ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Σχολή : Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας και Εφαρμοσμένων Οικονομικών

Τμήμα : Γεωγραφίας

Θέμα:

Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου στο ρέμα Γιαννούλας (Θριάσιο Πεδίο)



Πτυχιακή εργασία:

Καραντζιά Μαριάνθη

Αθήνα, 2017

ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Σχολή : Περιβάλλοντος, Γεωγραφίας και Εφαρμοσμένων Οικονομικών

Τμήμα : Γεωγραφίας

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Καρύμπαλης Ευθύμιος

Αναπληρωτής καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Κατσαφάδος Πέτρος

Επίκουρος καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Παρχαρίδης Ισαάκ

Αναπληρωτής καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Η Μαριάνθη Καραντζιά δηλώνω υπεύθυνα ότι:

1) 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.

2) 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.

Στους γονείς μου

&

στα αδέρφια μου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:

Περίληψη.....9

Abstract.....11

Εισαγωγή.....12

Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....16

Κεφάλαιο 1: Πλημμυρικά φαινόμενα.....20

1.1 Πλημμύρες.....20

1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ποτάμια πλημμύρα.....23

1.3 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά λεκανών-παράμετροι.....30

1.4 Χείμαρροι και κλίση στην Ελλάδα.....34

1.5 Το καθεστώς πλημμυρών στην Ελλάδα.....35

Κεφάλαιο 2: Πλημμυρικός κίνδυνος.....39

2.1 Κίνδυνος, τρωτότητα, έκθεση και αποσπάσματα οδηγίας 2007/60/ΕΚ.....39

2.2 Η κοινοτική οδηγία 2007/60/ΕΚ.....41

2.3 Πρόοδος εφαρμογής της οδηγίας στην Ελλάδα.....46

Κεφάλαιο 3: Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών και Υδρολογική Ανάλυση.....48

3.1 Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.....48

3.2 Υδρολογική ανάλυση (Συσσόρευση, Βλάστηση, Απορροή, Ταχύτητα ροής κλπ.).....50

3.3 Υδρολογική ανάλυση της Ελληνικής Τεχνικής Νομοθεσίας και Προδιαγραφών...52

Κεφάλαιο 4: Υδρολογία: Υδατορρεύματα και πλημμύρες.....55

4.1 Μέτρηση των Βροχοπτώσεων.....55

4.2 Σχέση βροχής-απορροής.....56

4.3 Υδρογράφημα-απορροή.....57

4.4 Κίνηση πλημμυρικού κύματος.....61

4.5 Διόδευση πλημμύρας.....62

4.6 Ανάλυση πλημμυρικών συχνοτήτων.....63

Κεφάλαιο 5: Υδρολογικά Μοντέλα.....65

5.1 Ορθολογική μέθοδος εκτίμησης πλημμυρικών αιχμών.....65

5.2 Μοναδιαίο Υδρογράφημα.....67

5.3 Μέθοδος χρόνου-επιφανείας.....69

Κεφάλαιο 6: Μελέτη Περίπτωσης.....70

6.1 Η περιοχή του Θριάσιου Πεδίου.....70
6.2 Το κλίμα της περιοχής.....71
6.3 Το υδρογραφικό δίκτυο του ρέματος Γιαννούλας.....72
6.4 Γεωλογική δομή λεκάνης απορροής του ρέματος Γιαννούλας.....76
6.5 Οι πλημμύρες στο Θριάσιο Πεδίο και η ευθύνη του ρέματος Γιαννούλας.....80
6.6 Αντιπλημμυρικά έργα πεδινής κοίτης.....82
Κεφάλαιο 7: Δεδομένα: Ποσοτική ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου.....85
7.1 Ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου κατά Horton.....87
7.2 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων της εφαρμογής των Νόμων του Horton στην υδρολογική λεκάνη του ρέματος Γιαννούλας.....93
7.3 Διαδοχική κατά τάξη απορροή.....96
7.4 Επιμήκης τομή της κεντρικής κοίτης του υδρογραφικού δικτύου του ρέματος Γιαννούλας.....101
Κεφάλαιο 8: Ανάπτυξη του υδρολογικού μοντέλου.....104
8.1 Γενικά.....104
8.2 Δεδομένα.....105
8.3 Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (ΨΜΕ-DEM).....106
8.4 Συντελεστής Τραχύτητας κατά Manning.....108
8.5 Βροχομετρικά Δεδομένα.....110
8.6 Προσομοίωση απορροής με χρήση ΣΓΠ.....111
Κεφάλαιο 9: Αποτελέσματα εφαρμογής υδρολογικού μοντέλου.....119
9.1 Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους χωρίς ταπεινώσεις.....120
9.2 Χάρτες Κλίσεων (Slope).....121
9.3 Χάρτης Διεύθυνσης ροής (Flow Direction).....121
9.4 Χάρτης Συσσόρευσης ροής (Flow Accumulation).....123
9.5 Χάρτης της κατά μήκους ροής (Flow Length).....124
9.6 Χάρτης παροχής.....125
9.7 Χάρτης παροχής στρωματοροής.....126
9.8 Χάρτης ταχύτητας ροής.....127
9.9 Χάρτης ταχύτητας στρωματοροής.....128
9.10 Χάρτης χρόνου απορροής της περιοχής.....129
9.11 Χάρτης ισόχρονων καμπυλών.....130
9.12 Απόκριση λεκάνης απορροής.....132
Κεφάλαιο 10: Κριτική αποτίμηση-Συμπεράσματα.....135

Βιβλιογραφία.....139
Παράρτημα 1: Εδαφοτομείς στη λεκάνη του ρέματος Γιαννούλας από το Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών (2007).....148
Παράρτημα 2: Φωτογραφικό υλικό.....151
Παράρτημα 3: Άρθρα από εφημερίδες για την πλημμύρα που συνέβει 2-11-1977.....159

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ:

Εικόνα 1: Επίπεδα πληροφορίας ΣΓΠ (πηγή : http://www.srh.noaa.gov/bmx?n=gis)..49
Εικόνα 2: Τμήμα Προδιαγραφής Μελέτης Κατάρτισης Χάρτη Πλημμυρικού κινδύνου.....53
Εικόνα 3: Διαδικασία διεύθυνσης ροής.....115
Εικόνα 4: Διαδικασία συσσώρευσης ροής.....116

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ:

Πίνακας 1: Ταξινόμηση διαφορετικών τύπων πλημμυρών (Martini and Loat 2007, Smith and Ward 1998) σε σχέση με τα πιο συνήθη αίτια και επιπτώσεις.....23
Πίνακας 2: Παράγοντες που επηρεάζουν την εκδήλωση πλημμυρών και γενικότερα τις υδρολογικές διεργασίες (Wilson 1990, Smith and Ward 1998, Ward and Robinson 2000, Παπαμιχαήλ 2004, Φουμέλης 2004, Μιμίκου και Μπαλτάς 2006).....25
Πίνακας 3: Οι μέσες ετήσιες τιμές των μετεωρολογικών μεταβλητών από τους σταθμούς Ελευσίνας, Μεγάρων και Αστεροσκοπείου Αθηνών.....72
Πίνακας 4: Ιστορικό έντονων πλημμυρικών γεγονότων στο Θριάσιο Πεδίο (Πηγή: Ζυγουρά, 2011).....81
Πίνακας 5: Συνολικό μήκος και εμβαδό των κλάδων κάθε τάξης του υδρογραφικού δικτύου του ρ. Γιαννούλας (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....87
Πίνακας 6: Οι ποσοτικές παράμετροι που μετρήθηκαν ή εκτιμήθηκαν για το υδρογραφικό δίκτυο του ρ. Γιαννούλας.....87
Πίνακας 7: Σχέση μεταξύ των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου του ρ. Γιαννούλας σύμφωνα με τον 1ο νόμο του Horton (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....89
Πίνακας 8: Αποτελέσματα εφαρμογής του 2ου νόμου του Horton στη λεκάνη απορροής του ρ. Γιαννούλας (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....90
Πίνακας 9: Αποτελέσματα εφαρμογής του 3ου νόμου του Horton στη λεκάνη απορροής του ρ. Γιαννούλας (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....92

Πίνακας 10: Ανωμαλίες στη διαδοχική κατά τάξη απορροή του υδρογραφικού δικτύου του ρέματος Γιαννούλας. Στον πίνακα περιλαμβάνονται το πλήθος των κλάδων κάθε τάξης που απορρέουν άμεσα σε κλάδους μεγαλύτερης τάξης, το μήκος των κοιτών τους (σε km) και το εμβαδό των λεκανών απορροής τους (σε km2) καθώς και τα αντίστοιχα ποσοστά (%) στο σύνολο της κάθε τάξης (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....97
Πίνακας 11: Πίνακας συντελεστών τραχύτητας κατά Manning (Καρύμπαλης κ.α 2014).....109
Πίνακας 12: Πλημμύρες που έπληξαν την ευρύτερη περιοχή του Θριάσιου πεδίου τα τελευταία 50 χρόνια. Τα δεδομένα βροχόπτωσης είναι από τον μετεωρολογικό σταθμό της ΕΜΥ στην Ελευσίνα.....111
Πίνακας 13: Κωδικοί διεύθυνσης ροής.....121
Πίνακας 14: Στατιστικά στοιχεία ισόχρονων καμπυλών.....131

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ-ΔΙΑΓΡΑΜΑΤΩΝ:

Σχήμα 1: Παγκόσμια κατανομή τύπου φυσικών καταστροφών κατά την περίοδο 1963-2003 (Πηγή: EM-DAT).....20
Σχήμα 2: Αποτέλεσμα της αστικοποίησης στον όγκο και το ποσό της απορροής.....28
Σχήμα 3 : Ταξινόμηση υδραφικού δικτύου (Πηγή: http://webhelp.esri.com /arcgis desktop/9.3/printBooks_topics.cfm?pid=6050).....31
Σχήμα 4: Ένταξη του Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνων στην ολοκληρωμένη διαχείριση Πλημμυρικών Γεγονότων. (Πηγή: WL Delft Hydraulics, Φεβρουάριος 2007).....43
Σχήμα 5: Σχηματική αναπαράσταση υδρολογικής ανάλυσης (α. ΨΜΕ, β. κατεύθυνση ροής, γ. επίπεδο κατεύθυνσης ροής, δ. σχηματική κατεύθυνση ροής, ε. επίπεδο συσσώρευσης ροής, ζ. κλάδοι υδρογραφικού δικτύου).....55
Σχήμα 6: Διαδικασία βροχής-απορροής.....56
Σχήμα 7: Υδρογράφημα (Πηγή: Viessman and Lewis, 1996).....59
Σχήμα 8: Επίδραση κλιματικών παραμέτρων στο σχήμα του υδρογραφήματος (Πηγή: Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012).....60
Σχήμα 9: Υδρογραφήματα λεκάνης ιδίου μεγέθους και διαφορετικού σχήματος (Πηγή: Μιμίκου και Μπάλτας, 2012).....61
Σχήμα 10: Τυπικό γράφημα παροχής αιχμής σε συνάρτηση με το χρόνο.....67
Σχήμα 11: Μοναδιαία υδρογραφήματα απλά και σύνθετα (Πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....69
Σχήμα 12: Κάλυψης γης της περιοχής μελέτης.....75

Σχήμα 13: Γραφική παράσταση αποκλίσεων πραγματικού και ιδανικού αριθμού κλάδων. (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....89
Σχήμα 14: Γραφική παράσταση αποκλίσεων πραγματικού και ιδανικού μέσου μήκους κλάδων (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....91
Σχήμα 15: Γραφική παράσταση αποκλίσεων πραγματικού και ιδανικού μέσου εμβαδού κλάδων (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....92
Σχήμα 16: Γραφική απεικόνιση των ανωμαλιών στη διαδοχική κατά τάξη απορροή του υδρογραφικού δικτύου του ρέματος Γιαννούλας (Πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....97
Σχήμα 17: Επίμηκες προφίλ (τομή) της κεντρικής κοίτης του ρέματος Γιαννούλας. Η κοίτη έχει διαιρεθεί σε πέντε επιμέρους τμήματα διαφορετικής μορφολογικής κλίσης. Με τα βέλη μπλε χρώματος σημειώνονται τα σημεία κάμψης που αντιστοιχούν σε απότομες αλλαγές της κλίσης κατά μήκος της κοίτης.(πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....102
Σχήμα 18: Εννοιολογικό διάγραμμα μοντέλου της προτεινόμενης μεθοδολογίας (Πηγή: Καλογερόπουλους κ.α 2014).....113
Σχήμα 19: Σχηματική απεικόνιση υδρολογικής ανάλυσης (α. ΨΜΕ, β. κατεύθυνση ροής, γ. επίπεδο κατεύθυνσης ροής, δ. σχηματική κατεύθυνση ροής, ε. επίπεδο συσσώρευσης ροής, ζ. κλάδοι υδρογραφικού δικτύου) πηγή: ArcGIS Manual.....114
Σχήμα 20: Διαδικασία υπολογισμού Πλημμυρογραφήματος.....132
Σχήμα 21: Συνθετικό Μοναδιαίο άμεσο Υδρογράφημα.....133

