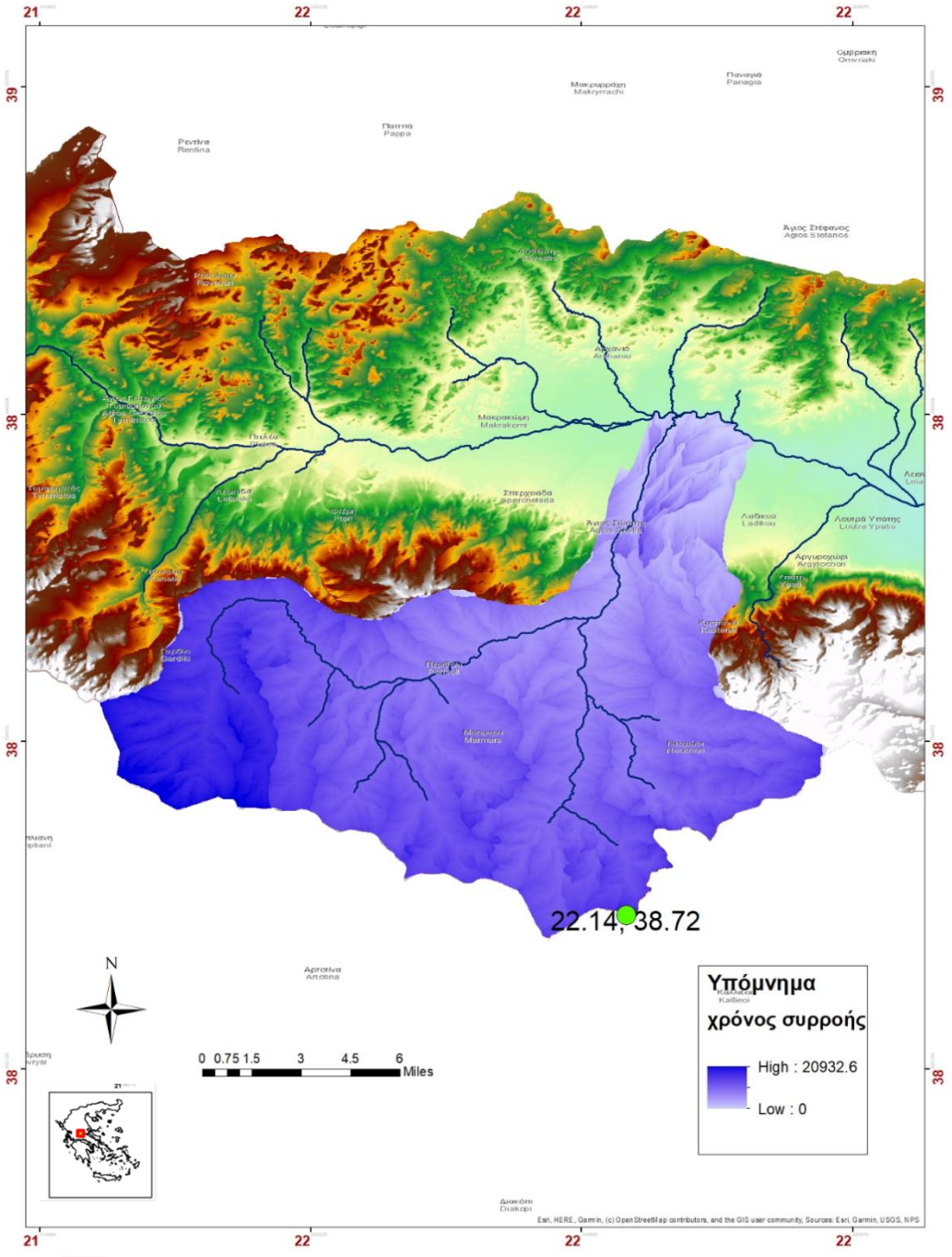
Διάγραμμα 6α: Ιστόγραμμα 24ωρης πρόγνωσης της βροχής για το πρώτο σενάριο στο σημείο με συντενταγμένες lat/lon 22.14/38.72 με το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF.



Διάγραμμα 6β: Εκτιμώμενη παροχή για το πρώτο σενάριο πρόγνωσης της βροχής στον Ίναχο ποταμό (σημείο εξόδου της λεκάνης του Ίναχου) σύμφωνα με το μοντέλο ισόχρονων καμπυλών.



Χάρτης 11Α: Υπολογισμός ισόχρονων καμπυλών για το πρώτο σενάριο πρόγνωσης καιρού στο σημείο (lat/lon 22.14, 38.72) στην ανάντη μεριά της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού.



Χάρτης 11Β: Υπολογισμός χρόνου συρροής για το πρώτο σενάριο πρόγνωσης με το WRF στο σημείο lat/lon (22.14/38.72).

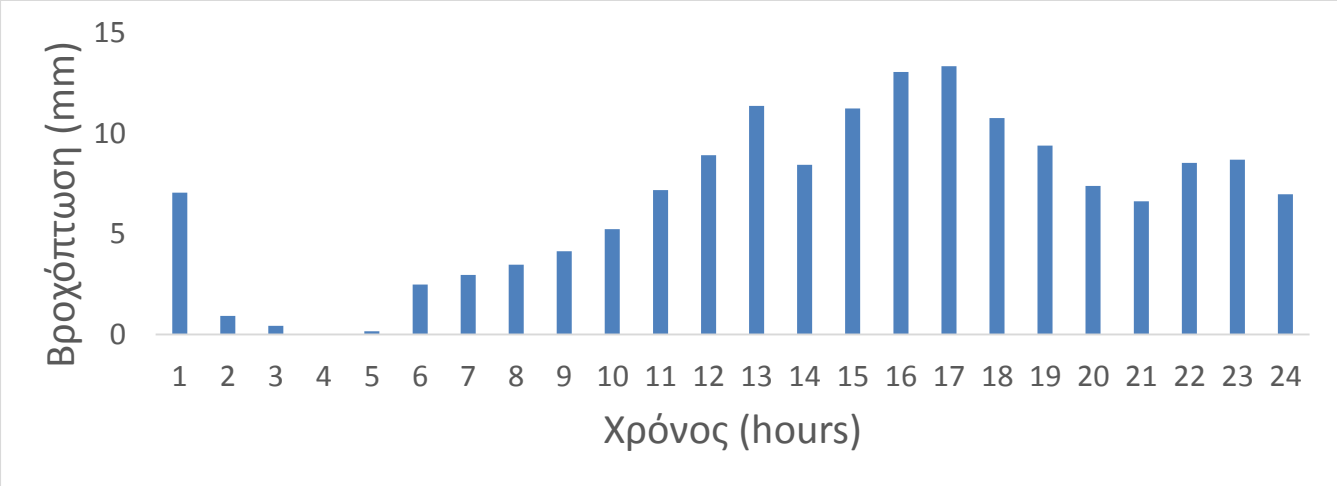
Για το δεύτερο σενάριο 24ωρης πρόγνωσης βροχής με συνολική διάρκεια ίση με 158mm για την ημερομηνία 31/01/2015 από το μετεωρολογικό μοντέλο WRF ο συνολικός χρόνος συγκέντρωσης ισούται περίπου με 33.825 sec (χάρτης 12B). Η παροχή αιχμής (περίπου 85m^3/sec) παρατηρείται ύστερα από τη μέγιστη τιμή της βροχής με χρονική υστέρηση περίπου 2-3 ώρες δηλαδή η απόκριση της λεκάνης είναι αργότερη σε σχέση με την πρώτο σενάριο βροχής (διάγραμμα 6β).

VALUE	Value_Time	COUNT	Area
1	3600	22479	14049375
2	7200	36023	22514375
3	10800	34833	21770625
4	14400	63189	39493125
5	18000	117562	73476250
6	21600	138299	86436875
7	25200	53202	33251250
8	28800	30021	18763125
9	32400	40610	25381250
10	36000	1246	778750

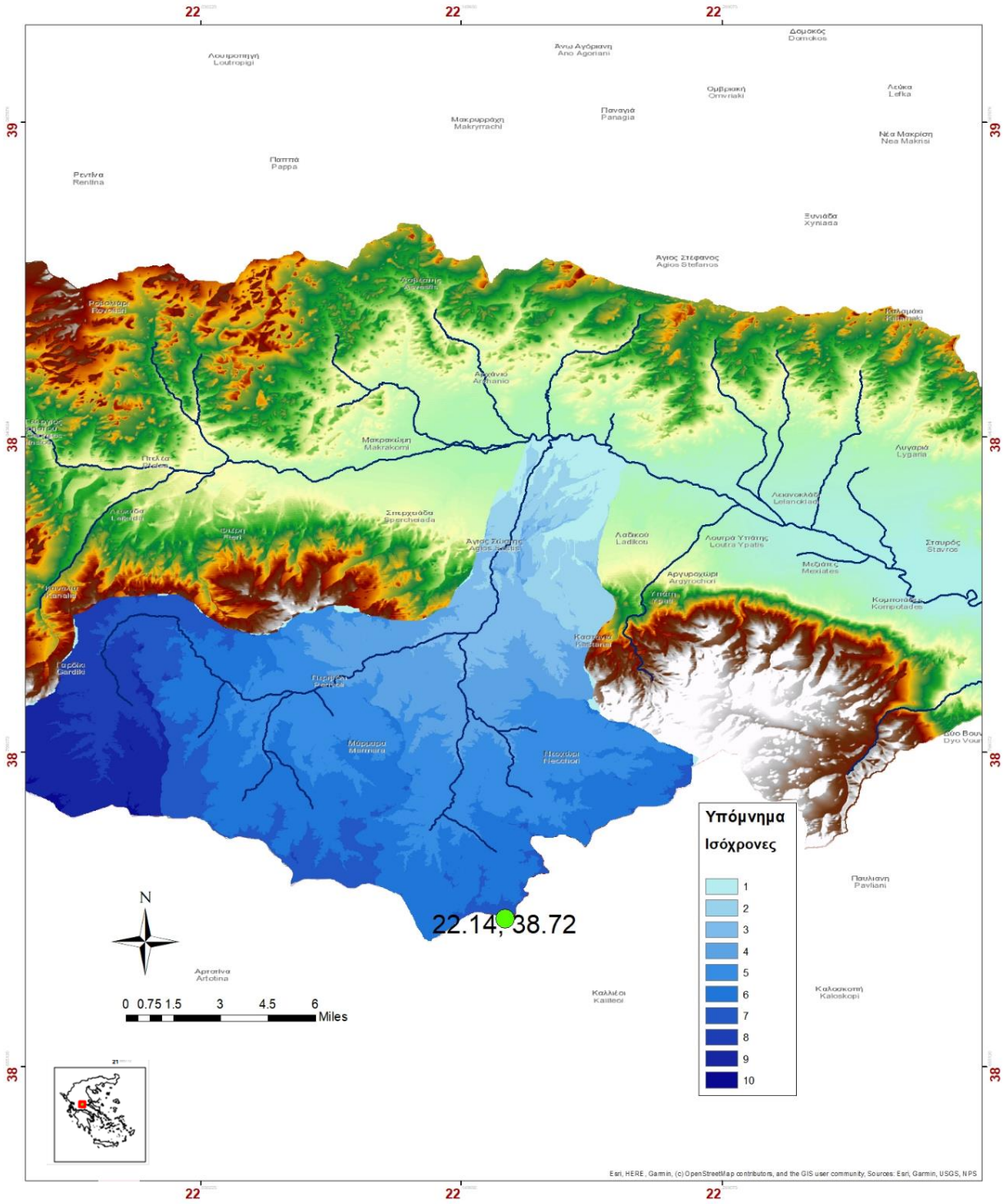
Πίνακας 6:Στατιστικά στοιχεία των ψηφίδων (cells) του ψηφιδωτού επίπεδου (raster) των ισόχρονων καμπύλων για το σενάριο 2 πρόγνωσης της βροχής (χάρτης 12A). Στον Πίνακα η τιμή VLUE αντιπροσωπεύει τη τιμή της κάθε ισόχρονης καμπύλης για το χάρτη 12A , η στήλη VALUE_Time αντιστοιχεί στη χρονική διάρκεια της κάθε ισόχρονης καμπύλης (ξεκινώντας με χρονικό βήμα μιας ώρας ίσο δηλαδή με το χρονικό βήμα της μέτρησης της βροχόπτωσης, η στήλη COUNT αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ψηφίδων που περιέχονται στη κάθε ισόχρονη καμπύλη και η στήλη AREA αποτελεί την έκταση της κάθε ισόχρονης ζώνης).