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΧΑΡΤΩΝ

Χάρτης 1: Μέση υπερετήσια βροχόπτωση (mm) για την περίοδο 1960 –1990 ανά υδατικό διαμέρισμα, (Πηγή: http://ndbhmi.chi.civil.ntua.gr ΕΤΥΜΠ).....37
Χάρτης 2: Χωρική κατανομή της βροχόπτωσης, της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας για τον ελλαδικό χώρο (Katsafados κ.ά. 2012).....37
Χάρτης 3: Αριθμός πλημμυρικών γεγονότων (Πηγή: Ειδική Γραμματεία Υδάτων,2012).....38
Χάρτης 4: Υδατικό διαμέρισμα 06 ΑΤΤΙΚΗ.....71
Χάρτης 5: Πρόγραμμα Corine, φύλλο χάρτη Αθήνα-Έλευσις.....74
Χάρτης 6: Γεωλογικός χάρτης ρέματος Γιαννούλας (φύλλο χάρτη Αθήνα-Έλευσις) (πηγή: Καρύμπαλης, 2015).....77
Χάρτης 7: Χάρτης αρίθμησης του υδρογραφικού δικτύου του ρέματος Γιαννούλας (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....86

Χάρτης 8: Χάρτης στον οποίο απεικονίζονται οι κλάδοι 1ης τάξης και οι αντίστοιχες λεκάνες απορροής τους που συμβάλλουν με κλάδους 2ης χωρίς όμως να τους δημιουργούν (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....94
Χάρτης 9: Χάρτης στον οποίο απεικονίζονται οι κλάδοι 2ης τάξης και οι αντίστοιχες λεκάνες απορροής τους που συμβάλλουν με κλάδους 3ης χωρίς όμως να τους δημιουργούν (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....94
Χάρτης 10: Χάρτης στον οποίο απεικονίζονται οι κλάδοι 3ης τάξης και οι αντίστοιχες λεκάνες απορροής τους που συμβάλλουν με κλάδους 4ης χωρίς όμως να τους δημιουργούν (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....95
Χάρτης 11: Χάρτης στον οποίο απεικονίζονται οι κλάδοι 1ης τάξης και οι αντίστοιχες λεκάνες απορροής τους που απορρέουν άμεσα σε κλάδους τάξεων μεγαλύτερων της 2ης (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....98
Χάρτης 12 : Χάρτης στον οποίο απεικονίζονται οι κλάδοι 2ης τάξης και οι αντίστοιχες λεκάνες απορροής τους που απορρέουν άμεσα σε κλάδους τάξεων μεγαλύτερων της 3ης (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....99
Χάρτης 13: Χάρτης στον οποίο απεικονίζονται οι κλάδοι 3ης τάξης και οι αντίστοιχες λεκάνες απορροής τους που απορρέουν άμεσα σε κλάδους τάξεων μεγαλύτερων της 4ης (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).....100
Χάρτης 14: Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους.....107
Χάρτης 15: Τραχύτητα κατά Manning (Vector).....109
Χάρτης 16: Τραχύτητα κατά Manning (Raster).....110
Χάρτης 17: Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους χωρίς ταπεινώσεις.....120
Χάρτες 18: Κλίσεων (Slope).....121
Χάρτης 19: Διεύθυνσης ροής (Flow Direction).....122
Χάρτης 20: Συσσόρευσης ροής (Flow Accumulation).....123
Χάρτης 21: Κατά μήκους ροής (Flow Length).....124
Χάρτης 22: Παροχής.....125
Χάρτης 23: Παροχής στρωματοροής.....126
Χάρτης 24: Ταχύτητας ροής.....127
Χάρτης 25: Ταχύτητας στρωματοροής.....128
Χάρτης 26: Χρόνου απορροής της περιοχής.....129
Χάρτης 27: Ισόχρονων καμπυλών.....130

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το νερό, ως γνωστών, είναι ένας πόρος κρίσιμος για τον άνθρωπο, για τη ζωή του και τις δραστηριότητες του. Για το λόγο αυτό, η αξιοποίηση του είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την πρόοδο και την εξέλιξή του και απαιτείται ένα σύνολο δράσεων προκειμένου το φυσικό αυτό πόρο, να μπορέσει να τον διαχειριστεί με τρόπο βιώσιμο. Όμως το νερό μπορεί να αποτελέσει και έναν εν δυνάμει κίνδυνο για τον άνθρωπο, με τη μορφή των πλημμύρων.

Η παρούσα εργασία, εξετάζει την απόκριση ενός ποταμού στη βροχόπτωση, καθώς και στη φύση και δυναμική της πλημμύρας. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εκτιμηθεί ο πλημμυρικός κίνδυνος στην λεκάνη απορροής του ρέμματος Γιαννούλας που βρίσκεται στο νομό Αττικής με την εκτίμηση των ποσοτικών παραμέτρων του υδρογραφικού δικτύου και των αντίστοιχων λεκανών απορροής, καθώς και να γίνει προσομοίωση της επιφανειακής απορροής με την υδρολογική ανάλυση της λεκάνης απορροής. Εκτός από τα έντονα μετεωρολογικά φαινόμενα και τη γεωμορφολογία της λεκάνης απορροής, σημαντικό ρόλο στην εκδήλωση πλημμυρών διαδραματίζει η συνεχής αστικοποίηση στα περίχωρα της πόλης του Ασπροπύργου και οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στις κοίτες του υδρογραφικού δικτύου του ποταμού. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δημιουργήθηκε μια ψηφιακή βάση δεδομένων που αφορά το υδρογραφικό δίκτυο και τη λεκάνη απορροής με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS. Επιπρόσθετα συλλέχθηκαν στοιχεία (μετεωρολογικά, γεωμορφολογικά, χρήσεις γης κλπ.) τα οποία είναι ικανά να ερμηνεύσουν τόσο τα φυσικά, όσο και τα ανθρωπογενή αίτια, τα οποία οδηγούν σε πλημμυρικά γεγονότα στην συγκεκριμένη περιοχή.

Το υδρογραφικό δίκτυο αναλύθηκε σύμφωνα με τους νόμους του αριθμού των κλάδων, του μήκους και του εμβαδού των λεκανών (Νόμοι του Horton) . Σημαντικό ρόλο για τη μελέτη και ανάλυση όλων εκείνων των συνθηκών που προσδίδουν αυξημένη επικινδυνότητα και καθιστούν την ευρύτερη περιοχή επιρρεπή στον πλημμυρικό κίνδυνο, έχουν οι ανωμαλίες στη διαδοχική κατά τάξη απορροή και ο υψηλός λόγος διακλάδωσης.

Έπειτα, στα πλαίσια της υδρολογικής ανάλυσης αξιοποιήθηκε ένα χωρικά κατανεμημένο εννοιολογικό μοντέλο βροχής-απορροής, το οποίο αναπτύχθηκε από τον Maidment (1993) και υλοποιήθηκε σε περιβάλλον ArcGIS 9.3, με τη χρήση ψηφιδωτών δεδομένων (raster grid). Ουσιαστικά, το προτεινόμενο μοντέλο βροχής-

απορροής μελετά την διαδρομή του νερού επί της επιφάνειας του εδάφους, εφαρμόζοντας δεδομένους νόμους της υδρολογίας και της υδραυλικής (εξισώσεις παροχής, ταχύτητες ροής κλπ.). Τελικό στάδιο του μοντέλου, αποτελεί η σχεδίαση-κατασκευή ενός άμεσου συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος για μια ακραία βροχόπτωση, εκτιμώντας έτσι την απόκριση της ροής του ρέματος στην έξοδο της λεκάνης σε πραγματικές συνθήκες.

Αξιοποιώντας τα κατάλληλα μέσα και εφαρμόζοντας ορθές πολιτικές διαχείρισης η εργασία επιδιώκει να αποτελέσει έναυσμα για τη διατύπωση προτάσεων που ενδέχεται να οδηγήσουν στον μετριασμό του πλημμυρικού κινδύνου και στον περιορισμό των κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων που επιφέρει μια πλημμύρα συμβάλλοντας στην βιώσιμη και αειφόρο ανάπτυξη της ευρύτερης περιοχής. Η ανωτέρω προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε λεκάνη απορροής, αλλά δεν πάβει να αποτελεί μια δύσκολη και απαιτητική διαδικασία λόγω της πολυπλοκότητας των παραμέτρων και της έλλειψης έγκαιρων δεδομένων.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Πλημμύρες, Πλημμυρικός κίνδυνος, Υδρολογία, Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Ελλάδα

ABSTRACT

Water of sufficient quality and quantity is critical to all life and economic activity. For this reason a set of measures is required in order to protect this natural resource and manage it in a sustainable way. However, water can be a potential hazard for humans in the form of floods.

This study simulates individual hydrological events and describes the nature and the strength of a flood. The aim of this study is flood risk assessment of Giannoulas torrent, a stream which drains an area of Attiki. Estimation of quantitative parameters of the drainage network and its corresponding basins was attempted. Apart from the intense weather conditions and the geomorphology of the river basin, it is attempted an investigation of natural and human factors which are responsible for flood events. For this purpose, data of the drainage and the basins imported to the geographic spatial database, using Geographic Information Systems (GIS) techniques. In order to draw, the drainage network was analyzed according to Horton's laws. Thus, an important cause of floods is the irregularities of the hierarchical drainage by stream order and the high bifurcation ratio between the order streams of the network. The afore mentioned methodology along with the area's geological background, land use, etc. help the assessment and definition of conditions that increase the flood risk of the area.

The main object of this work is the hydrological analysis, which is directly related to catastrophic flood events. For this purpose, we utilize a spatially distributed rainfall-runoff model, which was developed by Maidment (1993), in ArcGIS 9.3 environment, using mosaic data (raster grid). Essentially, the proposed rainfall-runoff model estimates the movement of water over the soil surface, using known laws of hydrology and hydraulics (discharge, flow velocity equations). The final stage of the model, is the design and construction of a direct unit hydrograph for an excess rainfall, by estimating the stream flow response at the outlet of the stream.

Thereby, using the appropriate means and applying correct management policies, this study could help the mitigation of flood risk and the reduction of social and economic impacts caused by Giannoulas torrent floods, contributing to sustainable development of the broader area. A combination of the approaches presented above can be applied in any river basin.

KEYWORDS : Floods, Flood hazard, GIS, Greece

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό είναι ένας ανανεώσιμος φυσικός πόρος, απαραίτητος για την επιβίωση του ανθρώπου και του πλανήτη, είναι άνισα κατανεμημένος στον πλανήτη, όπως και ο πληθυσμός. Το νερό έχει ουσιαστική σημασία για τη ζωή, διότι αποτελεί τόσο βασικό συστατικό όλων των οργανισμών, και χρήσιμο διαλυτικό, όσο και μεταφορικό μέσο και σπουδαίος φορέας ενέργειας. Το νερό καταλαμβάνει το 17% της επιφάνειας της γης, τα αποθέματα όμως σε γλυκό (πόσιμο) νερό ανέρχονται μόλις στο 2,6% των συνολικών αποθεμάτων της γης (Κουργιαλάς, 2010). Επίσης οι εναλλαγές τήξης και πήξης του νερού που προκαλούνται από τις θερμικές μεταβολές λόγω των καιρικών αλλαγών και οι καλές διαλυτικές ικανότητες του, συμβάλουν ιδιαίτερα στη φυσική και χημική αποσάθρωση του στερεού φλοιού της Γης και στη δημιουργία εδαφών. Η ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων προκύπτει ως αναγκαιότητα για την εξασφάλιση της βιώσιμης ανάπτυξης.

Από την άλλη, πλήθος κινδύνων και επικείμενων καταστροφών απειλούν καθημερινά τόσο τον άνθρωπο, όσο και το φυσικό περιβάλλον και είναι γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια, οι καταστροφές από φυσικούς κινδύνους έχουν αυξηθεί. Ένας φυσικός κίνδυνος προκαλείται από το νερό. Τα προβλήματα σε σχέση με την διαχείριση του νερού αφορούν την ξηρασία, τη λειψυδρία και τις πλημμύρες. Πλημμύρα είναι η κατάσταση κατά την οποία περιοχές που συνήθως δεν χαρακτηρίζονται από την παρουσία ύδατος, καλύπτονται από κάποια ποσότητα νερού για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (σύμφωνα με τον ορισμό που δίνεται από την Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, κεφάλαιο Ι, άρθρο 2). Στις παράκτιες περιοχές πλημμυρικά φαινόμενα μπορεί να προκληθούν και από την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, ενώ μπορεί να οφείλονται και σε ανθρωπογενή αίτια όπως από την καταστροφή κάποιου φράγματος και την απότομη αποδέσμευση μεγάλης ποσότητας νερού του τεχνητού ταμιευτήρα. Οι ποτάμιες πλημμύρες συγκαταλέγονται στις φυσικές καταστροφές αφού συνήθως είναι το αποτέλεσμα μιας ακραίας μετεωρολογικής κατάστασης και εκδηλώνεται όταν η παροχευτική ικανότητα του εκάστοτε συστήματος αποστράγγισης (των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου) δεν είναι δυνατόν να διοχετεύσει τον όγκο του νερού που παράγεται από την βροχόπτωση. Η πλημμύρα είναι μια φυσική καταστροφή, η οποία είναι αποτέλεσμα ενός συνδιασμού δράσεων: μιας μεγάλης ποσότητας βροχόπτωσης και του τρόπου αλληλεπίδρασης του νερού με την περατότητα των γεωλογικών

σχηματισμών ή των υλικών που καλύπτουν μια λεκάνη καθώς και με την τοπογραφία της περιοχής. Πλημμύρα λαμβάνει χώρα όταν η στάθμη της επιφάνειας του νερού είναι υψηλότερη από το κανονικό με αποτέλεσμα να υπερχειλίζει και να προκαλεί καταστροφές σε ότι περιβάλλει την κοίτη του ποταμού. Τα φυσικά φαινόμενα που προκαλούν την πλημμύρα δεν μπορούν να ελεγχθούν, ωστόσο η τρωτότητα που χαρακτηρίζει μια λεκάνη απορροής, μπορεί να τροποποιηθεί (να αυξηθεί ή να περιοριστεί) μετά από ανθρώπινη παρέμβαση.

Οι ποτάμιες πλημμύρες αποτελούν ένα συνήθη φυσικό κίνδυνο με αρνητικές κοινωνικο-οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις τόσο σε τοπική, όσο και σε περιφερειακή κλίμακα. Ο πλημμυρικός κίνδυνος σχετίζεται τόσο με την πιθανότητα εκδήλωσης πλημμύρας, όσο και με τις δυνητικές συνέπειες της για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες (Οδηγία 2007/60/ΕΚ, κεφάλαιο Ι, άρθρο 2). Ακραίες πλημμυρικές παροχές, οι οποίες συνήθως προκαλούνται από έντονες καταιγίδες, τήξη χιονιού, τυφώνες, σεισμογενή θαλάσσια κύματα, ανύψωση στάθμης θάλασσας, μπορεί να προκαλέσουν απώλειες ανθρώπινων ζωών και σημαντικές ζημιές σε κτίρια, υποδομές και καλλιέργειες καθώς και την υποβάθμιση περιβαλλοντικά σημαντικών εκτάσεων. Σημαντικό ρόλο στην εκδήλωση των πλημμυρών έχουν, και τα ιδιαίτερα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των υδρογραφικών δικτύων και των αντίστοιχων λεκανών απορροής. Επιπλέον οι πλημμύρες προκαλούν την διάβρωση των εδαφών, που σε συνδιασμό με τις δασικές πυρκαγιές και την υποβάθμιση των εδαφών, οδηγεί στη σταδιακή ερημοποίηση εκτεταμένων περιοχών. Η προστασία έναντι των πλημμυρών, η κατασκευή αναχωμάτων και η χωροταξική διευθέτηση των χρήσεων γης στις παραποτάμιες περιοχές είναι συνιθισμένα θέματα συζήτησης που ανακύπτουν αμέσως μετά από πλημμυρικά περιστατικά. Οι κατασκευαστικές προσεγγίσεις στον έλεγχο των πλημμυρών, όπως τα αναχώματα, τα φράγματα και η διεύρυνση των καναλιών, καθώς και μη κατασκευαστικές προσεγγίσεις, όπως η χωροταξική προστασία των πλημμυρικών πεδιάδων και η διατήρηση των φυσικών υγροτόπων πρέπει να εξεταστούν από την άποψη του κόστους και του οφέλους.

Εκτός από τη συνοπτική κατάσταση της ατμόσφαιρας και των μορφολογικών χαρακτηριστικών των υδρογραφικών δικτύων και των αντίστοιχων λεκανών απορροής τους, οι ανθρωπογενείς επεμβάσεις στις κοίτες και τον ευρύτερο χώρο των υδρολογικών λεκανών ασκούν πιέσεις προς την ενίσχυση της έντασης των πλημμυρικών φαινομένων. Αυτό συμβαίνει, καθώς οι δραστηριότητες του ανθρώπου

αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον και με τον τρόπο αυτό επιταχύνονται ή γενικότερα μεταβάλλονται οι κανονικές διεργασίες των φυσικών συστημάτων (Μπαντής, 2007).

Η γρήγορη και σε μεγάλο βαθμό απρογραμμάτιστη ανάπτυξη της ευρύτερης περιοχής του νομού Αττικής και κυρίως του πολεοδομικού συγκροτήματος της Αθήνας, που πραγματοποιήθηκε τις τελευταίες δεκαετίες, προκάλεσε αρκετά περιβαλλοντικά προβλήματα. Η έντονη και συχνά χωρίς σχέδιο οικιστική δραστηριότητα σε συνδιασμό με τις ανεξέλεκτες πυρκαγιές και αποψιλώσεις είχε ως αποτέλεσμα τη σταδιακή μετατροπή δασικών εκτάσεων στις λεκάνες απορροής της Αττικής σε αγροτικά αξιοποιήσιμες περιοχές, οι οποίες με την πάροδο του χρόνου μετατράπηκαν σε περιοχές αραιής δόμησης και στη συνέχεια ρυμοτομήθηκαν για να αποτελέσουν τελικά περιοχές πυκνής δόμησης. Παράλληλα οι φυσικές κοίτες των υδρογραφικών δικτύων μετατράπηκαν σε δομημένες εκτάσεις ή αντικαταστάθηκαν από οδικούς άξονες. Όλες αυτές οι παρεμβάσεις στις υδρολογικές λεκάνες είχαν ως συνέπεια την τροποποίηση της φυσικής απορροής και την αύξηση της συχνότητας και της έντασης των πλημμυρών (Maroukian et al. 1994). Όμως πλημμύρες, που σε αρκετές περιπτώσεις προκάλεσαν υλικές ζημιές ή και ανθρώπινα θύματα, συνέβαιναν και κατά το παρελθόν αρκετά πριν την υπερεκμετάλλευση της γης και την έντονη οικιστική ανάπτυξη που παρατηρήθηκε μεταπολεμικά. Γίνεται φανερό ότι εκτός από τις ανθρωπογενείς επεμβάσεις που σαφώς διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επιδείνωση του φαινομένου πλημμυρών ευθύνονται και φυσικά αίτια, όπως οι ραγδαίες βροχοπτώσεις και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των υδρογραφικών δικτύων.

Η υδρολογία γενικότερα ασχολείται με τη μελέτη της κίνησης των νερών μέσα στον υδρολογικό κύκλο και τη μεταφορά των συστατικών, όπως τα ιζήματα και οι ρύποι με το νερό και τα χωρικά υδρολογικά μοντέλα επικεντρώνονται στην προσομοίωση της κίνησης του νερού και των συστατικών που μεταφέρει σε μια συγκεκριμένη περιοχή χρησιμοποιώντας τις δομές και τις λειτουργίες των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Ολοκληρωμένα συστήματα προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών με τη χρήση βάσεων δεδομένων των ΣΓΠ είναι πλέον σε λειτουργία (Maidment, 1996).

Η τεχνολογία των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών παρέχει τη δυνατότητα ταχείας επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων βοηθώντας σημαντικά την προσομοίωση των φυσικών καταστροφών συμβάλλοντας στην μελέτη των πλημμυρικών γεγονότων. Η προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου, η μαθηματική του δηλαδή περιγραφή και ποσοτικοποίηση, βασίζεται στην αρχή της διατήρησης της

μάζας. Όσο λεπτομερέστερα λαμβάνονται υπόψη οι επιμέρους διεργασίες (κατείσδυση, απορροή, βροχόπτωση-χιονόπτωση, εξατμισοδιαπνοή) της κυκλικής αυτής διαδικασίας τόσο ακριβέστερη καθίσταται η προσομοίωση δίνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα.

Επιπρόσθετα η ανάπτυξη της δυνατότητας επεξεργασίας των ψηφιακών μοντέλων εδάφους οδήγησε τους ερευνητές να σκεφτούν αρχικά τη χρήση των ΣΓΠ ως εξωτερική υποβοήθηση της υδρολογικής ανάλυσης τουλάχιστον στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, στη συνέχεια ακολούθησε η ενσωμάτωση υδρολογικών υπορουτίνων σύνθεσης γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών εντός των ΣΓΠ και η εξαγωγή δεδομένων-αρχείων στα υδρολογικά λογισμικά και σήμερα πλησιάζουμε στην ολοκληρωμένη υδρολογική ανάλυση και στους υπολογισμούς μέσω των ΣΓΠ (Tim and Jolly, 1994).

Παρ'όλα αυτά, οι εκτιμήσεις για τον αριθμό των ατόμων που κινδυνεύουν από πλημμύρες, και επηρεάζονται από συγκεκριμένα γεγονότα, είναι ζητήματα που ελλοχεύουν πολλές αβεβαιότητες, συμπεριλαμβανομένου του βαθμού στον οποίο τα γεγονότα έγιναν γνωστά, η προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την αξιολόγηση του κινδύνου πλημμύρας, και σε παγκόσμιο επίπεδο, οι διαφορές που υπάρχουν στα δεδομένα και οι διαφορετικές μέθοδοι καταγραφής που χρησιμοποιούνται.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Έχει αποδειχθεί ότι οι μορφομετρικές μεταβλητές μιας λεκάνης ελέγχουν την υδρολογική της απόκριση (Alexander, 1972, Gupta et al., 1980, Harlin, 1984, Patton, 1988, Esper, 2008). Η πρόβλεψη της απόκρισης μιας υδρολογικής λεκάνης στις ακραίες βροχοπτώσεις με βάση γεωμορφολογικούς δείκτες είναι ιδιαίτερα σημαντική στις λεκάνες για τις οποίες δεν υπάρχουν δεδομένα βροχής-απορροής για την μελέτη του πλημμυρικού κινδύνου (Lastra et al., 2008)

Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει στη σύνδεση της απόκρισης της υδρολογικής λεκάνης με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Οι Rodriguez-Iturbe και Valdes (1979) εισήγαγαν την έννοια του γεωμορφολογικά στιγμιαίου μοναδιαίου υδρογραφήματος (GIUH), η οποία γενικεύθηκε αργότερα από τους Gupta et al. (1980) και τους Gupta και Waymire (1983). Οι Rodriguez-Iturbe, et al., 1982 πρότειναν μια γεωμορφοκλιματολογική θεωρία του στιγμιαίου μοναδιαίου υδρογραφήματος ως συνδιασμός μεταξύ κλίματος, γεωμορφολογικής δομής και υδρολογικής αντίδρασης μιας λεκάνης με βάση το GIUH.

Μια από τις μεγαλύτερες δυσκολίες στην ανάπτυξη και εφαρμογή των υδρολογικών μοντέλων τις δεκαετίες 1970-1980 υπήρξε η προετοιμασία των κατάλληλων δεδομένων που απαιτούνταν για την προσομοίωση των υδρολογικών λεκανών και υδροφορέων. Τα μοντέλα συνήθως ήταν ιδιαίτερα απαιτητικά σε δεδομένα εισόδου και ο υπολογισμός των περισσότερων παραμέτρων που έπρεπε να υπολογισθούν γινόταν με το χέρι και τα δεδομένα έπρεπε να εισαχθούν στους υπολογιστές σε ειδικές μορφές. Η χρήση των Συστημώτων Γεωφραγικής Πληροφορίας διευκόλυνε σημαντικά τις διαδικασίες υπολογισμού των απαιτούμενων παραμέτρων και επέτρεψε την ευκολότερη ανάκτηση και επεξεργασία της χωρικής πληροφορίας. Αν και τα ΣΓΠ άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρύτερα από το 1970, η εκτεταμένη εφαρμογή τους στις υδρολογικές και υδραυλικές εφαρμογές και στη διαχείριση των υδατικών πόρων έγινε τα τελευταία χρόνια.