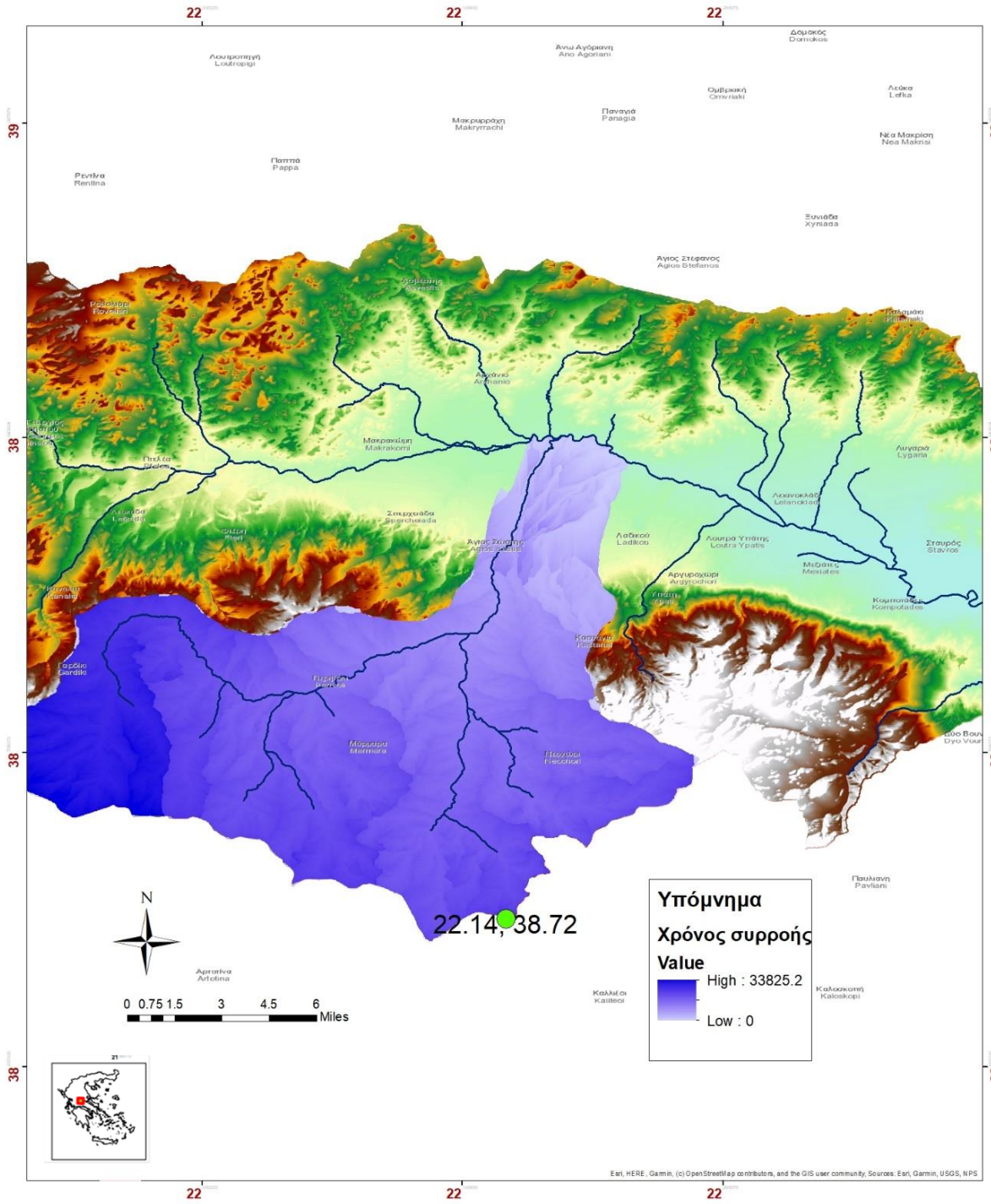
Διάγραμμα 7α: Εκτίμηση παροχής για το δεύτερο σενάριο πρόγνωσης της βροχής (31/01/2015) ανάντη της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού.



Διάγραμμα 7β: Ιστόγραμμα 24ωρης πρόγνωσης της βροχής ανάντη της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου με το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF.



Χάρτης 12Α: Υπολογισμός ισόχρονων καμπυλών για το δεύτερο σενάριο πρόγνωσης καιρού (31/02/2015) στο σημείο (lat/lon 22.14, 38.72) στην ανάντη μεριά της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού.

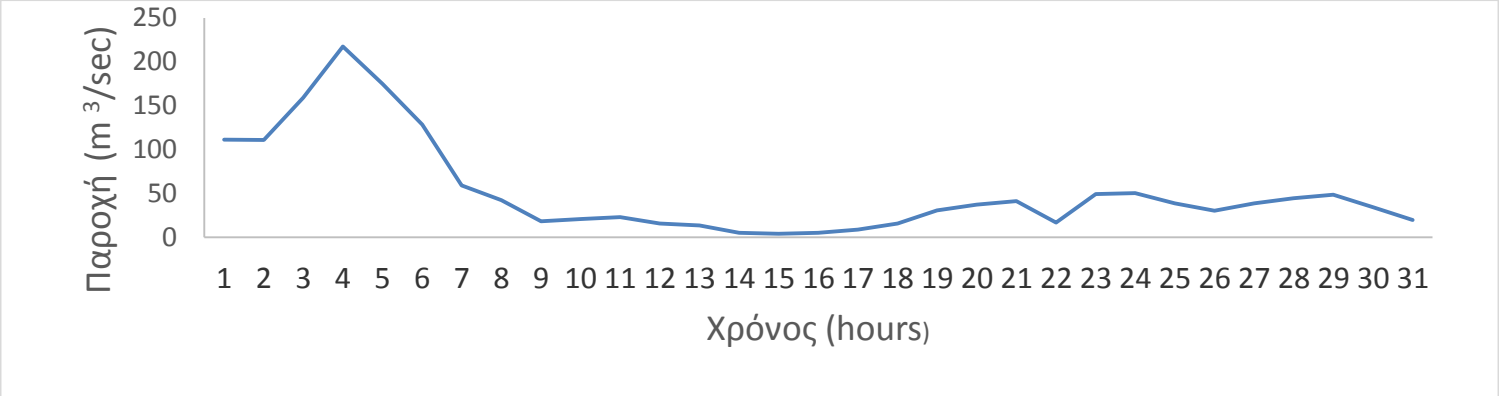


Χάρτης 12Β: Υπολογισμός χρόνου συρροής για το δεύτερο σενάριο πρόγνωσης με το WRF στο σημείο lat/lon (22.14/38.72).

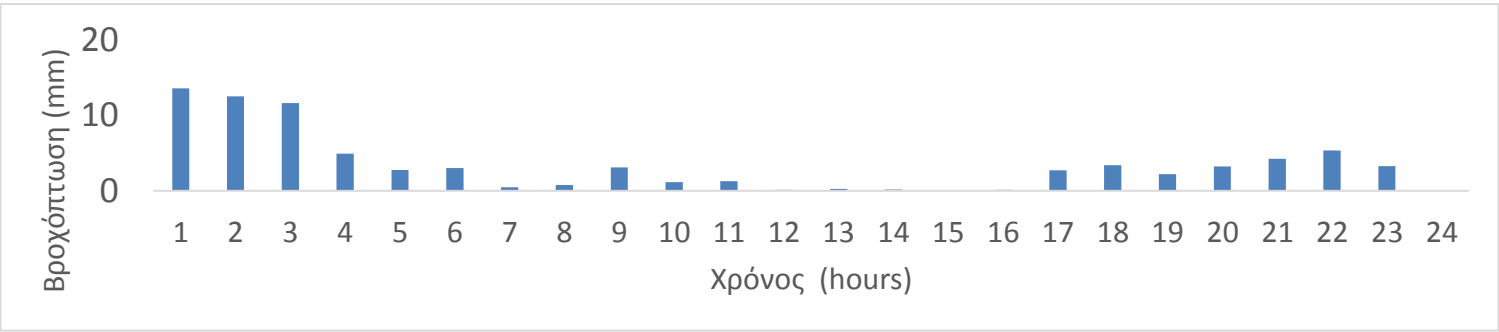
Για το Σενάριο 3 υπολογίστηκαν επτά ισόχρονες καμπύλες και συνολικός χρόνος συρροής 21.992 sec (χάρτης 13Β) με μέσο όρο χρονικά για το συγκεκριμένο ύψος βροχής περίπου 4 ώρες (ο περισσότερος αριθμός ψηφίδων ανάλογα με τα στατιστικά στοιχεία του Πίνακα 7 ανήκουν στην ισόχρονη καμπύλη 4).

VALUE	Value_Time	COUNT	Area
1	3600	47119	29449375
2	7200	50650	31656250
3	10800	115146	71966250
4	14400	208998	130623750
5	18000	57746	36091250
6	21600	57666	36041250
7	25200	139	86875