Στην πρώτη προσπάθεια της Υδρολογίας των ΣΓΠ ο Maidment (1993) αποφεύγοντας τους σύνθετους και χρονοβόρους υπολογισμούς προσδιορισμού της ταχύτητας ροής και αντίστοιχα του χρόνου συρροής, συνθέτει καναβοποιημένο μοντέλο εδάφους για τον καθορισμό της διαδρομής της απορροής, με αντίστοιχου κανάβου χάρτη προϋπολογισμένων - προκαθορισμένων ταχυτήτων ροής (στο τμήμα της χερσαίας ροής, overland flow) και παράγει μοναδιαίο υδρογράφημα της μεθόδου

Χρόνου - Επιφανείας (Time - Area, TA). Παρόμοια προσέγγιση έγινε από τον Metik το 1995. Ο Maidment et al. 1996 παρουσίασαν μια πιο περίπλοκη προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη και τον μετασχηματισμό και την αποθηκευτική ικανότητα σε επίπεδο κελιού και κανάβου. Η απόκριση της υδρολογικής λεκάνης υπολογίζεται με την υποδιαίρεση σε επί μέρους υπολεκάνες και η ροή προσδιορίζεται ως αποτέλεσμα της συνδασμένης διαδικασίας, ακολουθούμενη από μια διαδικασία διόδευσης μέσω γραμμικής δεξαμενής.

Το 1998 οι Kall και Feldman θεώρησαν ότι ο χρόνος ροής σε κάθε κάναβο της υπό μελέτη λεκάνης θα προέκυπτε απλώς ως ποσοστό επί του συνολικού υπολογισμένου ή μετρημένου ή προκαθορισμένου χρόνου συρροής, πολλαπλασιασμένος επί τον λόγο του χρόνου ροής επί του κάθε κανάβου διά του μεγίστου μήκους ροής. Η προηγούμενη παραδοχή αποδίδει ομοιόμορφες και σταθερές ταχύτητες ροής σε κάθε κάναβο ανεξαρτήτου χρήσης γης ή γεωλογικών χαρακτηριστικών. Γρήγορα έγινε αντιληπτό ότι η χρήση των ΣΓΠ παρέχει την ευκολία και την ακρίβεια στη διαχείριση και τη χωρική αντιπροσώπευση των υδρογεωλογικών στοιχείων. Αν και ο Maidment τέσσερα χρόνια μετά την πρώτη καταγραφή αναφέρει ότι η προσπάθεια προσομοίωσης των φυσικών διεργασιών με αλγόριθμους θα πρέπει να μπει σε δεύτερη μοίρα και θα πρέπει να δίδεται βάρος στη διαχείριση των δεδομένων και της υδρογεωλογικής πληροφορίας (Maidment, 1996).

Αντίστοιχα στην Ελλάδα οι προσπάθειες ενσωμάτωσης των ΣΓΠ στην υδρολογική ανάλυση γίνονται όλο και πιο πυκνές. Περιγράφοντας κυρίως το ζήτημα της βασικής παραδοχής για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης επισημαίνονται ο Δέρβος (2005) και η Βαρσάμου (2007), όπου όρισαν τις ταχύτητες του υδρογραφικού τους δικτύου χειροκίνητα, μέσα από διαδικασία ρύθμισης, ακολουθώντας το παράδειγμα της Kilgore (1997) η οποία είχε αναπτύξει μοντέλο αυτόματου υπολογισμού των ταχυτήτων του υδρογραφικού δικτύου προγραμματίζοντας σε γλώσσα C. Ο Χριστοφίδης το 2008 επιλύει την ταχύτητα της χερσαίας ροής συνθέτοντας την εξίσωση του κινηματικού κύματος με την εξίσωση Manning δημιουργώντας χάρτη τραχύτητας από τις χρήσεις γης. Για το δε υδρογραφικό δίκτυο ο υπολογισμός της ταχύτητας έγινε βάση της εξίσωσης Manning όπου προσομοιώθηκε ροή σε κανάλι τραπεζοειδούς διατομής πλάτους 2 μ. με πλευρική κλίση 1.75/1 και τραχύτητα συντελεστή Manning n = 0,05 (Brater and King, 1976).

Ο Π. Καψάλης το 2009 χρησιμοποιώντας το πρότυπο του Muskingum με τις παραμέτρους K και χ (όπου K εκφράζει το χρόνο που χρειάζεται το πλημμυρικό κύμα

για να διανύσει το κάθε τμήμα του υδατορέματος και ισούται περίπου με τη χρονική απόσταση των αιχμών των πλημμυρογραφημάτων εισόδου και εξόδου) χρησιμοποιεί αρχικά μια μέση τιμή της ταχύτητας πλημμυρικού κύματος και στη συνέχεια βελτιστοποιεί με τη διαδικασία του HEC-Hms συγκρίνοντας βαθμονομημένα και παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα.

Το 2010 η Μ. Αυγέρη χρησιμοποιεί εξίσωση (Μαμάσης 2005) η οποία έχει ως βασικές παραμέτρους α) την τραχύτητα των εδαφών, η οποία εξάγεται από τον αντίστοιχο χάρτη χρήσεων γης και β) την κλίση, η οποία εξάγεται από το ΨΜΕ. Για το υδρογραφικό δίκτυο πραγματοποιεί την κατά Strahler ταξινόμηση των υδατορεμάτων, η οποία αποδίδει τέσσερεις τάξεις υδατορεμάτων και τέσσερεις αντίστοιχες ταχύτητες ροής.

Συγκεκριμένα, μερικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου με διαφορετικές μεθοδολογίες:

Ο Gangodagamage (2001), χρησιμοποίησε τεχνικές τηλεπισκόπησης και GIS, καθώς και υδρολογικές παραμέτρους σε αναπτυσσόμενο υδρολογικό μοντέλο με χρήση των σχέσεων SCS curve number και τη μέθοδο Muskingum. Έγινε χρήση μεθόδων όπως, φιλτράρισμα απωλειών βροχοπτώσεων, μοναδιαίο υδρογράφημα και ποτάμια ροή. Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: IL WIS,ERDAS και Autocad MAP. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τα λογισμικά ήταν topo-maps, δεδομένα πεδίου, IRS LISS 111 multy temporal satellite data και IPS pan data .

Οι Weiland and Reinstorf (2009) είχαν ασχοληθεί με την εκτίμηση πλημμυρικού κίνδυνου στην Χιλή, αναλύοντας ποσοστά αστικοποίησης ως συνέπεια της αλλαγής χρήσεων γης. Στην μεθοδολογία ανέλυσαν και εκτίμησαν το ρίσκο πλημμυρικής επικινδυνότητας σε διάφορα επίπεδα. Οι δείκτες ομαδοποιήθηκαν σε δείκτες κίνδυνου και τρωτότητας, καθώς έγινε και αναφορά των στοιχείων που κινδυνεύουν. Χρησιμοποίησαν τεχνικές τηλεπισκόπησης και συστήματα GIS, υδρολογικά και υδραυλικά μοντέλα και στατιστικές μεθόδους. Χρησιμοποίησαν τα λογισμικά, HEC-HMS, HEC-RAS και δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς και δορυφόρους όπως ο QUICKBIRD, σε συνδυασμό με συστήματα GIS. Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής ήταν η εξαγωγή χαρτών επικινδυνότητας.

Οι Waheed et al. (2010) είχαν μελετήσει τις επιπτώσεις της αστικοποίησης κατά μήκος του πόταμου Kaduna, εντός της πόλης Kaduna στη Νιγηρία. Τα αποτελέσματα της εν λόγω μελέτης δεικνύουν ότι αυξάνοντας την αστικοποίηση κατά μήκος του πόταμου αυξάνονται τα πλημμυρικά επεισόδια. Το ποσοστό αστικοποίησης στις όχθες

του ποταμού ήταν ανοδικά, με 67,5% μέχρι 85,31% από το 1962 μέχρι το 2009. Στην μεθοδολογία τους έγινε υδρολογική ανάλυση η οποία περιλάμβανε την ανάλυση βροχοπτώσεων και την ροή αυτών από το 1955 μέχρι 2004, με ημερησία ροή πόταμου από 1967 μέχρι 1992, και ημερησία στάδια καταγραφής νερού από το 1993 μέχρι 2004. Χρησιμοποίησαν δεδομένα που αφορούσαν τη μορφολογία του εδάφους, γεωμετρικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτης περιοχής και του καναλιού του ποταμού, καθώς και μετεωρολογικά στοιχειά. Τα δεδομένα αυτά επεξεργαστήκαν με τα λογισμικά Microsoft excel surface mapping system software (surfer version 8.1), Autocad 2007 όπου και διαχειρίστηκαν την συλλογή πληροφοριών και δεδομένων για καθορισμό της μορφολογίας του καναλιού (Rosgen, 1996).

Τέλος πολυάριθμα ερευνητικά προγράμματα στον Ευρωπαϊκό χώρο, όπως τα FLOODSITE, HYDRATE, SPHERE, EFFS, IMPACT, EXCIMAP κ.α., εξετάζουν τα τελευταία χρόνια την εφαρμογή μεθοδολογιών σε σχέση με τις γεωπεριβαλλοντικές ιδιαιτερότητες κάθε τόπου, διατυπώνοντας τον προβληματισμό σε σχέση με την εφαρμοσιμότητα ορισμένων προσεγγίσεων σε ιδιαίτερες περιοχές (Martini and Loat, 2007). Ο χώρος της Μεσογείου, θεωρείται μία από τις περιοχές αυτές, λόγω της εκδήλωσης πλημμυρών κατά μήκος εφήμερων χειμάρρων με συγκεκριμένες γεωμορφολογικές γεωλογικές και κλιματικές συνθήκες. Για το λόγο αυτό, η προσέγγιση του προβλήματος στο χώρο του Ευρωπαϊκού νότου προϋποθέτει τη χρήση μόνο ορισμένων από τις τεχνικές και τις μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί παγκοσμίως (Martini and Loat, 2007).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Πλημμυρικά φαινόμενα

1.1 Πλημμύρες

Οι άνθρωποι και το περιβάλλον υποφέρουν όλο και περισσότερο από τους φυσικούς κινδύνους. Οι αλλαγές στη σύγχρονη κοινωνία, όπως η αύξηση του πληθυσμού, η οικονομική ανάπτυξη, η αστικοποίηση, η ενβιομηχάνηση, η αποψίλωση των δασών, η επέκταση των κατοικημένων περιοχών, η αυξημένη κινητικότητα του εργατικού δυναμικού, η γήρανση του πληθυσμού κάνουν την κοινωνία περισσότερο ευάλωτη σε φυσικές καταστροφές (Takeuchi, 2006).

Ο αριθμός των ανθρώπων που πλήττονται από φυσικές καταστροφές ανήλθε σε 147 εκατ. κατά μέσο όρο ετησίως κατά τη διάρκεια του 1981-1990 και αυξήθηκε σε 211 εκατ. ετησίως κατά την επόμενη δεκαετία (1991-2000). Οι πλημμύρες ήταν υπεύθυνες για τα δύο τρίτα αυτών που επηρεάζονται και προκάλεσαν πάνω από το ένα τρίτο της συνολικής εκτιμώμενης οικονομικής ζημιάς (Pilon, 2003). Από το 1971 έως το 1995, οι πλημμύρες είχαν επιπτώσεις σε περισσότερους από 1,5 δισεκατομμύριο ανθρώπους (UNEP, 2004). Από αυτούς οι 318.000 σκοτώθηκαν και περισσότερο από 81 εκατομμύρια έμειναν άστεγοι. Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι ο αριθμός των μεγάλων καταστροφών από πλημμυρικά φαινόμενα αυξάνεται σημαντικά, τα τελευταία 50 χρόνια πιο συγκεκριμένα είχαμε έξι στη δεκαετία του 50, επτά στη δεκαετία του 60, οκτώ σε αυτή του 70, 18 στη δεκαετία του 80 και 26 στη δεκαετία του 90. Όπως φαίνεται και στην Σχήμα 1, σε σύγκριση με του τύπους των φυσικών καταστροφών οι πλημμύρες είναι η βασικότερη αιτία καταστροφής σε παγκόσμια κλίμακα.



Σχήμα 1: Παγκόσμια κατανομή τύπου φυσικών καταστροφών κατά την περίοδο 1963-2003 (Πηγή: EM-DAT)

Πλημμύρα, όπως έχει αναφερθεί, ορίζεται η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους, το οποίο υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν καλύπτεται από νερό. Οι πλημμύρες μπορεί να διαχωριστούν σε διάφορους τύπους. Η διαφοροποίηση μπορεί να βασίζεται κυρίως στο μέγεθος της πλημμυρισμένης περιοχής και στη διάρκεια της ενεργούς βροχόπτωσης που την προκαλεί. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά καθορίζουν τη χωρική και χρονική κλίμακα των πλημμυρικών φαινομένων (Bronstert, 2003). Κατά συνέπεια προκύπτουν δύο κύριες κατηγορίες, οι εκτεταμένες μεγάλης διάρκειας και οι τοπικές αιφνίδιες πλημμύρες. Οι πλημμύρες συνήθως κατατάσσονται σε τρείς κύριες κατηγορίες: τις πλημμύρες ποταμών, τις στιγμιαίες (αστραπιαίες) πλημμύρες και τις παράκτιες πλημμύρες λόγω μετεωρολογικών παλιρροιών (Perry 2000, Berz et al 2001, Kron 2002, Jonkman 2005). Ωστόσο, και άλλοι λιγότερο κοινοί τύποι πλημμυρών μπορούν να συμπεριληφθούν, όπως οι πλημμύρες από αστοχία και κατάρρευση φραγμάτων ή αναχωμάτων, πλημμύρες από λασποροές (Perry, 2000).

Σαν φυσικό φαινόμενο η πλημμύρα είναι ένα δυναμικό, βίαιο φαινόμενο, εξαιρετικά επικίνδυνο και καταστρεπτικό, που εμφανίζεται γενικά απρόβλεπτα και που αφήνει ελάχιστα χρονικά περιθώρια για να μπορέσει να εκδηλώσει κανείς κάποια αντίδραση για την αντιμετώπισή του. Στον ελληνικό χώρο εμφανίζεται κυρίως τοπικά και έχει μικρή διάρκεια. Το κρίσιμο ερώτημα είναι το πώς θα αποφευχθούν οι ακραίες πλημμυρικές παροχές να μετατραπούν σε πλημμύρα, σε συνδυασμό πάντα με τις αλλαγές που επιφέρει η ανάπτυξη μίας περιοχής (Στάθης, 2004).

Οι πλημμύρες ποταμών είναι συνήθως από την υπερχείλιση του ποταμού, όταν η χωριτικότητα του φυσικού ή ανθρωπογενούς συστήματος αποστράγγισης δεν επαρκεί για να παροχετεύσει τον όγκο του νερού που παράγεται από την βροχόπτωση ή όταν δεν υπάρχουν τα απαραίτητα αντιπλημμυρικά έργα. Συγκεκριμένα, οι ποτάμιες πλημμύρες αποτελούν ένα φυσικό φαινόμενο που λαμβάνει χώρα όταν το ύψος της βροχόπτωσης ξεπερνά την ικανότητα του εδάφους και του υδρογραφικού δικτύου μιας περιοχής να απορροφήσει και να αποστραγγίσει αντίστοιχα το νερό που συγκεντρώνεται ως επιφανειακή απορροή. Σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά την έναρξη μιας ακραίας βροχής η μεταφορική ικανότητα του υδρογραφικού δικτύου μειώνεται και η περίσσεια νερού υπερχειλίζει την ποτάμια κοίτη προκαλώντας ακραίες πλημμυρικές παροχές αιχμής Στις ποτάμιες πλημμύρες οι καταστροφές αυξάνονται ακόμη περισσότερο από το γεγονός ότι τα πλημμυρικά νερά, λόγω των μεγάλων ταχυτήτων και αντίστοιχα της μεγάλης μεταφορικής τους δύναμης, μεταφέρουν μεγάλου όγκου υλικά (Μπέλλος, 2009). Οι ποτάμιες πλημμύρες έχουν μεγαλύτερη

επίπτωση όσον αφορά την έκταση των καταστροφών στις υποδομές και στη μετατόπιση πληθυσμών, επομένως έχουν μεγάλες οικονομικές επιπτώσεις (Συνοδινού & Νιβολιανίτου, 2010).

Από πολύ εντατική τοπική βροχόπτωση προκαλούνται οι στιγμιαίες ή αστραπιαίες πλημμύρες (flash flood), που μπορεί να προκαλέσουν εκτεταμένες καταστροφές, ιδίως όταν συμβαίνουν ταυτόχρονα με άλλα φυσικά φαινόμενα, όπως κατολισθήσεις εδάφους ή μεταφορά λάσπης. Οι στιγμιαίες πλημμύρες, οι οποίες είναι αρκετά συχνές στις Μεσογειακές χώρες και τις ορεινές περιοχές, είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες καθώς συμβαίνουν ξαφνικά με ελάχιστη προειδοποίηση. Προκαλούνται από ιδιαίτερα έντονη βροχόπτωση σε μικρή περιοχή μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα, συνήθως σε λίγα δευτερόλεπτα εώς μερικές ώρες, προκαλώντας την απότομη αύξηση της στάθμης του νερού και την απότομη πτώση της. Ορισμένες φορές συνοδεύονται από βίαιους χείμαρρους που σαρώνουν τα πάντα (CEC, 2004).

Στις παράκτιες περιοχές, πλημμύρες μπορεί να προκληθούν από την άνοδο της στάθμης του νερού, λόγω των δυνάμεων του ανέμου και της ατμοσφαιρικής πίεσης ενός τυφώνα, μιας έντονης καταιγίδας. Η μετεωρολογική παλίρροια τόσο κοντά στις ακτές όσο και στην ανοιχτή θάλασσα είναι ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας πρόκλησης πλημμυρικών συμβάντων στις παράκτιες περιοχές και μάλιστα η επικινδυνότητα έχει αυξηθεί λόγω της παράκτιας διάβρωσης. Όταν οι θαλάσσιες καταιγίδες συμπίπτουν με ανύψωση της στάθμης του νερού στις εκβολές ποταμών τότε είναι πιθανό να προκληθούν εκτεταμένες ζημιές (CEC, 2004).

Η κοίτη ή ο ρους ενός συνεχούς ή ασυνεχούς ρεύματος είναι η περιοχή που καλύπτεται από τα ύδατα στην συνήθη μέγιστη στάθμη τους. Οι ζώνες εμφανίσεως πλημμυρών είναι αυτές που οριοθετούνται από το θεωρητικό επίπεδο που θα φτάσουν τα νερά σε περίπτωση πλημμύρας ανάλογα με την περίοδο «επανεμφάνισης» 100 ή 500 χρόνια. Οι ζώνες αυτές δεν επηρεάζουν τον χαρακτήρα των εδαφών (δημόσιες ή ιδιωτικές) αλλά οι αρχές μπορούν να θέτουν περιορισμούς στη χρήση τους έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ζωή των ανθρώπων και τα αγαθά (ΕΟΚΕ, 2005). Όταν εμφανιστεί η πλημμύρα των 100 ή 500 ετών

- ο ποταμός θα καλύψει την έκταση που αντιστοιχεί στο ενδεχόμενο αυτό,
- οι πλημμύρες αυτές θα εκδηλωθούν με κάθε βεβαιότητα στο αντίστοιχο διάστημα,
- οποιαδήποτε από αυτές μπορεί να εμφανιστεί ανά πάσα στιγμή.

Ενδεικτική ταξινόμηση διαφορετικών τύπων πλημμυρών (Martini and Loat 2007, Smith and Ward 1998) σε σχέση με τα πιο συνήθη αίτια και επιπτώσεις: (Πίνακας 1)

Τύπος πλημμύρας	Ενδεικτικά αίτια	Ενδεικτικές επιπτώσεις
Ποτάμιες πλημμύρες (Riverine Floods)	Βροχόπτωση μακράς διαρκείας, λιώσιμο χιονιού, αστοχία αντιπλημμυρικών	Πλημμυρικά ύδατα σε πλημμυρικά πεδία (στάσιμα ή ρέοντα)
Αιφνίδιες πλημμύρες (Flash Floods)	Έντονη βροχόπτωση, μικρής διάρκειας	Έντονη διάβρωση, ορμητικά ύδατα, εμπλουτισμός με εδαφικό υλικό, λασπορροές
Αστικές πλημμύρες (Urban Floods)	Αστοχία τεχνικών έργων, έντονη βροχόπτωση	Πλημμυρισμένες κατασκευές
Παράκτιες πλημμύρες (Coastal Floods)	Υψηλές παλίρροιες, έντονη βροχόπτωση	Στάσιμα πλημμυρικά ύδατα στην ακτή, υποχώρηση της ακτής, υφαλμήριση της γης & των υδάτων
Πλημμύρες που συνδέονται με το υπεδαφικό νερό (Groundwater floods)	Υψηλή στάθμη υπεδαφικού νερού, κορεσμός υδροφόρου ορίζοντα	Στάσιμα πλημμυρικά ύδατα στο πλημμυρικό πεδίο
Πλημμύρες από αστοχία τεχνικού έργου - (Dam failure floods)	Αστοχία φράγματος, καναλιού κ.α. τεχνικών έργων	Έντονη διάβρωση, λασπορροές, ορμητικά πλημμυρικά ύδατα
Πλημμύρες ορεινών χειμάρρων (Mountain torrent floods)	Καταιγίδες, αστάθεια πρανών	Λασπορροές, έντονη διάβρωση, ορμητικά πλημμυρικά ύδατα και μεταφερόμενο υλικό, δημιουργία αλλουβιακού ριπιδίου
Πλημμύρες λιμνών (Lake Floods / Ponding Floods)	Ταχεία αύξηση των υδατικών αποθεμάτων	Στάσιμα πλημμυρικά ύδατα πέραν της ακτής

1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ποτάμια πλημμύρα

Με την επίδραση της ηλιακής ενέργειας ένα μέρος του νερού της γης υφίσταται συνεχή κυκλοφοριακή κίνηση μεταξύ της γήινης επιφάνειας και της ατμόσφαιρας, η οποία είναι γνωστή ως υδρολογικός κύκλος. Το ποσό του νερού που συμμετέχει στην ανακύκλωση, εκτιμάται σε 496χ103 km3. Η ποσότητα αυτή όμως εκφρασμένη σε ποσοστό ως προς το σύνολο των υδάτινων αποθεμάτων της Γης ανέρχεται μόνο στο 1% περίπου. Συνεπώς, ο άνθρωπος ζει με την επίδραση του μικρού αυτού ποσοστού, μέσα στα πλαίσια του οποίου μπορεί να ρυθμίσει την υδατική οικονομία του (Κωτούλας, 2001).

Τα ύδατα φτάνουν στην επιφάνεια της γης με μορφή κατακρημνισμάτων, δηλαδή βροχής, χιονιού ή χαλαζιού. Από αυτά ένα μέρος εξατμίζεται ήδη κατά την πτώση του και επιστέφει αμέσως στην ατμόσφαιρα. Το μεγαλύτερο μέρος τους όμως φθάνει στο έδαφος, από το νερό αυτό ένα σημαντικό μέρος εξατμίζεται απ' ευθείας

από την εδαφική επιφάνεια ή διαμέσου των φυτών (διαπνοή). Ένα μικρότερο μέρος διηθείται προς τα βαθύτερα στρώματα της γης σχηματίζοντας τα υπόγεια νερά και τις πηγές και εμποτίζοντας το έδαφος με υγρασία. Η μεγαλύτερη ποσότητα του νερού όμως απορρέει επιφανειακά προς τις χαμηλότερες περιοχές σχηματίζοντας υδάτινα νάματα, υδατοφλέβες, μικρά ρεύματα, χείμαρρους, χειμαρροποταμούς, ποταμούς, που τελικά καταλήγουν σε ένα μεγαλύτερο αποδέκτη (λίμνη ή θάλασσα). Από εκεί το νερό εξατμίζεται και επιστρέφει πάλι στην ατμόσφαιρα.

Τα στοιχεία του υδρολογικού κύκλου που συμμετέχουν στις πλημμύρες είναι (Γκιόκας, 2009) :

- Η βροχόπτωση στην οποία οφείλεται η απορροή.
- Η κατακράτηση του νερού από τα φυτά και το έδαφος .
- Η εξάτμιση ποσότητας νερού από το έδαφος, τα φυτά και τις λίμνες .
- Η δυνατότητα διήθησης του νερού στο έδαφος.

Ορισμένοι από τους παράγοντες που ρυθμίζουν τη σφοδρότητα των ποτάμιων πλημμύρων είναι οι ακόλουθοι (Καρύμπαλης, 2007):

- Η ένταση και η διάρκεια βροχόπτωσης.
- Η έκταση της λεκάνης απορροής.
- Η γεωμετρία της λεκάνης απορροής.
- Η γεωλογική σύσταση της λεκάνης απορροής.
- Η γεωμορφολογία της περιοχής.
- Η ανθρώπινη παρέμβαση

Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να διακριθούν σε δύο ευρύτερες κατηγορίες, τα στατιστικά, όπως η τοπογραφία, το σχήμα της υδρολογικής λεκάνης κ.α. και τα μεταλλασσόμενα με το χρόνο, όπως ο βαθμός κορεσμού του εδάφους, η ένταση βροχόπτωσης κ.α. (Καρύμπαλης κ.ά., 2007).