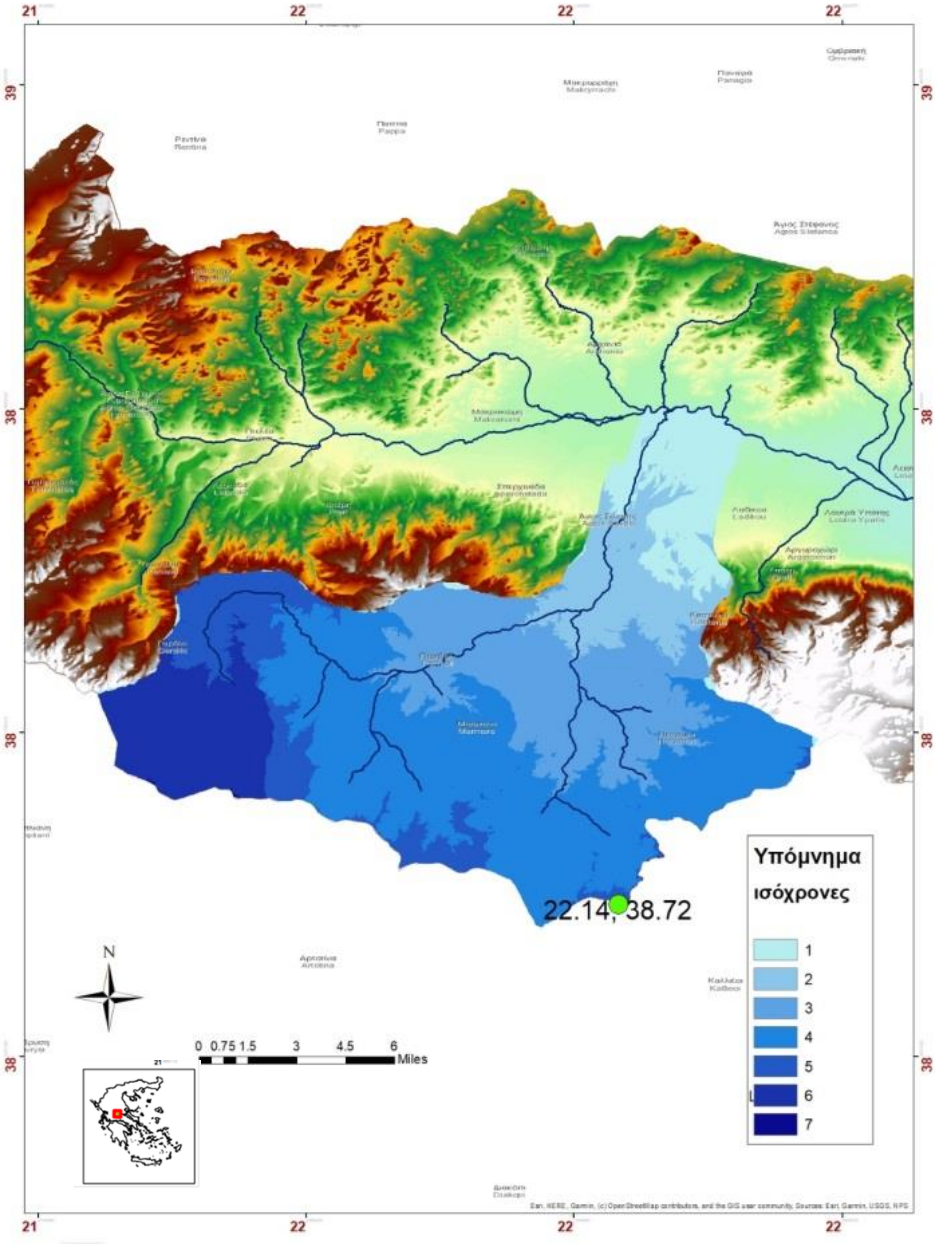
Πίνακας 7: Στατιστικά στοιχεία των ψηφίδων για τις ισόχρονες καμπύλες του Σεναρίου 3. Στον Πίνακα η τιμή VALUE αντιπροσωπεύει τη τιμή της κάθε ισόχρονης καμπύλης για το χάρτη 13Α , η στήλη VALUE_Time αντιστοιχεί στη χρονική διάρκεια της κάθε ισόχρονης καμπύλης (ξεκινώντας με χρονικό βήμα μιας ώρας ίσο δηλαδή με το χρονικό βήμα της μέτρησης της βροχόπτωσης, η στήλη COUNT αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ψηφίδων που περιέχονται στην κάθε ισόχρονη καμπύλη και η στήλη AREA αποτελεί την έκταση της κάθε ισόχρονης ζώνης).



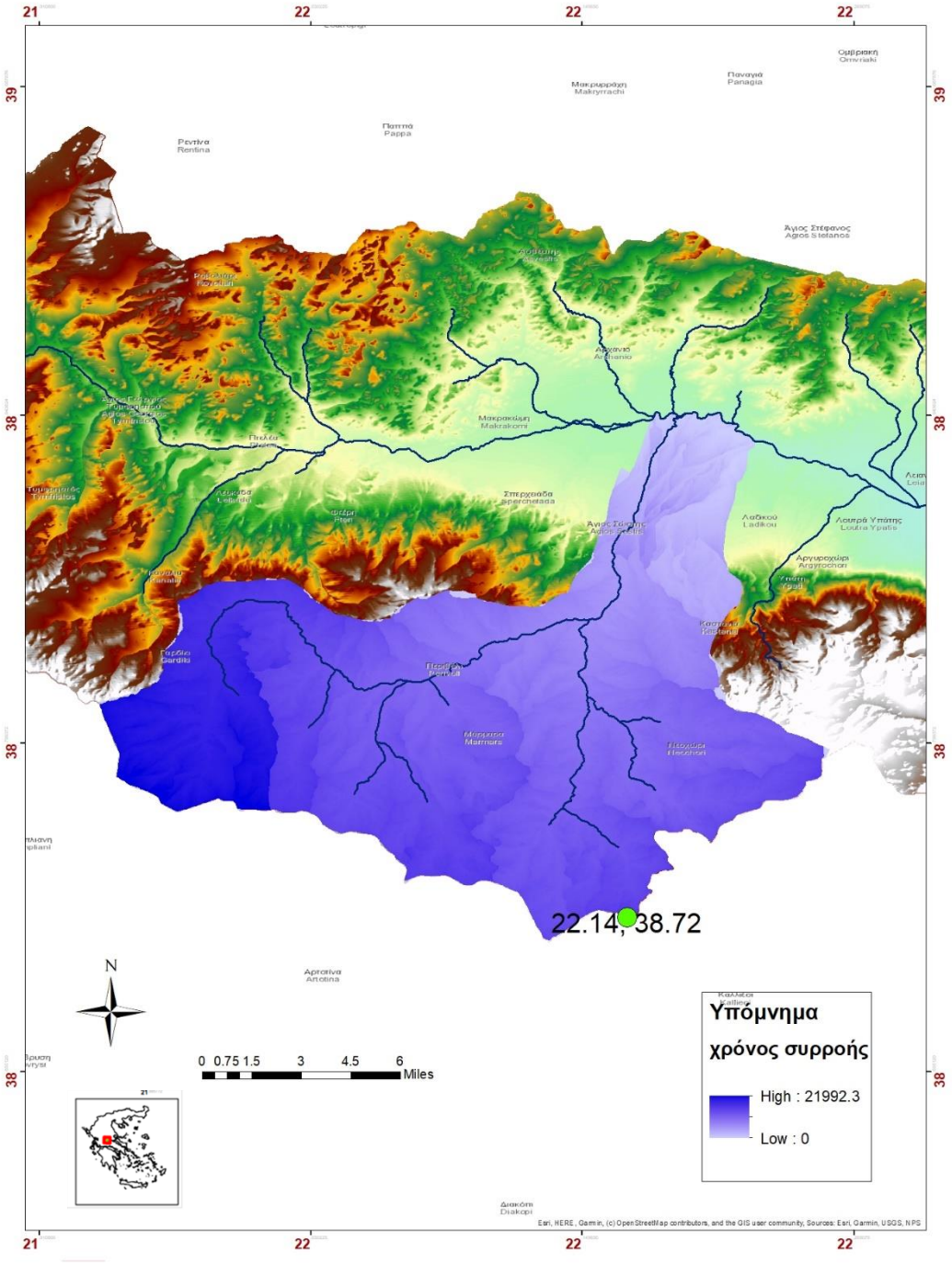
Διάγραμμα 8α: Εκτίμηση παροχής για το τρίτο σενάριο πρόγνωσης της βροχής (01/02/2015) ανάντη της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού.



Διάγραμμα 8β: Εκτίμηση βροχής για το τρίτο σενάριο πρόγνωσης της βροχής (01/02/2015) ανάντη της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού.

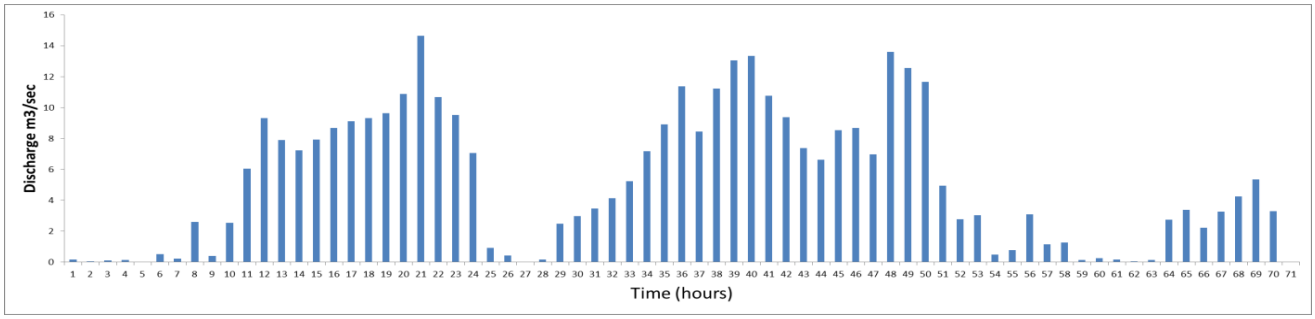


Χάρτης 13Α: Υπολογισμός ισόχρονων καμπυλών για το τρίτο σενάριο πρόγνωσης καιρού (01/02/2015) στο σημείο (lat/lon 22.14, 38.72) στην ανάντη μεριά της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού.

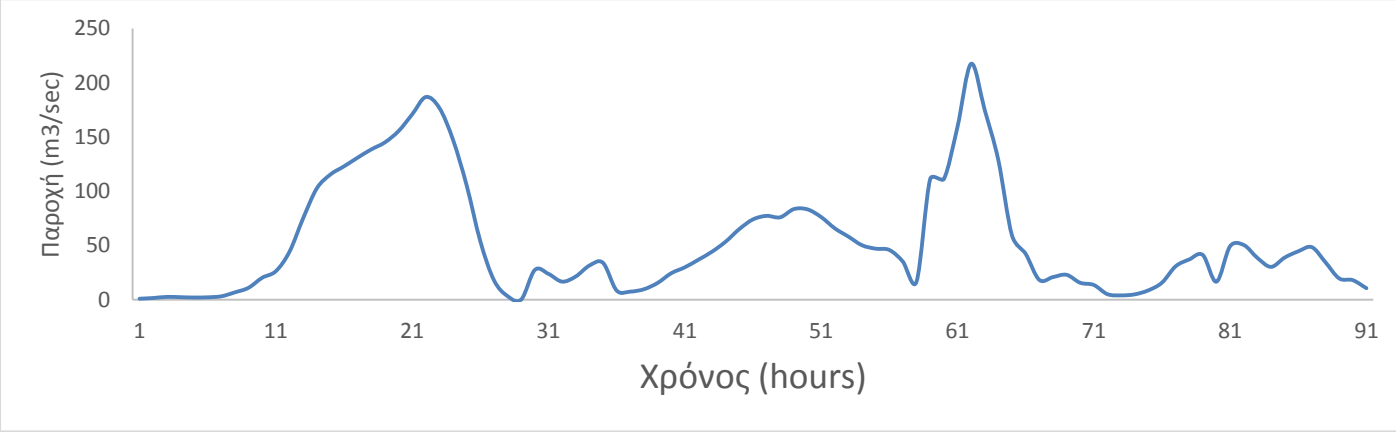


Χάρτης 13Β: Υπολογισμός χρόνου συρροής για το τρίτο σενάριο πρόγνωσης βροχής με το WRF στο σημείο lat/lon (22.14/38.72).

Το τελικό υδρογράφημα (Διάγραμμα 10) για την πρόγνωση του πλημμυρικού γεγονότος για το τριήμερο 30/01/2015 -01/02/2015 για το πρώτο σημείο πρόγνωσης της βροχής, δίνει κάποιες πληροφορίες για την παροχή αιχμής (ως μια πιθανή εκδοχή) και τη διάρκεια του πλημμυρικού γεγονότος. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της υδρολογικής λεκάνης και ανάλογα με το ύψος βροχής ο χρόνος συρροής (συγκέντρωσης) για κάθε σενάριο όπως παρατηρείται αλλάζει. Μεγάλοι χρόνοι συρροής δηλαδή πάνω απο 2-3 ώρες συνιστούν σε μια πιο ομαλή απόκριση της λεκάνης διότι η απορροή απο τα ανάντη μέχρι το σημείο εξόδου της υδρολογικής λεκάνης γίνεται με αργότερο ρυθμό. Το πιο σημαντικό είναι ότι οι προσομοιώσεις του WRF παρέχουν εκτιμήσεις για τα πλημμυρικά επεισόδια στην λεκάνη του Ίναχου ακόμα και χωρίς την παρουσία μετρήσεων.



Διάγραμμα 9: Πρόγνωση βροχής WRF για το σημείο lat/lon (22.14/ 38. 72) κοντά στην περιοχή Δάφνη ανάντη της λεκάνης του Ίναχου ποταμού για το χρονικό διάστημα 30/01/2015 έως και 01/02/2015 (72 ώρες χρονική διάρκεια πρόγνωσης του σεναρίου βροχής).



Διάγραμμα 10: Εκτίμηση παροχής Q (t) για το χρονικό διάστημα 30/01/2015 έως και 01/02/2015 στον Ίναχο ποταμό (συμβολή με Σπερχειό).

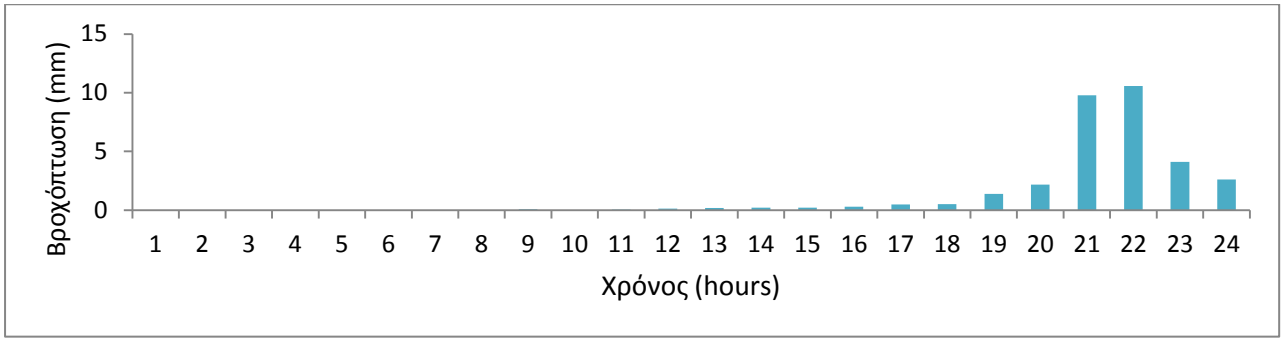
Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου των ισόχρονων καμπυλών για το σενάριο 4 φαίνονται στον Πίνακα 8. Για το σενάριο 4, η πρόγνωση βροχής με το WRF στο σημείο LAT/LON 22.04, 38.93 εκτιμήθηκε συνολικό ύψος βροχής ίσο με 32mm (διάγραμμα 11). Για το λόγο αυτό παρατηρείται πολύ μεγαλύτερος, χρόνος συρροής στην υδρολογική λεκάνη του Ίναχου ποταμού συνολικά 52.831 sec που αντιστοιχεί στην εκτίμηση 15 επιπέδων ισόχρονων καμπυλών. Ο μέσος όρος του χρόνου απορροής σε αυτό το σενάριο υπολογίζεται περίπου σε 9 ώρες που αντιστοιχεί στο μέγιστο αριθμό των ψηφίδων (cells) (90.166 ψηφίδες σύμφωνα με τον πίνακα 8). Για το τέταρτο σενάριο πρόγνωσης βροχής με το WRF στο σημείο lat/lon 22.04/38.93 η εκτιμώμενη βροχή όπως φαίνεται και απο το διάγραμμα 11 παρουσιάζει μονο δυο μέγιστα την 21η και 22η ώρα με τη μέγιστη παροχή (διάγραμμα 12) να εκτιμάται περίπου στα 120m3/sec. Ο ρυθμός συρροής για το συγκεκριμένο σενάριο είναι πολύ μικρότερος άρα περισσότερες ισόχρονες καμπύλες (σύμφωνα με τον Πίνακα 8 αριθμός ισόχρονων ισος με 15). Η κατανομή της βροχής είναι αρκετά ανομοιόμορφη και η αθροιστική βροχή σε σχέση με προηγούμενα σενάρια (για παράδειγμα το πρώτο σενάριο και το δεύτερο σενάριο) ανα τρίωρο είναι μικρότερη και απουσιάζει για το σύνολο της ημέρας. Επίσης το σημείο αυτό απέχει αρκετά απο τους υδρογραφικούς κλάδους της υδρολογικής λεκάνης καθώς βρίσκεται στην κατάντη μεριά της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού (χάρτης 14Α και χάρτης 14Β).

Παρουσιάζει ενδιαφέρον το γεγονός οτι η χωρική και χρονική εξέλιξη της πρόγνωσης βροχής εκτιμάει διαφορετικά υδρογραφήματα στη λεκάνη του Σπερχειού συνεπώς σημεία κοντά στα σενάρια τέσσερα και πέντε ενδεχόμενα να συμβάλλουν περισσότερο στην εκδήλωση πλημμυρών στο Σπερχειό ποταμό (΄τελος της 31^{ης} Ιανουαρίου με αρχές 1^{ης} Ιανουαρίου).

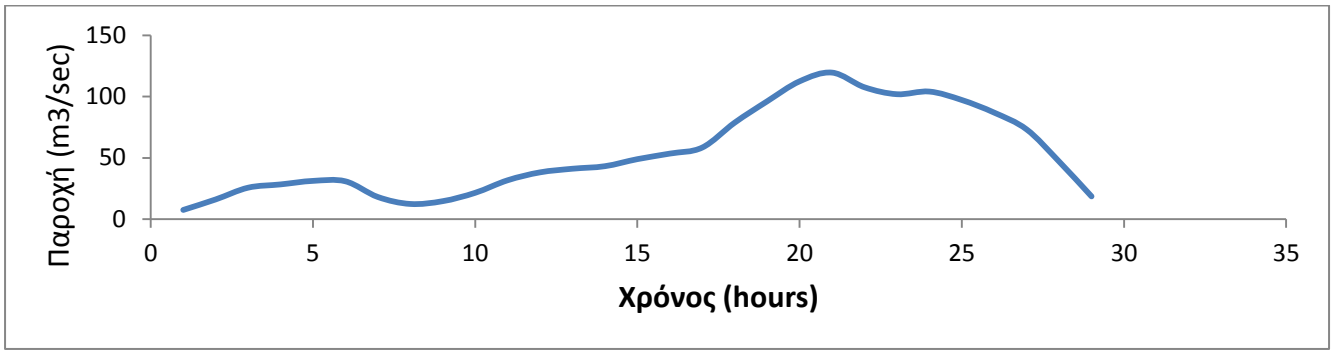
VALUE	Value_Time	COUNT	Area
1	3600	11578	7236250
2	7200	18287	11429375
3	10800	23402	14626250
4	14400	20372	12732500
5	18000	31408	19630000
6	21600	43211	27006875
7	25200	64521	40325625
8	28800	91070	56918750
9	32400	90166	56353750
10	36000	55537	34710625
11	39600	20032	12520000
12	43200	19361	12100625
13	46800	32912	20570000
14	50400	14620	9137500
15	54000	987	616875

Πίνακας 8: Στατιστικά στοιχεία των ψηφίδων (cells) για την κάθε ισόχρονη καμπύλη του Σεναρίου 4. . Στον Πίνακα 8 η τιμή VALUE αντιπροσωπεύει τη τιμή της κάθε ισόχρονης καμπύλης για το χάρτη 13A , η στήλη VALUE_Time αντιστοιχεί στη χρονική διάρκεια της κάθε ισόχρονης καμπύλης (ξεκινώντας με χρονικό βήμα μιας ώρας ίσο δηλαδή με το χρονικό βήμα της μέτρησης της βροχόπτωσης, η στήλη COUNT αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ψηφίδων που

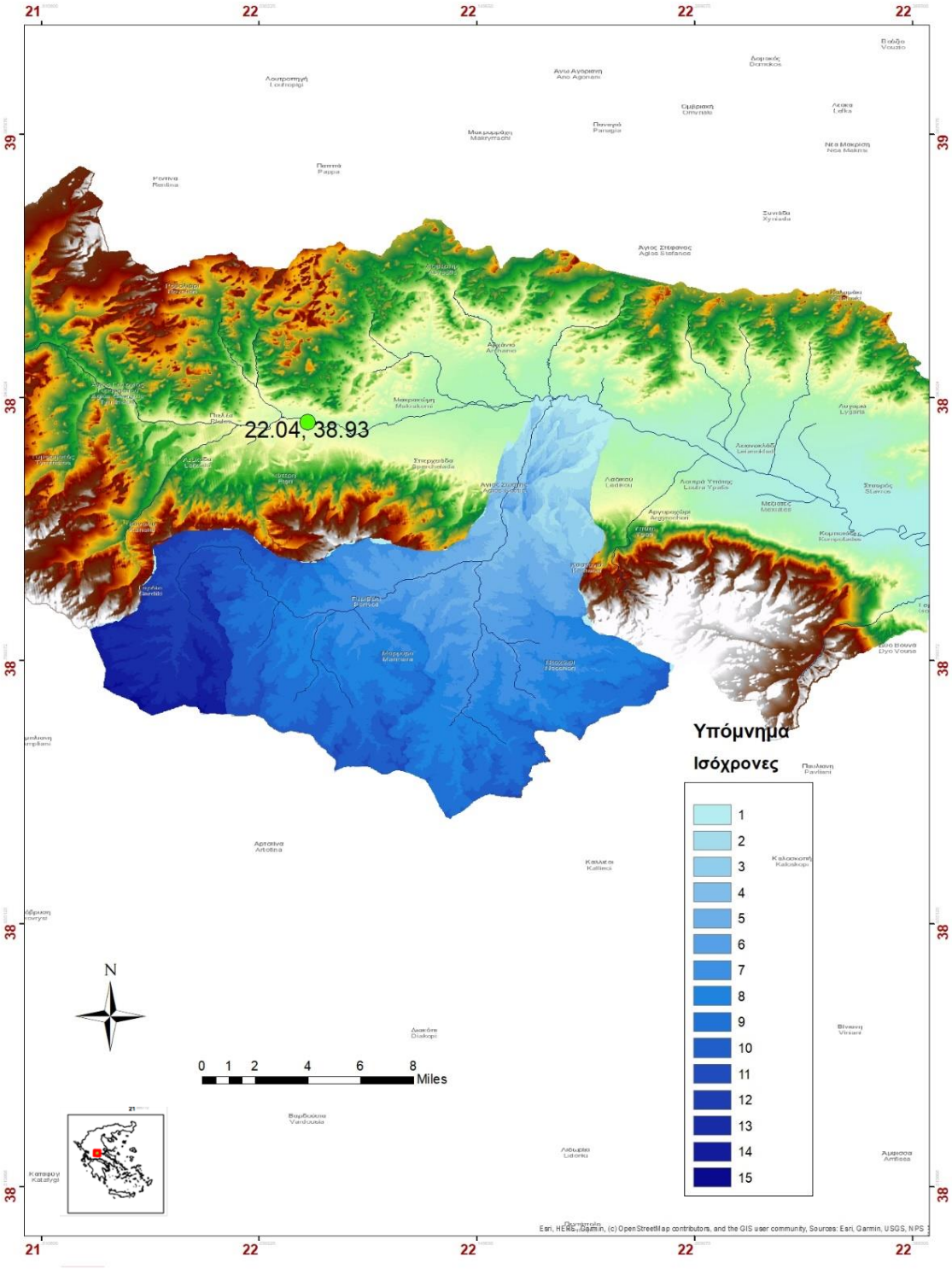
περιέχονται στην κάθε ισόχρονη καμπύλη και η στήλη AREA αποτελεί την έκταση της κάθε ισόχρονης ζώνης).