Δυναμικοί παράγοντες	Σταθεροί παράγοντες		Βραδέως μεταβλητοί παράγοντες
Ένταση βροχόπτωσης	Υδροπερατότητα σχηματισμών	Μήκος κύριου κλάδου	Βλάστηση
Κατευθυντικότητα βροχόπτωσης	Μορφή υδρογραφικού δικτύου	Έκταση λεκάνης	Χρήσεις γης
Χωρική κατανομή βροχόπτωσης	Παράμετροι καναλιών	Κλίσεις πρανών	Τήξη χιονιού ή πάγου
Συνθήκες υγρασίας εδάφους	Κοιλαδικοί παράμετροι	Εδαφικό κάλυμμα	Κλιματικοί παράγοντες
Διάρκεια βροχόπτωσης	Πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου	Σχήμα λεκάνης	
Κίνηση καταιγίδας	Προσανατολισμός λεκάνης	Υπεδαφική απορροή	

Πίνακας 2: Παράγοντες που επηρεάζουν την εκδήλωση πλημμυρών και γενικότερα τις υδρολογικές διεργασίες (Wilson 1990, Smith and Ward 1998, Ward and Robinson 2000, Παπαμιχαήλ 2004, Φουμέλης 2004, Μιμίκου και Μπαλτάς 2006).

Οι περισσότερες πλημμύρες είναι αποτέλεσμα δράσης της συνολικής ποσότητας και κατανομής της βροχόπτωσης, της περατότητας του πετρώματος ή του εδάφους και της τοπογραφίας. Στον Ελλαδικό χώρο οι καταστροφικότερες πλημμύρες συχνά είναι αποτέλεσμα σπάνιων, μεγάλων και έντονων καταιγίδων (Λέκκας, 2000).

Όπως προαναφέρθηκε, πλημμύρα προκαλείται όταν οι κοίτες του υδρογραφικού δικτύου (δηλαδή το σύστημα αποστράγγισης) δεν έχουν την δυνατότητα να παροχετεύουν το σύνολο του όγκου του νερού που έχει συγκεντρωθεί μετά από ένα έντονο πλημμυρικό γεγονός στη λεκάνη απορροής. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υπερχείλιση ποταμού (river flood). Οι πλημμύρες από υπερχείλιση ποταμού διαφέρουν σημαντικά ως προς το μέγεθος και τη διάρκειά τους. Στην περίπτωση μεγάλων ποταμών, όπως ο Δούναβης, ο Ρήνος και ο Έλβας, οι πλημμύρες μπορεί να εμφανιστούν αρκετό χρόνο μετά τη βροχόπτωση και να διαρκέσουν ημέρες, εβδομάδες ή ακόμα και μήνες (CEC, 2004).

Ειδικότερα, η αύξηση της πλημμυρικής παροχής οφείλεται ως επί το πλείστων σε αυξημένη βροχόπτωση σε σύντομο χρονικό διάστημα ή σε κορεσμένο έδαφος από προγενέστερες βροχοπτώσεις ή στην τήξη στρώματος χιονιού. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί πως οι καταιγίδες υψηλής έντασης και μικρής διάρκειας τείνουν να δημιουργούν μεγαλύτερους όγκους απορροής σε σχέση με τις καταιγίδες μεγάλης διάρκειας ή μεγάλου συνολικού ύψους κατακρημνίσεων (Martin – Vide et al, 1999). Ο προαναφερθέν τύπος καταιγίδας δημιουργεί πιέσεις στη λεκάνη απορροής, με αποτέλεσμα την πιθανή αδυναμία της κοίτης να ανταπεξέλθει στην αυξημένη παροχή, πλημμυρίζοντας τις παρακείμενες του ποταμού περιοχές. Πέραν των παραπάνω, είναι

σύνηθες φαινόμενο οι ορεινές περιοχές στα κατάντη του υδρογραφικού δικτύου να είναι εν τέλει αυτές που πλημμυρίζουν. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των μορφολογικών γνωρισμάτων της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου (Παπανικολάου και Δασκαλάκης, 2011).

Η πλημμύρα είναι αποτέλεσμα της δράσης όχι μόνο του συγκεκριμένου, πιθανώς ακραίου, μετεωρολογικού γεγονότος αλλά και άλλων παραγόντων. Φυσικά αίτια πλημμυρογένεσης αποτελούν ο τύπος και η περατότητα των πετρωμάτων της λεκάνης απορροής, η γεωμορφολογία, η κλίση του εδάφους και η γενικότερη τοπογραφία της περιοχής καθώς και ο τύπος βλάστησης που αναπτύσσεται εντός της λεκάνης αποστράγγισης. Επίσης ένα χαρακτηριστικό που θεωρείται ως αιτία εκδήλωσης πλημμύρας είναι η έκταση, το σχήμα της λεκάνης και η δομή του υδρογραφικού δικτύου (Strahler, 1957).

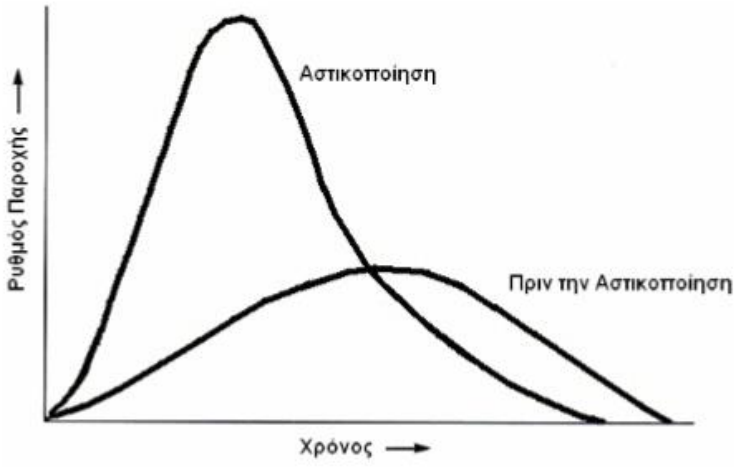
Η εποχή του έτους που εκδηλόνωνται μπορεί να διαφοροποιεί επίσης τη συμβολή των διάφορων παραμέτρων. Στην Ευρώπη, το καλοκαίρι ή το φθινόπωρο συνήθως προκαλούνται από τοπικά υψηλές βροχοπτώσεις. Μετά από μερικές ημέρες ή και εβδομάδες το έδαφος καθίσταται κορεσμένο και μειώνεται η ικανότητα διήθησης του νερού με αποτέλεσμα την αύξηση της επιφανειακής απορροής. Το χειμώνα ή την άνοιξη προκαλούνται από μεγάλης κλίμακας βροχοπτώσεις που συνήθως συνοδεύονται και από το λιώσιμο του χιονιού και των πάγων και επίσης από την ύπαρξη πάγου στο έδαφος που μειώνει την διήθηση του νερού στο έδαφος. (Barredo, 2007).

Ακόμη ένας παράγοντας πλυμμηρογέννεσης είναι, η αναμενόμενη κλιματική αλλαγή κατά τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα που θα επηρεάσει τον υδρολογικό κύκλο, με τις βροχοπτώσεις σε μερικές περιοχές να γίνονται μικρότερες μεν σε διάρκεια αλλά εντονότερες, ενώ σε άλλες περιοχές οι ξηρές περίοδοι θα αυξηθούν περισσότερο σε διάρκεια. Ένα άλλο αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής θα είναι ο κίνδυνος συχνότερων, και ενδεχομένως περισσότερο έντονων θυελλών ή άλλων ακραίων καιρικών γεγονότων (Ε.Ε.Α., 2007). Κατά τις τελευταίες δεκαετίες αναπτύσσονται πολλές θεωρίες οι οποίες υποστηρίζουν ότι η φυσική μεταβλητότητα του κλίματος συχνά οδηγεί σε ακραία καιρικά φαινόμενα και καταστροφές. Σε χρονική κλίμακα ημερών, μηνών ή ακόμα και ετών, μπορεί να εμφανίζονται κύματα καύσωνα, πλημμύρες, έντονες καταιγίδες και άλλα ακραία φαινόμενα λόγω της φυσικής διακύμανσης του καιρού και του κλίματος. Συγκεκριμένα η τελευταία έκθεση της ομάδας επιστημόνων του ΟΗΕ για την κλιματική αλλαγή (IPCC) που δημοσιεύθηκε

στις 7 Απριλίου 2007, έγραφε τα εξής: «Σχεδόν όλες οι περιοχές της Ευρώπης αναμένεται να επηρεαστούν αρνητικά από την κλιματική αλλαγή. Οι επιπτώσεις θα περιλαμβάνουν αυξημένο κίνδυνο στιγμιαίων πλημμυρών στην ενδοχώρα, πιο συχνές πλημμύρες στις ακτές και αυξημένη διάβρωση. Στη νότια Ευρώπη η κλιματική αλλαγή αναμένεται να επιδεινώσει τις συνθήκες (υψηλές θερμοκρασίες – ξηρασία) και να μειώσει τη διαθεσιμότητα του νερού, την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, την αγροτική παραγωγή και να αυξήσει τη συχνότητα εμφάνισης στιγμιαίων πλημμυρικών φαινομένων» (E.E.A., 2007). Ένα ακραίο καιρικό φαινόμενο αποτελεί μια κατάσταση που απέχει σημαντικά από την κανονική – φυσιολογική μορφή του κλιματικού συστήματος, ανεξάρτητα από την πραγματική επίδραση στη ζωή ή στην οικολογία της γης (European Environmental Agency, 2003). Το οικονομικό κόστος των ακραίων καιρικών φαινομένων και των πλημμυρών είναι αρκετά μεγάλο και θεωρείται ότι θα αυξηθεί, με το μεγαλύτερο οικονομικό βάρος να το επωμίζονται τα φτωχότερα έθνη.

Ωστόσο, εκτός από τα φυσικά αίτια που προκαλούν πλημμύρα, υπάρχουν και δευτερογενείς συνθήκες οι οποίες έχουν άμεση σχέση με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και κατ'επέκταση με το μέγεθος της πλημμυρικής επικινδυνότητας. Η ανθρώπινη δραστηριότητα, η ανάπτυξη δομημένου περιβάλλοντος και η συνεχής αστικοποίηση που χαρακτηρίζει τις παραποτάμιες περιοχές αλλά και το σύνολο της λεκάνης απορροής είναι πολύ σημαντικά στην πρόκλιση πλημμυρών. Ειδικά η αστικοποίηση και η ανάπτυξη υποδομών αποτελεί την κύρια αιτία για την αύξηση των επιπτώσεων των πλημμυρών. Όταν η αστική ανάπτυξη γίνεται χωρίς σχεδιασμό αυξάνεται ο κίνδυνος πλημμυρών και των συνεπειών τους γιατί αφενός οι αστικές περιοχές επεκτείνονται και σε περιοχές με υψηλή τρωτότητα στις πλημμύρες και επίσης με την οικιστική ανάπτυξη μπορεί να αλλοιωθεί η φυσική αποστράγγιση και να αυξηθεί η επιφανειακή απορροή των μερών (EEA, 2003). Η αστικοποίηση αυξάνει την επιφανειακή απορροή, καθώς μεταβάλει τις χρήσεις γης και την υδροπερατότητα του εδάφους. Σε αστικό περιβάλλον, η επιφάνεια απορροής είναι αδιαπέρατη συμβάλλοντας στην αύξηση της απορροής και στην αντίστοιχη μείωση της κατείσδυσης, εκτείνοντας τη συχνότητα και την ένταση των πλημμυρών. Για παράδειγμα, πάνω από 10 εκατομμύρια άνθρωποι ζουν σε περιοχές εκτεθειμένες στον κίνδυνο μεγάλων πλημμυρών κατά μήκος του Ρήνου και οι δυνητικές ζημιές από τις πλημμύρες ανέρχονται σε 165 δις ευρώ (http://www.eurosion.org) (CEC, 2004). Για τον λόγο αυτό, τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της υδρολογικής λεκάνης θα πρέπει

να αναγνωρίζονται και να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη πριν την οικοδόμηση εκατέρωθεν της κοίτης του ποταμού (Καρύμπαλης, 2007).



Σχήμα 2: Αποτέλεσμα της αστικοποίησης στον όγκο και το ποσό της απορροής

Η οικοπεδοποίηση, οι επιχωματώσεις, τα τεχνικά έργα και η άναρχη δόμηση εντείνουν το φαινόμενο μετά από ακραία μετεωρολογικά φαινόμενα προκαλώντας σημαντικές άμεσες και έμμεσες αρνητικές επιπτώσεις στις τοπικές κοινωνίες. Οι επιπτώσεις αυτές περιλαμβάνουν από καταστροφές καλλιεργειών, καταστροφές κτηρίων και οικιών μέχρι και απώλειες ζωών. Τα τελευταία χρόνια, πολλά μεγάλα αστικά κέντρα έχουν πληγεί από έντονες και καταστροφικές πλημμύρες, μετά από ακράια μετεωρολογικά γεγονότα, λόγω της έντονης αστικοποίησης και της ανεπάρκειας σχεδίων και έργων αντιπλημμυρικής προστασίας.

Όμως ακόμη και η ίδια η κατασκευή αντιπλημμυρικών έργων είναι δυνατόν να έχει έμμεσο αντίκτυπο στις ανάντη και κατάντη περιοχές των ποταμών και να αυξήσει τον κίνδυνο πλημμύρας. Η κατασκευή έργων για την ταχύτερη και δυνατή παροχέτευση των υδάτων από το τμήμα του ποταμού σε μια περιοχή συνεπάγεται ότι το νερό θα φθάνει ταχύτερα στους κατάντη γειτονές της. Οι λύσεις αυτές εκτός του ότι είναι αντιοικονομικές, δε βρίσκονται προς την πλευρά της ασφάλειας, αφενός λόγω του μεγάλου όγκου των στερεομεταφορών, που προσχώνουν σταδιακά τα φράγματα και αφετέρου λόγω της μελλοντικής επέκτασης των πόλεων που ενσωματώνουν τους χείμαρρους (Στεφανίδης, 1995). Κατά συνέπεια, είναι επιτακτικό η προστασία από τις πλημμύρες να αντιμετωπίζεται με συνδιασμό και συντονισμένο τρόπο σε όλο το μήκος του ποταμού (CEC, 2004).

Μερικές από τις ανθρώπινες δραστηριότητες που συμβάλουν στην αύξηση των πλημμυρών:

- οι κατασκευές σε υδρολογικές λεκάνες, διάφορα υδραυλικά έργα για την εκτροπή του ρου των ποταμών, η κατασκευή διωρύγων ή λιμένων χωρίς τη λήψη μέτρων για την αξιολόγηση και τη διόρθωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων,
- η εντεινόμενη ερημοποίηση με τη μαζική κοπή δέντρων, τις πυρκαγιές και τις λοιπές δραστηριότητες που βλάπτουν τη φύση. Η καταστροφή της δασικής βλάστησης στις ορεινές περιοχές αυξάνει την απορροή των ποταμών αυξάνοντας την πιθανότητα πλημμυρών. Η μη αειφόρος ανάπτυξη έχει σαν συνέπεια την αύξηση του κινδύνου εμφανίσεως πλημμυρών (ΕΟΚΕ, 2005).
- Η ευθυγράμμιση της κοίτης κατά την διευθέτηση των ποταμών στα πλαίσια της ένταξης τους σε αστικές περιοχές αυξάνει την απορροή (ΕΕΑ, 2005).
- Η εκδήλωση πλημμύρας σε εκτάσεις στις οποίες υπάρχουν βιομηχανίες ή αναπτύσσονται γεωργικές ή κτηνοτροφικές δραστηριότητες, αλλά ακόμα και σε κατοικημένες περιοχές, εμπεριέχει την πιθανότητα διασποράς ουσιών και προϊόντων η χρήση των οποίων, σε κανονικές συνθήκες, δεν συνιστά κίνδυνο για την ποιότητα των υδάτων, αλλά είναι δυνατόν με την μεταφορά τους στο περιβάλλον μέσω μιας πλημμύρας να μετατραπούν σε επικίνδυνους ρυπαντές για την υγεία των πολιτών και το οικοσύστημα (E.O.K.E., 2005)

Οι σύγχρονες λύσεις που προτείνονται βασίζονται στη δυνατότητα μείωσης των πλημμυρικών αιχμών στις φυσικές λεκάνες απορροής, με τις κατάλληλες ορεινές διευθετήσεις και την εκτόνωση των πλημμυρικών αιχμών σε ειδικά διαρρυθμισμένες ζώνες μέσα στην πόλη ή στην περιφέρεια των πόλεων (λεκάνες εκτόνωσης πλημμυρικών αιχμών). Οι λεκάνες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν χώροι πρασίνου η αναψυχής και οπωσδήποτε προσφέρουν πρόσθετη ασφάλεια σε περιπτώσεις μεγάλων πλημμυρικών γεγονότων (Στάθης, 2004).

1.3 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά λεκανών - παράμετροι

Σημαντικό ρόλο στην εκδήλωση πλημμυρών έχουν και τα ιδιαίτερα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των υδρογραφικών δικτύων και των αντίστοιχων λεκανών απορροής. Στην προσπάθεια εκτίμησης του πλημμυρικού δυναμικού των λεκανών απορροής η γεωμορφολογική ανάλυση περιλαμβάνει την επινόηση και την μέτρηση δεικτών που ποσοτικοποιούν σημαντικές φυσιογραφικές ιδιότητες. Οι παράμετροι αυτές (όπως η μορφολογική κλίση των κοιτών, η υδρογραφική πυκνότητα το μήκος δηλαδή των κοιτών ανά μονάδα επιφανείας της λεκάνης, η υδρογραφική συχνότητα που είναι ο αριθμός των ρευμάτων ανά μονάδα επιφανείας, η τάξη του δικτύου που προκύπτει από την αρίθμηση των κλάδων του (κατά Strahler, 1957), οι λόγοι διακλάδωσης και η διαδοχική κατά τάξη απορροή) συσχετίζονται αρκετά ισχυρά με την πλημμυρική παροχή.

Η μορφομετρική ανάλυση των λεκανών απορροής εισήχθη από τον Horton (1932, 1945) και στην συνέχεια αναπτύχθηκε και από άλλους ερευνητές (Strahler, 1952, 1957, Schumm, 1956, Morisawa, 1958). Η μορφομετρική ανάλυση αφορά την καταγραφή και τον υπολογισμό των διαφόρων χαρακτηριστικών του αναγλύφου και της γεωμετρίας, της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου, καθώς και την διερεύνηση των μεταξύ τους σχέσεων. Ο σκοπός της μορφομετρικής ανάλυσης είναι να ποσοτικοποιήσει την γεωμορφολογική δομή και να προβλέψει την υδρολογική και κατ' επέκταση υδρογεωλογική απόκριση της λεκάνης απορροής (Patton and Baker, 1976, Smith and Stopp, 1978).

Τα κύρια γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής που επηρεάζουν το υδρογράφημα είναι:

- Η επιφάνεια απορροής της λεκάνης

Αυτή είναι η οριζόντια προβολή της περιοχής που περικλείεται από τον υδροκρίτη και αντανακλά τον όγκο του νερού που μπορεί να παραχθεί από μια βροχόπτωση. Μπορεί να καθοριστεί είτε με προσεγγιστικές μεθόδους χάρτη ή GIS.

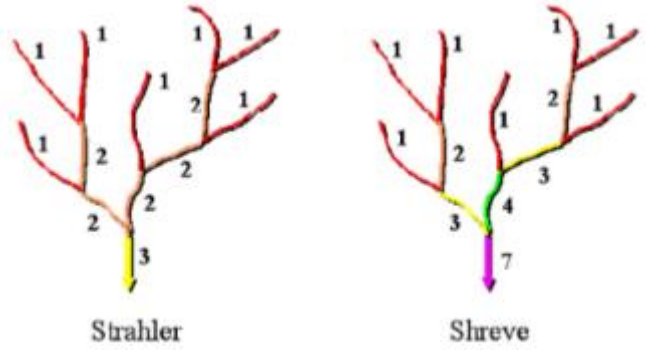
- Το σχήμα της λεκάνης απορροής

Έχουν προταθεί διάφοροι δείκτες που αφορούν το σχήμα της λεκάνης. Μερικοί από αυτούς είναι: ο δείκτης κυκλικότητας που ορίζεται ως ο λόγος της επιφανείας της λεκάνης προς την επιφάνεια κύκλου με περίμετρο ίδια με αυτή της λεκάνης (Miller,

1953), ο δείκτης συμπαγούς που ορίζεται ως ο λόγος της περιμέτρου της λεκάνης προς την περίμετρο κύκλου με επιφάνεια ίδια με αυτή της λεκάνης, ο δείκτης επιμήκυνσης που ορίζεται ως ο λόγος της διαμέτρου κύκλου εμβαδού ίσου με την επιφάνεια της λεκάνης προς το μέγιστο μήκος της λεκάνης (το μήκος από την έξοδο μέχρι το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης) (Schumm, 1956).

- Ταξινόμηση υδρογραφικού δικτύου

Η τάξη των ρευμάτων είναι ένα χαρακτηριστικό που ανακλά το βαθμό διακλάδωσης τους μέσα στη λεκάνη. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η κατάταξη κατά Strahler (1952, 1957) που τροποποίησε την μέθοδο Horton (1945) και η κατάταξη κατά Shreve (1966, 1967).



Σχήμα 3 : Ταξινόμηση υδραφικού δικτύου (Πηγή: http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/printBooks_topics.cfm?pid=6050

- Η μηκοτομή του ρεύματος

Αφορά την κατά μήκος τομή του κυρίως ρεύματος της υδρολογικής λεκάνης. Συνήθως ο κλάδος με τη μεγαλύτερη τάξη και το μεγαλύτερο μήκος, χαρακτηρίζεται ως κύριο υδατόρευμα ή κύρια μισγάγγεια της λεκάνης.

Το μήκος του κύριου υδατορεύματος αποτελεί από τα βασικότερα χαρακτηριστικά της λεκάνης και συσχετίζεται εμπειρικά με το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης. Η κλίση του κύριου ρεύματος μπορεί να ορισθεί με διάφορους τρόπους. Ένας από αυτούς, είνα να διαιρεθεί η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο χαμηλότερο και το υψηλότερο σημείο του ρεύματος με το ολικό μήκος του. Η κλίση αυτή κατά κανόνα δεν είναι πολύ αντιπροσωπευτική. Είναι προτιμότερο να υπολογισθεί η κλίση

με βάση την κατά μήκος τομή και τον χωρισμό του ρεύματος σε περισσότερα από ένα τμήματα με ομοιόμορφη κλίση.

- Υψομετρική (ή υψογραφική) καμπύλη της λεκάνης

Η καμπύλη που σε κάθε δεδομένη τιμή του τοπογραφικού υψομέτρου z αντιστοιχίζει το ποσοστό της επιφάνειας της λεκάνης F(z) που έχει υψόμετροο μεγαλύτερο ή ίσο της δεδομένης τιμής.

Ο υπολογισμός του μέσου υψομέτρου της λεκάνης γίνεται με βάση την υψομετρική καμπύλη F(z) χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$z_s = \sum \frac{z_r + z_{r+1}}{2} \Delta F_r$$

Όπου: το πεδίο μεταβολής του F έχει υποδιαιρεθεί σε υποδιαστήματα μήκους ΔFr (όχι κατ' ανάγκη ίσα, αλλά με άθροισμα ίσο με 1) και οι τιμές του z που αντιστοιχούν στα άκρα του υποδιαστήματος ΔFr είναι z_r και z_{r+1}.

Η μέση κλίση της λεκάνης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S\% = \frac{1}{A} \sum i_r \Delta S_r$$

Όπου: η συνολική έκταση της λεκάνης έχει διαιρεθεί σε τμήματα ΔS_r που το καθένα έχει περίπου σταθερή κλίση i_r. Η παράμετρος αυτή αποτελεί μια ποσοτική έκφραση της τραχύτητας του αναγλύφου και όσο μεγαλύτερη η τιμή της τόσο περισσότερο απότομο και τραχύ είναι το ανάγλυφο της λεκάνης (Παυλόπουλος και Καρύμπαλης, 2003).

- Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου ή πυκνότητα αποστράγγισης

Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου D, ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού μήκους του υδρογραφικού δικτύου σε Km προς την επιφάνεια της λεκάνης A σε Km^2 (Horton, 1945).

$$D = \frac{\sum L_u}{A}$$

Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου δείχνει το μήκος που πρέπει να διανύσει το νερό στην επιφάνεια του εδάφους μέχρι να φθάσει σε κάποιο υδατόρρευμα. Μια λεκάνη θεωρείται ότι έχει μικρή πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου αν D<0,5 και υψηλό αν D>3. Επίσης με τον όρο υδρογραφική συχνότητα ή συχνότητα ρευμάτων σε Km-2 νοείται ο συνολικός αριθμός ρευμάτων, κύριων και δευτερευόντων της λεκάνης σε σχέση με την επιφάνεια της λεκάνης. (Παυλόπουλος και Καρύμπαλης, 2016)

$$F = \frac{\sum N_u}{A}$$

Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το σχήμα του υδρογραφήματος κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας. Επειδή η ταχύτητς της ροής είναι υψηλότερη μέσα στο υδατόρρευμα η υψηλή πυκνότητα μειώνει σημαντικά το χρόνο συγκέντρωσης σε μια πλημμύρα και κατά συνέπεια και το μέγεθος της πλημμυρικής αιχμής. Υψηλή πυκνότητα μπορεί να σημαίνει μεγαλύτερο κίνδυνο πλημμύρας. Η πυκνότητα είναι υψηλότερη σε άγονες περιοχές με αραιή βλάστηση και αυξάνεται με την αύξηση της έντασης των βροχοπτώσεων. Εξαρτάται επίσης από την γεωλογία της λεκάνης και από τις κλίσεις του αναγλύφου (Gardiner and Gregory, 1982, Melton, 1957, Rodriguez-Iturbe and Escobar, 1982, Pallard et all., 2009).