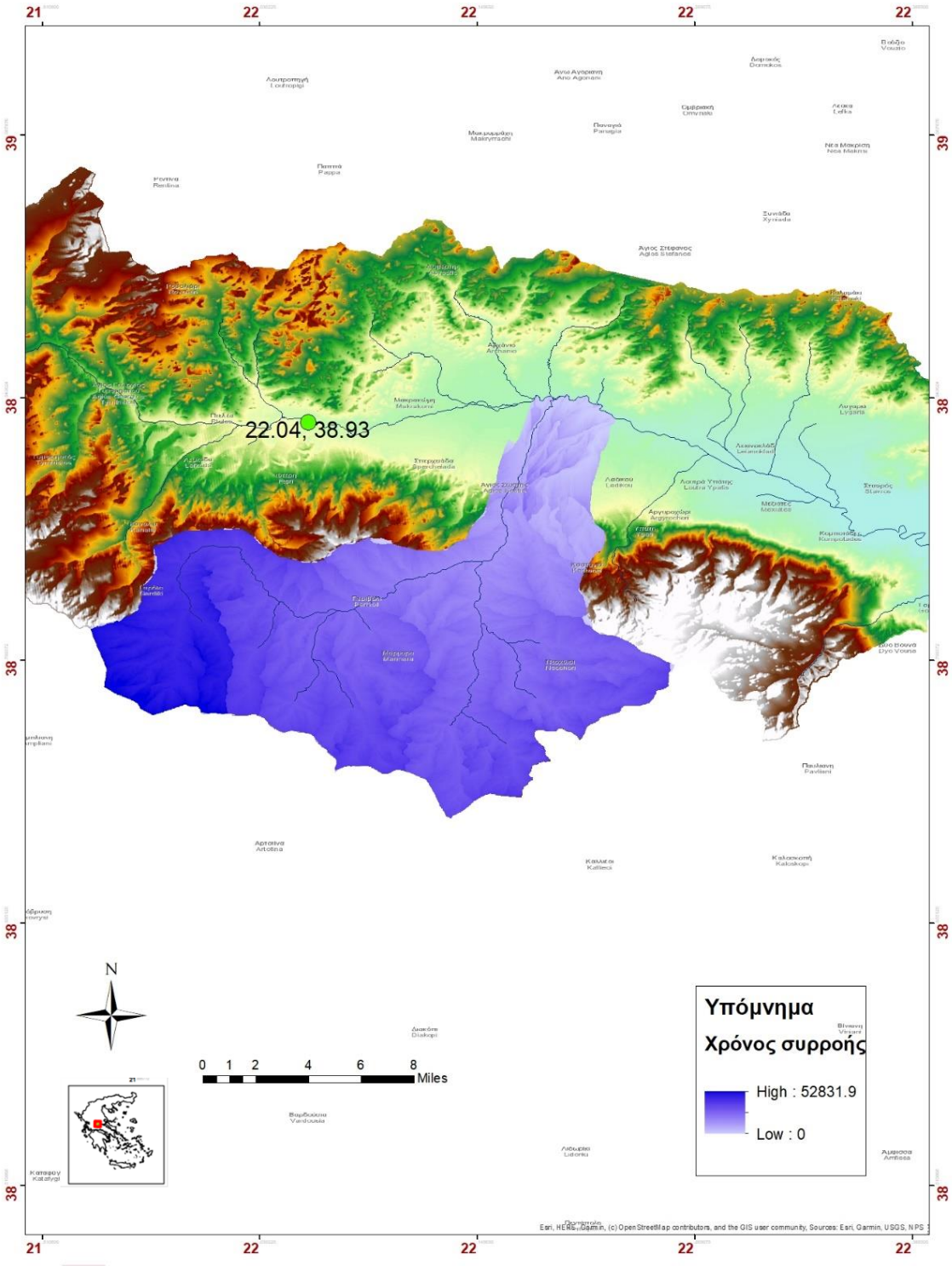
Διάγραμμα 11: Πρόγνωση βροχής με το WRF για το τέταρτο σενάριο πρόγνωσης (30/01/2015) στο σημείο κατάντη της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου σημείο (lat/lon 22.14, 38.72).



Διάγραμμα 12: Πρόγνωση παροχής του Ίναχου για το τέταρτο σενάριο πρόγνωσης με το μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής ισόχρονων.



Χάρτης 14Α: Υπολογισμός ισόχρονων καμπυλών για το τέταρτο σενάριο πρόγνωσης καιρού στο σημείο (lat/lon 22.14, 38.72) στην ανάντη μεριά της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού.

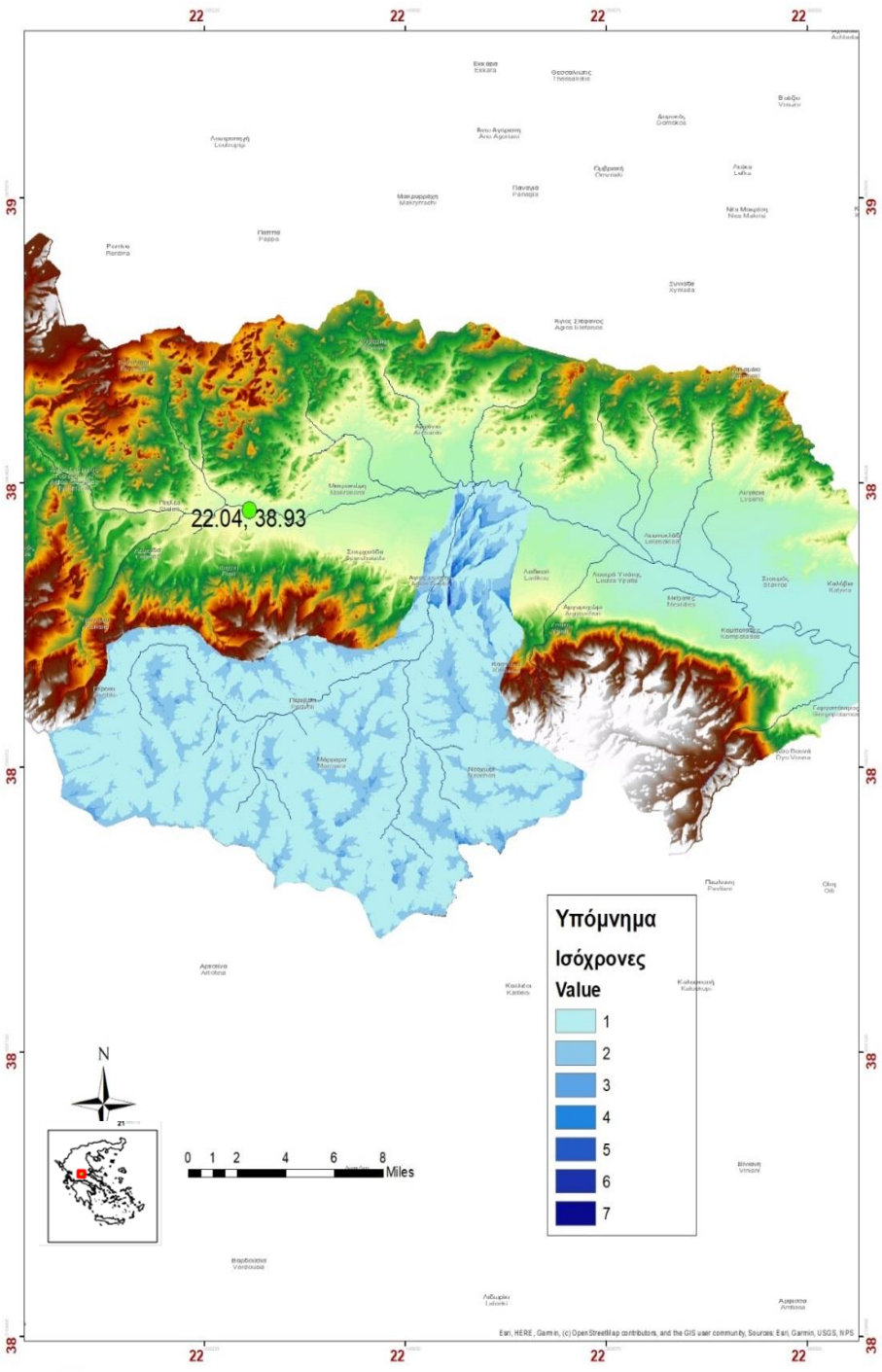


Χάρτης 14Β: Υπολογισμός χρόνου συρροής για το τέταρτο σενάριο πρόγνωσης με το WRF στο σημείο lat/lon (22.14/38.72) κοντά στην περιοχή Καστρί κατάντη της περιοχής της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου.

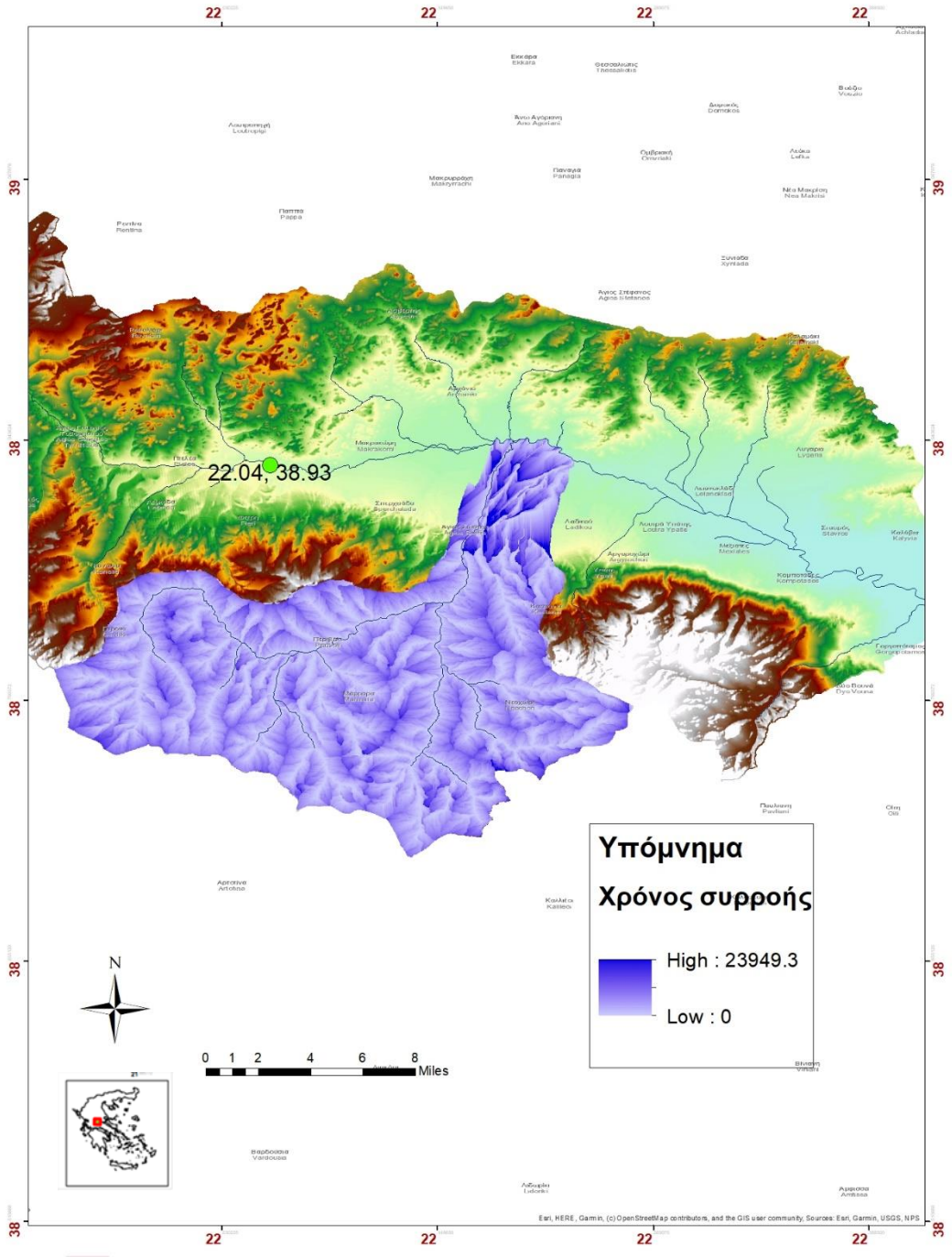
Για το πέμπτο σενάριο πρόγνωσης εκτιμήθηκε περίπου μέσος χρόνος παραμονής ίσος με 1 ώρα ενώ υπολογίστηκαν περίπου 6 ισόχρονες καμπύλες. Ο χρόνος συρροής για το συγκεκριμένο σενάριο βροχής (31/01/2015) στο σημείο κατάντη της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού εκτιμήθηκε στα 23.949sec όσο και στο σενάριο 3 (Πίνακας 9, Χάρτης 15Α και Χάρτης 15Β). Παρατηρούνται μικροί χρόνοι συρροής κοντά στους υδρογραφικούς κλάδους ενώ οι μεγαλύτεροι βρίσκονται στην κατάντη μεριά της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου και σε σημεία απομακρυσμένα απο το υδρογραφικό δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή η τοπογραφική κλίση του εδάφους επιδρά στον υπολογισμό ταχύτητας ροής στην υδρολογική λεκάνη του Ίναχου Ποταμού: τα σημεία με μικρότερη τοπογραφική κλίση που βρίσκονται πιο κοντά στους υδρογραφικούς κλάδους και στην κατάντη μεριά της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου παρουσιάζουν μικρότερους χρόνους συρροής σε σχέση με τα σημεία που βρίσκονται στους ορεινούς αξονες του υδρογραφικού δικτύου ή σε σημεία κατάντη της υδρολογικής λεκάνης με πολύ μικρές εδαφικές κλίσεις.

VALUE	Value_Time	COUNT	Area
1	3600	395966	247478750
2	7200	124813	78008125
3	10800	13806	8628750
4	14400	2182	1363750
5	18000	486	303750
6	21600	205	128125

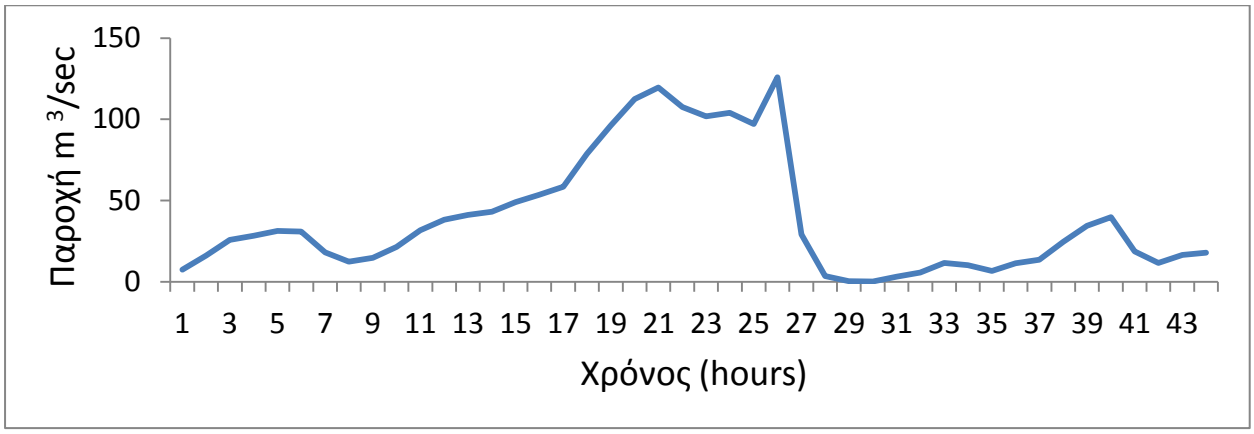
Πίνακας 9: Στατιστικά στοιχεία των ψηφίδων (cells) των ισόχρονων καμπυλών του Σεναρίου 5. Υπολογιζόμενος μέγιστος χρόνος παραμονής του νερού στο σενάριο αυτό ισούται με 1 ώρα.



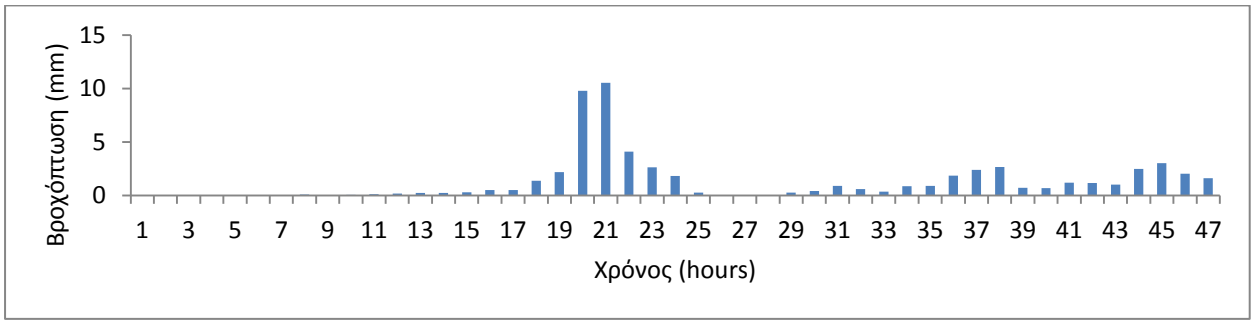
Χάρτης 15Α: Υπολογισμός ισόχρονων καμπυλών για το πρώτο σενάριο πρόγνωσης καιρού στο σημείο (lat/lon 22.14, 38.72) στην ανάντη μεριά της υδρολογικής λεκάνης του Ίναχου ποταμού.



Χάρτης 15Β: Υπολογισμός χρόνου συρροής για το πέμπτο σενάριο πρόγνωσης με το WRF στο σημείο lat/lon (22.14/38.72) κοντά στην περιοχή Καστρί.



Διάγραμμα 13: Υδρογράφημα πλημμυρικής παροχής για τα σενάρια 4 και 5.



Διάγραμμα 14: Πρόγνωση βροχής (mm) για τα σενάρια 4 και 5.

Στο υδρογράφημα του διαγράμματος 13 που αποτελεί το συνολικό υδρογράφημα για τα δυο σενάρια βροχής 4 και 5, παρατηρούνται δυο παροχές αιχμής η μια περίπου στο χρονικό βήμα 20h (119 m^3/sec) και η δεύτερη περίπου στο χρονικό βήμα 26h (125 m^3/sec). Στη δεύτερη περίπτωση το γεγονός παρουσιάζει περίπου μια παροχή αιχμής ενώ στην πρώτη περίπτωση (σενάρια 1,2,3) για το χρονικό διαστημα 30/01/2015 εως και 01/02/2015 εκτιμάται περισσότερη αύξηση της παροχής (γεγονός που εμφανίζονται πολλές παροχές αιχμής).

7. Ανάλυση αποτελεσμάτων και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση των δυο μοντέλων κυρίως ως προς την εκτίμηση της παροχής στην υδρολογική λεκάνη του Ίναχου ποταμού στη διάρκεια της πλημμύρας μεταξύ 30/01/2015 εως και 01/02/2015. Τα δυο μοντέλα διαφέρουν αρκετά ως προς το τρόπο εκτίμησης της παροχής παρόλα αυτά υπάρχουν ομοιότητες στην εφαρμογή τους όπως η αξιοποίηση του ΨΜΕ υψηλής ανάλυσης (100m για το υδρομετεωρολογικό και 25m για το μοντέλο των ισόχρονων με GIS) για την εκτίμηση της παροχής στο υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης του Σπερχειού ποταμού. Επίσης και τα δυο μοντέλα αξιοποιούν τις υδρολογικούς αλγόριθμους του GIS (επίπεδο διεύθυνσης ροής, επίπεδο συγκέντρωσης ροής, τάξεις του υοδρογραφικού δικτύου Strahler) καθώς και παραγόμενο ψηφιδωτό επίπεδο του συντελεστή τραχύτητας manning για την εκτίμηση της απορροής στην υδρολογική λεκάνη του Ίναχου.

Και τα δυο μοντέλα προσομοιώνουν την παροχή εκτιμώντας παρόμοιες τιμές για το πλημμυρικό γεγονός αλλά τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του υδρογραφήματος πλημμύρας διαφέρουν αρκετά για τις δυο προσομοιώσεις:

- Στην περίπτωση του υδρομετεωρολογικού ο χρόνος υστέρησης του πλημμυρικού γεγονότος για την υδρολογική λεκάνη του Ίναχου υπολογίζεται περίπου 40 ώρες ενώ για το μοντέλο των ισόχρονων καμπυλών ο χρόνος υστέρησης (η μέγιστη τιμή της απόκρισης) υπολογίζεται (μέση τιμή) περίπου 2 ώρες όπως φαίνεται στα πέντε διαφορετικά σενάρια βροχόπτωσης
- Εντούτοις, το υδρομετεωρολογικό εκτιμάει πλήρως με βάθος εκτίμησης 5 ημερών τη χωρική και χρονική κατανομή της βροχής και αυτό παρουσιάζει αρκετά μεγάλο ενδιαφέρον τόσο ερευνητικό αλλά και πρακτικό. Γνωρίζοντας την έκταση του φαινομένου και εκτιμώντας πού και πότε περίπου υπολογίζονται μέγιστες τιμές βροχής στην υδρολογική λεκάνη της περιοχής μελέτης τότε είναι περισσότερο εύκολο να ληφθούν αποφάσεις σχετικά με δράσεις πρόληψης (ενημέρωση αρμόδιων φορέων και ενημέρωση κοινού).

Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την εκτίμηση της παροχής καθιστά το υδρομετεωρολογικό μοντέλο ιδιαίτερα χρήσιμο για την πρόληψη έντονων καιρικών φαινομένων κυρίως έντονων βροχοπτώσεων και πλημμυρών.

Ένας σημαντικός περιορισμός στην εφαρμογή του υδρομετεωρολογικού μοντέλου είναι η απουσία περισσότερων παρατηρήσεων βροχής (βροχομετρικών σταθμών) και παρατηρήσεων παροχής για την επαλήθευση και βαθμονόμηση του μοντέλου. Η περίοδος βαθμονόμησης και επαλήθευσης συνήθως πραγματοποιείται για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους για τη βελτίωση της αξιοπιστίας των προβλέψεων.

- Στο μοντέλο ισόχρονων καμπυλών με το GIS γίνεται εκτίμηση της παροχής με έναν απλούστερο τρόπο: οι κύριες παράμετροι που συνεκτιμώνται για τον υπολογισμό της παροχής είναι η τοπογραφία, η κλίση εδάφους, το συνολικό ύψος βροχόπτωσης το οποίο θεωρείται στο μοντέλο αυτό ομοιόμορφο και σταθερής έντασης για όλη την υδρολογική λεκάνη του Ίναχου ποταμού και ο συντελεστής τραχύτητας. Βασικός περιορισμός του μοντέλου αυτού είναι η ομοιόμορφη κατανομή της ίδιας τιμής της βροχής (ίδια ένταση) σε αντίθεση με το υδρομετεωρολογικό μοντέλο το οποιο εκτιμάει πλήρως τη χωροχρονική κατανομή της βροχής για όλη την έκταση του τομέα μοντελοποίησης και της υδρολογικής λεκάνης του Σπερχειού ποταμού για όλα τα σημεία που καλύπτουν την ευρύτερη περιοχή της λεκάνης του Σπερχειού. Το μοντέλο ισόχρονων συνδυάζει τις σημειακές προγνώσεις της βροχής του ατμοσφαιρικού μοντέλου WRF για την εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής μέσω εφαρμογής του μοντέλου ισόχρονων καμπυλών μη υπολογίζοντας όμως τη χωρική και χρονική εξέλιξή της.

Η σημαντική διαφοροποίηση στους χρόνους υστέρησης των υδρογραφημάτων ανάμεσα στα δυο μοντέλα, ενδεχόμενα να οφείλεται στο τρόπο επίλυσης των φυσικών διεργασιών για την εκτίμηση της απορροής στην πρώτη περίπτωση, με το WRF-Hydro επιλύονται εξισώσεις για την επιφανειακή απορροή, για την υποδόρια απορροή, για την ποσότητα του νερού που διοδεύεται κατάντη της κοίτης του Ίναχου, επιλύονται εξισώσεις για τον υπολογισμό των ατμοσφαιρικών διεργασιών λαμβάνοντας υπόψη αρκετές παραμέτρους (εδαφική υγρασία, χιονόπτωση, θεμοκρασία, πίεση ατμόσφαιρας, ταχύτητα ανέμου) ενώ στη δεύτερη του μοντέλου ισόχρονων καμπυλών με το GIS γίνεται σαφής η ευαισθησία του μοντέλου στα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της υδρολογικής λεκάνης.

Πιο συγκεκριμένα αυτό φαίνεται στην εκίμηση της παροχής στα δυο τελευταία σενάρια (4 και 5) πώς διαφοροποιείται ο χρόνος συρροής της υδρολογικής λεκάνης σε σχέση με την απόσταση απο τους υδρογραφικούς κλάδους (σενάριο 5) με το μοντέλο ισόχρονων καμπυλών.

Να σημειωθεί οτι η αλληλεπίδραση ατμόσφαιρας-υδρόσφαιρας δε λήφθηκε υπόψη στις υδρομετεωρολογικές προσομοιώσεις του WRF-Hydro (offline επιλογή). Στην παρούσα εργασία δηλαδή το υδρομετεωρολογικό μοντέλο λειτούργησε ως ενα υδρολογικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τις εκτιμήσεις του WRF για τις διάφορες μεταβλητές όπως τη βροχή, τη θερμοκρασία που εκτιμήθηκαν ως δεδομένο εισόδου.

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Κουτσογιάννης, Δ., Μαμάσης, Ν., και Ευστρατιάδης Α., (2003). Υδρολογική μελέτη λεκάνης Σπερχειού, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

2. Κουτσογιάννης, Δ., και Ξανθόπουλος, Θ. (1999) Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

3. Κουτσόπουλος, Κ. (2005) Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και Ανάλυση Χώρου, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.

4. Κατσαφάδος, Π. (2015) Εισαγωγή στη Φυσική της Ατμόσφαιρας και την Κλιματική Αλλαγή, Εκδόσεις Κάλλιππος, Αθήνα.

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

6. Μαμάσης Ν., (2007) Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα: Διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα.

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

8. Μαμάσης, Ν. (2009) Εισαγωγή στα Υδρολογικά μοντέλα. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις μαθήματος Τεχνικής Υδρολογίας. Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Τομέας Υδατικών Πόρων, Αθήνα.

9. Καββαδά, Ο. (2012) Ανάπτυξη μοντέλου βροχής – απορροής σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών. Μεταπτυχιακή Εργασία στο πλαίσιο του προγράμματος ΔΠΜΣ ‘Περιβάλλον και Ανάπτυξη’ Εθνικό Μετσόβι ο Πολυτεχνείο. Αθήνα.

10. Πέντερης, Δ. (2017). Διερεύνηση της σχέσης της χωροχρονικής κατανομής της βροχόπτωσης με την επιφανειακή απορροή, σε χειμαρρική λεκάνη (ποταμός Κλαδέος) με την αξιοποίηση Συστημάτων Γεωγραφικής Πληροφορίας Μεταπτυχιακή Εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Τμήμα Γεωγραφίας Αθήνα.

11. Καρύμπαλης Ε., Κατσαφάδος Π. Καλογερόπουλος Κ., Καραλής Σ., Χαλκιάς Χ., (2014) 'Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου σε μικρές χειμαρρικές λεκάνες', στο Καρύμπαλης Ε, Παπαδόπουλος Α., Χαλκιάς Χ., (επιμ.) Η Γεωγραφία του Παράκτιου και Νησιωτικού Χώρου, Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα.

12. Καλογερόπουλος Κ. (2011). Αξιοποίηση του υδρολογικού μοντέλου SWAT στη διερεύνηση δημιουργίας λιμνοδεξαμενών, Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα.

13. Μιμίκου Μ.Α, Μπαλτάς Ε.Α, (2006). Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.

14. Νικολακόπουλος, Κ., Κατσάνου, Κ., Λαμπράκης, Ν., 2015. Υδρολογία με χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και δεδομένων τηλεπισκόπησης. [ebook] Athens:Hellenic Academic Libraries Link. Available Online at: http://hdl.handle.net/11419/2520

15. Μάρης, Φ. (2015: ανάρτηση στο διαδίκτυο) Προπτυχιακές Σημειώσεις Τεχνικής Υδρολογίας, Κεφάλαιο 5^{ο} Απορροή, Τμήμα Δασολογίας και & Διαχείρισης Υδάτινων Πόρων & Διαχείρισης Κινδύνου (επίσκεψη ιστοσελίδας 01/09/2017 https://docplayer.gr/12607032-Tehniki-ydrologia-kefalaio-5-o-aporroi-fotios-p-maris.html)

16. Ευσταθίου Γ., (2013). Μελέτη Παραμετροποιήσεων του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και της μικροφυσικής στην προσομοίωση ισχυρών βροχοπτώσεων. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα.

17. Παυλόπουλος Κ., (2011). Γεωμορφολογία: Εφαρμογές στις Γεωεπιστήμες. Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.

18. Ευστρατιάδης Α., (2008). ''Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων''Διδακτορική διατριβή, Τομέας Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα 2008

19. Καρλή, Α., (2013).Υδρογεωλογικές και υδροχημικές συνθήκες των υδροφόρων της λεκάνης του Σπερχειού ποταμού Μεταπτυχιακή Εργασία Τμήμα Γεωλογίας Πανεπιστήμιο Πάτρας.

20. Ψωμιάδης, Ε., (2010). Έρευνα γεωμορφολογικών και περιβαλλοντικών μεταβολών στην υδρολογική λεκάνη του Σπερχειού ποταμού με χρήση νέων τεχνολογιών. Διδακτορική Διατριβή Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών .

21. Λέκκας Ε., (2000), Φυσικές & Τεχνολογικές Καταστροφές, Έκδοσεις Access, Αθήνα.

22. Σαπουντζάκη, Κ. 2007. Το Αύριο Εν Κινδύνω – Φυσικές και Τεχνολογικές Καταστροφές στην Ευρώπη και την Ελλάδα, Εκδόσεις GUTENBERG, Αθήνα.

23. Μακρυγιάννη, Ν. (2017) Προσομοίωση της Μεταφοράς της Σαχάριας Σκόνης στην Ανατολική Μεσόγειο Θάλασσα και την Κύπρο. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Τμήμα Γεωγραφίας.

24. Χριστοφίδης Α. (2008) Ανάπτυξη Μοντέλου βροχής – απορροής σε σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

25. Ευστρατιάδης, Δ. Κουτσογιάννης, Ν. Μαμάσης, Π. Δημητριάδης, και Α. Μαχαίρας, Βιβλιογραφική επισκόπηση υδρολογίας πλημμυρών και συναφών εργαλείων, 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, 115 pages, Οκτώβριος 2012.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

1. Arnault, J., Wagner, S., Rummler, T., Fersch, B., Bliefernicht, J., Andresen, S., & Kunstmann, H. (2016). Role of runoff–infiltration partitioning and resolved overland flow on land–atmosphere feedbacks: A case study with the WRF-Hydro coupled modeling system for West Africa. *Journal of Hydrometeorology*, 17(5):1489-1516.

2. Chen, F., & Dudhia, J. (2001). Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129(4):569-585.

3. Diakakis, M., Mavroulis, S., & Deligiannakis, G. (2012). Floods in Greece, a statistical and spatial approach. *Natural hazards*,62(2): 485-500.

4. Gioti, E., Riga, C., Kalogeropoulos, K., Chalkias, C. (2013). Construction of a GIS-based flash flood runoff model using high resolution DEM and meteorological data, *Proceedings of 4th international workshop of the EARSeL SIG "Geological Applications" titled Remote Sensing and Geology12,1/2013.*

5. Givati, A., Gochis, D., Rummler, T., & Kunstmann, H. (2016). Comparing One-Way and Two-Way Coupled Hydrometeorological Forecasting Systems for Flood Forecasting in the Mediterranean Region.*Hydrology*,3(2), 19.

6. Gochis, D. J., & Chen, F. (2003). Hydrological enhancements to the community Noah land surface model. *NCAR Tech. Note NCAR/TN-454+ STR.*

7. Gochis, D. J., Yu, W., Yates, D. N., (2015). The WRF-Hydro model technical description and User's Guide, version 3.0. NCAR Technical Document, Boulder, Colorado, USA. (Available at: https://ral.ucar.edu/sites/default/files/public/images/projectWRF_Hydro_User_Guide_v3.0.pdf,30 last time accessed 10.8.2018).

8. IPCC, (2007). M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson (Eds.), Climate Change 2007. Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Cambridge University Press, UK.

9. IPCC, (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach,

M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

10. Katsafados, P., (2003) Factors and parameterizations that influence the medium-range forecast skill of the limited area models, PhD Thesis, National and Kapodistrian University of Athens.

11. Montgomery, D.R. and Foufoula-Georgiou, E., (1993). "Channel network source representation using digital elevation models", Water Resources Research,29(12):3925-3934.

12. Maidment, D.R., Oliveira, J.F., Calver, A., Eatherall A., Fraczek, W. (1996). A unit hydrograph derived from a spatially distributed velocity field. Hydrologic Processes 10: 831-844.

13. Maidment, D.R. (1993). Developing a spatially distributed unit hydrograph by using a GIS. In: Kovar, K. & Nachtnebel, H.P. (eds) Application of GISs in Hydrology and Water Resources Management, Proc. Int. Conf. HydroGIS' 93, Vienna, IAHS Publ. No. 211: 181-192.

14. Muzik, I. (1996). Flood modeling with GIS-derived distributed unit hydrographs. Hydrologic Processes 10: 1401-1409.

15. Melesse, A.M., Graham, W.D. (2004). Storm runoff prediction based on a spatially distributed travel time methods utilizing remote sensing and GIS. JAWRA Journal of the American Resources Association 40(4): 863-879.

16. Mlawer, E. J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J. & Clough, S.A. (1997): Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. J. Geophys. Res., 102 (D14), 16663–16682.

17. Nomikou V. M., Varlas, G., Theofanidi, S., Karymbalis, E., Papadopoulos, A. & P. Katsafados, 2017: A study on the dynamic interaction of the atmospheric and hydrologic

environment in the drainage basin of Sperchios River, Greece, Geophysical Research Abstracts, Vol. 19, EGU2017, 23-28 April 2017, Vienna, Austria.

18. Thompson, G., Rasmussen, R.M., and K. Manning (2004). Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. Monthly Weather Review, 132:519–542.

19. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Dudhia, M. G., Huang, X., Wang, W., Powers, Y. (2008).A description of the advanced research WRF Ver. 3.0. NCAR Technical Note, Boulder, Colorado, USA. (Online: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf , accessed 01.10.2018)

20. Varlas, G. (2017). Development of an integrated modeling system for simulating the air-ocean wave interactions. Harokopio University of Athens. PhD Dissertation.

21. Yucel, I., Onen, A., Yilmaz, K. K., & Gochis, D. J. (2015). Calibration and evaluation of a flood forecasting system: Utility of numerical weather prediction model, data assimilation and satellite-based rainfall. Journal of Hydrology,523, 49-66.

22. Milly, P., Wetherald, R., Dunne, K. (2002). Increasing risk of great floods in a changing climate. Nature 415, 514–517.

23. Llasat-Botija, M., Llasat, M.C., Lopez, L. Natural Hazards and the press in the western Mediterranean region. Advances in Geosciences, European Geosciences Union, 2007, 12, pp.81-85.

24. Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. WIREs Clim. Change, 2: 45-65.

25. Givati, A., Gochis D., Rummler T., Kunstmann, H. (2016). Comparing One-way and Two-way Coupled Hydrometeorological Forecasting Systems for Flood Forecasting in the Mediterranean Region.Hydrology (3)19: 1-21.

26. Cloke H.L., Pappenberger F. (2009). Ensemble Forecasting: a review. Journal of Hydrology 375,613-626.

27. Varlas, G., Anagnostou, M.N., Spyrou, C., Papadopoulos, A., Kalogiros, J., Mentzafou, A., Michaelides, S., Baltas, E., Karymbalis, E., Katsafados, P. (2019). A Multi-Platform Hydrometeorological Analysis of the Flash Flood Event of 15 November 2017 in Attica, Greece. Remote Sensing, 11, 45.

28. Verri, G., Pinardi, N., Gochis, D., Tribbia, J., Navarra, A., Coppini, G. & Vukicevic, T. (2017). A meteo-hydrological modelling system for the reconstruction of river runoff: the case of the Ofanto river catchment. Natural Hazards and Earth System Sciences, 17, 1741-1761.

29. Kunstmann, H., Fersch, B., Rummler, T., Wagner, S., Arnault, J., Senatore, A., Gochis, D. (2015). Fully coupled Atmosphere-Hydrology Model Systems: Recent Developements and Performance Evaluation for different Climate Regions.Geophysical Letters Abstracts.

30. Kunstmann, H., & Jung, G. (2007). Influence of soil-moisture and land use change on precipitation in the Volta Basin of West Africa, International Journal of River Basin Management, 5(1), 9–16.

31. Senatore, A., Mendicino, G., Gochis, D. J., Yu W., Yates, D. & Kunstmann, H. (2015). Fully coupled atmosphere-hydrology simulations for the central Mediterranean : Impact of enhanced hydrological parameterization for short and long time scales. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 7, 1693-1715.

32. Dao, H., Peduzzi, P., Global Evaluation of Human Risk and Vulnerability to Natural Hazards, Enviro-info 2004, Edition du Tricorne, Geneve, Vol I, 435-446 (http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8094/article_globalrisk.pdf?sequence=3).

33. Hewlett, J.D., Fortson J.C., Cunningham, G.B. (1977). The effect of rainfall intensity on storm flow and peak discharge from forest land.Water Resources Research 13(2): 259–266.

34. Kalogeropoulos, K., Karalis, S., Karymbalis, E., Chalkias, C., Chalkias, G., Katsafados, P., (2013). Modelling flash floods in Vouraikos River mouth Greece, 11th MEDCOAST Proceedings Conference, Marmaris. Turkey, 01/2013.

35. Hapuarachichi, H.A.P., Wang, Q.J. and Pagano, T.C. (2011). A review of advances in flash flood forecasting. Hydrological Processes, 25: 2771-2784.

36. Nielsen-Gammon, J. W., Zhang, F., Odins, A. M., & Myoung, B. (2005). Extreme rainfall in Texas: Patterns and predictability.*Physical Geography*,*26*(5), 340-364.

37. Fiori, E., Comellas, A., Molini, L., Rebora, N., Siccardi, F., Gochis, D. J. & Parodi, A. (2014). Analysis and hindcast simulations of an extreme rainfall event in the Mediterranean area: The Genoa 2011 case.*Atmospheric research*,*138*, 13-29.

38. Politi, N. (2016). Comparison and Validation of WRF Model Physics Parameterizations Over the Domain of Greece. Perspectives on Atmospheric Sciences, 55-61.

39. Wehbe, Y., Marouane, T., Weston, M., Chaouch, N., Branch, O., Schwitalla, T., Wulfmeyer, V., Al Mandous, A. (2019). Analysis of an Extreme Weather Event in a Hyper Arid Region Using WRF-Hydro Coupling, Station, and Satellite data. Natural Hazards and Earth System Sciences19, 1129-1149.

40. Betts, A. (2004). Understanding Hydrometeorology Using Global Models. Bulletin of American Meteorological Society 85. 1673-. 10.1175/BAMS-85-11-1673.

41. Jasper, K., Gurtz, J., & Lang, H. (2002). Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model.*Journal of Hydrology*,*267*(1): 40-52.

42. Givati, A., Lynn, B., Liu, Y., Rimmer, A. (2012).Using the WRF Model in an Operational Streamflow Forecast System for the Jordan River. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 51, 285-299.

43. Chow V.T, Maidment, D.R, Mays, L.W. (1988) Applied Hydrology, McGraw- Hill International Editions, Civil Engineering series, New York.

44. Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography.*Geological Society of America Bulletin*,*63*(11): 1117-1142.

45. Sene K., (2013). Flash floods: Forecasting and Warning, Springer, Heidelberg.

46. Ambroise, B. (1999). Génèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré: Modélisation systémique et dynamique. Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 12(1): 125-153.

47. Sherman, L.K. (1932) Stream Flow from Rainfall by the Unit Graph Method. Engineering News-Record, Vol. 108, pp. 501-505.

48. Singh, V. P. (1997). Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on streamflow hydrograph, Hydrological Processes, vol.11, pp 1649-1669.

49. Chalkias C., Stathopoulos N., Kalogeropoulos K., Karympalis E. (2016), "Applied Hydrological Modeling with the Use of Geoinformatics: Theory and Practice", INTECH.

50. Li, J. & Wong, D. (2010). Effect of DEM sources on hydrologic applications. Computers Environment and Urban Systems, 34(3):251-261.

51. Mahrt L., & Ek, M. (1984). The influence of atmospheric stability on potential evaporation, Journal of Climate and Applied Meteorology, vol.23, pp. 222–234.

52. Ek, M. B., Mitchell, K. E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., & Tarpley, J. D. (2003). Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model .*Journal of Geophysical Research: Atmospheres,108*(D22).

53. Lehner, B., Verdin, K., Jarvis, A. (2008). New global hydrography derived from spaceborne elevation data.Eos, Transactions, 89(10): 93-94.

54. Lynch P. (2008). The origins of computer weather prediction and climate modeling, Journal of Computational Physics, 227: 3431–3444.

55. Du, J., Xie, H., Hu, Y., Xu, Y., Xu, C.Y. (2009). Development and testing of a new storm runoff routing approach based on time variant spatially distributed travel time method, Journal of Hydrology, 369 (1-2): 44–54.

56. Horritt, M.S., & Bates, P.D. (2001). Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow', Journal of Hydrology, vol. 253, no. 1-4, pp. 239-249.

57. Diakakis M. (2011). A method for flood hazard mapping based on basin morphometry: application in two catchments in Greece, Nat Hazards 56: 803-814.

58. Powers, J. G., and Coauthors (2017). The Weather Research and Forecasting Model: Overview, system efforts, and future directions. Bulletin of the American Meteorological Society, 98, 1717-1737, doi:10.1175/BAMS-D-15-00308.1.

59. Julien, P.Y., Saghafian, B & Ogden, F.L. (1995). Raster-based hydrological modeling of spatially-varied surface runoff. Water Resour. Bull., AWRA, 31(3), 523-536.

61. McCuen, R. H. (1989). Hydrologic Analysis and Design. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ.

62. Saghafian B., Julien P.Y, Rajaie H., (2002), Runoff hydrograph simulation based on time variable isochrones technique, *Journal of Hydrology* 261 pp. 193-203.

63. Tarboton, D. G., Bras, R. L. & Rodriguez-Iturbe, I. (1991). On the extraction of channel networks from digital elevation data.Hydrological Processes, 5, 81-100.

64. Koutsoyiannis D., Mamassis N, Efstratiadis A., and Christofides A., (2008), On the credibility of climate predictions, Hydrological Sciences Journal, 53 (4), 671–684.

65. Maxwell, R. M., Lundquist, J. K., Mirocha, J. D., Smith, S. G., Woodward, C. S., & Tompson, A. F. (2011). Development of a coupled groundwater-atmosphere model.*Monthly Weather Review*,*139*(1), 96-116.

66. Mahrt, L., and H. ‐ L. Pan, A two ‐ layer model of soil hydrology, Boundary Layer Meteorol., 29, 1 ‐ 20, 1984.

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

68. De Roo, A.: LISFLOOD: a rainfall-runoff model for large river basins to assess the influence of land use changes on flood risk, in: Ribamod: river basin modelling, management and flood mit igation, edited by: Balabanis, P., Concerted action, European Commission, EUR 18287 EN, 349–357, 1999

Ιστοσελίδες

1. USGeological Survey: ‘Natural Water Cicle’ https://www.usgs.gov/media/images/water-cycle-natural-water-cycle.

2. Επίσημη ιστοσελίδα της ESRI: ‘Digital Elevation Models’ https://learn.arcgis.com/en/related-concepts/digital-elevation-models.htm, επίσκεψη ιστοσελίδας 01/09/2017.

3. Arc Map Overview of Spatial Analyst Toolbox Surface Tools Slope http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/slope.htm, επίσκεψη ιστοσελίδας την 01/09/2017 και 12/12/2019.

4. Arc GIS Desktop Arc Map Toolbox Raster Functions Hill shade http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/hillshade-function.htm επίσκεψη ιστοσελίδας 11/12/2019.

5https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-direction-works.htm.

6. The University of Texas at Austin NOAH MP Users site http://www.jsg.utexas.edu/noah-mp επίσκεψη ιστοσελίδας 01/12/2019.

7. Copernicus Land Monitoring Service Paneuropean Corine Land Cover Map for the year 2018 https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018.

8. Ιστοσελίδα Φωνογράφος ‘Αρθρο Τα γεφύρια με τα προβλήματα στη Δυτική Φθιώτιδα λόγω τωνβροχοτώσεων’
’https://fonografos.net/v1/%CE%B2%CF%81%CE%BF%CF%87%CE%BF%CF%80%CF%84%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82/ επίσκεψη ιστοσελίδας 11/12/2019.

9. Επίσημη ιστοσελίδα Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών ‘Σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης Ήπειρος και Ευρυτανία’, naftemporiki.gr: ‘Εκκενώνονται προληπτικά τα χωριά που βρίσκονται στις εκβολές του Άραχθου’ , ifemerida.gr ‘Σε κατάσταση συναγερμού η χώρα λόγω της κακοκαιρίας ’https://meteo.gr/pdf/weatherCases/2015/2015_01_30.pdf, επίσκεψη ιστοσελίδας 01/12/2019.