- Συντελεστής διακλάδωσης ορίζεται ως η σχέση μεταξύ του αριθμού των ρευμάτων μιας τάξης και εκείνου της επόμενης ανώτερης τάξης. (Schumn, 1956)

$$R = \frac{N_u}{N_{u+1}}$$

Όπου: N_u το συνολικό μήκος των ρεμάτων u-τάξης και N_{u+1} το συνολικό μήκος των ρεμάτων u+1- τάξης.

Ο Horton απέδειξε ότι η ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής διέπεται από συγκεκριμένους νόμους που αφορούν τον αριθμό και το μήκος των κλάδων και την επιφάνεια των κάθε τάξεως υπολεκανών.

Ο πρώτος νόμος του Horton αναφέρει ότι ο αριθμός των διαδοχικών μικρότερης τάξεως κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου τείνει να σχηματίσει μια αύξουσα γεωμετρική ακολουθία, της οποίας ο πρώτος όρος είναι η μονάδα και έχει για λόγο το μέσο συντελεστή διακλάδωσης. Ο δεύτερος νόμος αναφέρει ότι τα αθροιστικά μέσα μήκη των διαδοχικά μεγαλύτερης τάξεως κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου τείνουν να σχηματίσουν μια αύξουσα γεωμετρική ακολουθία, της οποίας ο πρώτος όρος έιναι το μέσο μήκος των 1^{ης} τάξεως κλάδων και έχει για λόγο το συντελεστή μήκους. Τέλος ο τρίτος νόμος του Horton αναφέρει ότι τα αθροιστικά μέσα εμβαδά των διαδοχικά μεγαλύτερης τάξεως υπολεκανών επίσης σχηματίζουν μια γεωμετρική πρόοδο.

1.4 Χείμαρροι και κλίση στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, πολλές λεκάνες απορροής έχουν διαμορφωθεί από χείμαρρους η κεντρική κοίτη των οποίων έχει διακλαδιζόμενη μορφή. Έχουν μικρή έκταση και χαρακτηρίζονται από μεγάλες μορφολογικές κλίσεις. Τα ποτάμια αυτά συστήματα είναι περιοδικής ροής και κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους δεν έχουν νερό. Εντούτοις, κατά την διάρκεια των ακραίων βροχοπτώσεων η παροχή τους είναι δυνατόν να αποκτήσει εξαιρετικά υψηλές τιμές και να γίνουν ιδιαίτερα ενεργά προκαλώντας ακραία αιφνίδια πλημμυρικά γεγονότα μικρής συχνότητας, αλλά μεγάλης έντασης.

Κάθε χειμαρρικό ρεύμα διαθέτει ένα χώρο χειμαρρικής δράσης ή χειμαρρικό χώρο, στον οποίο εξελίσσονται τα φαινόμενα της υδατοαπορροής και της διακίνησης (παραγωγής, μεταφοράς, απόθεσης) φερτών υλών.

Κάθε χειμαρρική λεκάνη απορροής διακρίνεται σε δύο τμήματα (Κωτούλας, 2001):

1) Ορεινή λεκάνη απορροής, η οποία περιλαμβάνει την ορεινή περιοχή του χειμαρρικού χώρου.

2) Πεδινή λεκάνη απορροής, η οποία εκτείνεται από την έξοδο του ρεύματος στη πεδινή περιοχή μέχρι την εκβολή του στον αποδέκτη.

Η πεδινή έκταση, την οποία επηρεάζει το χειμαρρικό ρεύμα με τη δράση του και ιδίως με την απόθεση φερτών υλικών, αποτελεί το ριπίδιο. Τέλος ως δέλτα χαρακτηρίζονται οι αποθέσεις, που σχηματίζουν τα χειμαρρικά ρεύματα εντός των λιμνών και των θαλασσών στις θέσεις εκβολής τους.

Η υψομετρική διαμόρφωση του χειμαρρικού χώρου ασκεί ιδιαίτερη επίδραση στη μορφολογία και γενικότερα στο χαρακτήρα των μικρών χειμαρρικών ρευμάτων.

1.5 Το καθεστώς πλημμυρών στην Ελλάδα

Στον Ελληνικό χώρο, αλλά και γενικότερα στο Μεσογειακό, παρατηρούνται συγκεκριμένες ιδιαιτερότητες σε ότι αφορά κυρίως τα κλιματικά, γεωτεκτονικά, πληθυσμιακά και υδρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής (Gaume et al. 2009, Díez-Herrero et al. 2009, Llasat et al. 2010a, Llasat et al. 2010b). Για το λόγο αυτό το καθεστώς κινδύνου θεωρείται ιδιαίτερο και οι στρατηγικές και οι τεχνικές μελέτης του επιβάλλεται να λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαιτερότητες αυτές. (Martini and Loat, 2007)

Η περιοχή της Μεσογείου, όπως προαναφέρθηκε, αποτελεί τη ζώνη μετάβασης μεταξύ της ψυχρής και υγρής κλιματικής ζώνης των βόρειων γεωγραφικών πλατών και της θερμής και ξηρής κλιματικής ζώνης των μικρών γεωγραφικών πλατών. Ο όρος «Μεσογειακή λεκάνη απορροής περιλαμβάνει μια μεγάλη ποικιλία υπο-περιβαλλόντων που συχνά χαρακτηρίζονται από σύνθετες κλιματικές συνθήκες (Camarasa Belmonte και Segura Beltran, 2001). Υπάρχει άνιση κατανομή των βροχοπτώσεων, λόγω του μεσογειακού κλίματος της Ελλάδας, που έχει ως συνέπεια την εμφάνιση έντονων πλημμυρών, αλλά και το έλλειμμα νερού την περίοδο που η ζήτηση αυτού παρουσιάζεται αυξημένη. Στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου οι ποτάμιες πλημμύρες σχετίζονται πρωτογενώς με ατμοσφαιρικά φαινόμενα συνοπτικής και μέσης κλίμακας. Ειδικότερα, τα βαρομετρικά χαμηλά μεσαίων γεωγραφικών πλατών που συνοδεύονται από θερμά και ψυχρά μέτωπα μπορεί να οδηγήσουν στην ανάπτυξη καταιγιδοφόρων νεφών (σωρειτομελανίες, cumulonimbus). Τα συγκεκριμένα συστήματα συνοπτικής κλίμακας εμφανίζονται στον ελλαδικό χώρο τις μεταβατικές εποχές καθώς και την χειμερινή περίοδο του έτους. Την θερμή περίοδο του έτους πλημμυρικά φαινόμενα μπορεί να προκαλέσουν θερμικές καταιγίδες κατακορύφου ανάπτυξης, κυρίως στις ηπειρωτικές περιοχές της χώρας. Τα συγκεκριμένα μέσης κλίμακας φαινόμενα παρουσιάζουν χωρική έκταση 5-10 χλμ. και χρονική διάρκεια 1-2 ώρες (Wallace και Hobbs, 2006). Διακρίνονται για την ραγδαιότητά τους, καθώς κατανέμουν σημαντικά ποσά υετού σε περιορισμένη περιοχή και σε μικρά χρονικά διαστήματα με αποτέλεσμα την αδυναμία απόκρισης του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής και την εκδήλωση αιφνίδιων πλημμυρικών φαινομένων (Ahrens, 2006).

Επομένως, η εκδήλωση πλημμυρικών γεγονότων στην Ελλάδα είναι -ως επί το πλείστον- απόρροια της έντονης γεωγραφικής μεταβλητότητας των κλιματικών στοιχείων λόγω της συνύπαρξης ανεπτυγμένης ακτογραμμής και ορεογραφίας

(Ράμπιας 2007). Σε αυτήν την κατεύθυνση η οροσειρά της Πίνδου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο και αποτελεί ένα «υδρολογικό σύνορο» μιας και η μέση ετήσια βροχόπτωση στη Δυτική Ελλάδα είναι της τάξης των 1800mm ενώ στα Ανατολικά το αντίστοιχο μέγεθος είναι περίπου 400mm. Ωστόσο, η εκδήλωση πλημμυρικών συμβάντων δεν σχετίζεται άμεσα με τη μέση ετήσια βροχόπτωση, αλλά με την ένταση, τη διάρκεια των βροχοπτώσεων και το ανάγλυφο της λεκάνης απορροής. Γι' αυτόν τον λόγο, παρότι το ύψος βροχής στην δυτική χώρα είναι μεγαλύτερο απ' ότι στην ανατολική, τα πλημμυρικά γεγονότα στην ανατολική είναι πυκνότερα

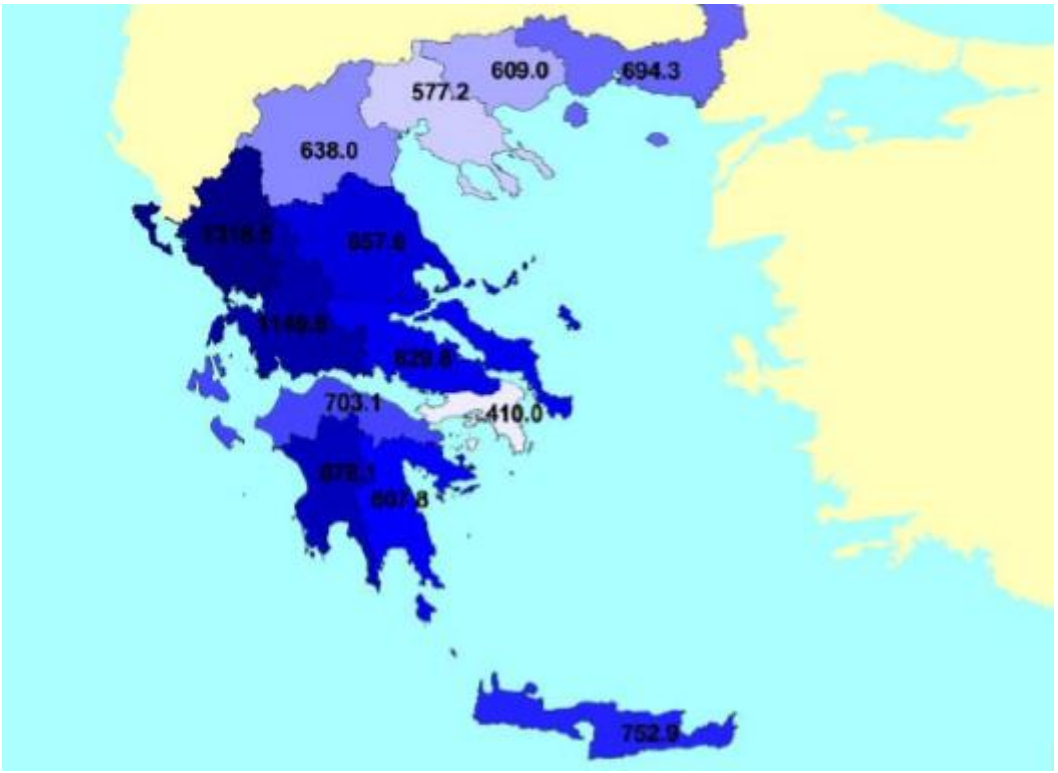
Επίσης με βάση τις τελευταίες προβλέψεις για την αλλαγή του κλίματος για τις επόμενες δεκαετίες (Dankers and Feyen, 2008) είναι πολυ πιθανό να προκληθεί επιπλέον αύξηση των ζημιών των πλημμυρών στην Ελλάδα. Λόγω της αλλαγής του κλίματος, με πιθανή αύξηση της συχνότητας εμφάνισης καταρρακτωδών βροχών και τη δυνητική άνοδο της στάθμης της θάλασσας εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας (IPCC, 2001 EEA, 2005).

Το γεωτεκτονικό καθεστώς: Η ενεργός τεκτονική του ελληνικού χώρου οδηγεί στην ύπαρξη σημαντικών μορφολογικών κλίσεων, την εναλλαγή λιθολογιών κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου και στην ύπαρξη μορφολογικών ασυνεχειών. Αποτέλεσμα αυτής της φυσικής διαμόρφωσης είναι τα ύδατα να αποκτούν σημαντικές ταχύτητες και να υποβοηθάται η διάβρωση και μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων εδαφικού υλικού (Andreadakis and Fountoulis 2007).

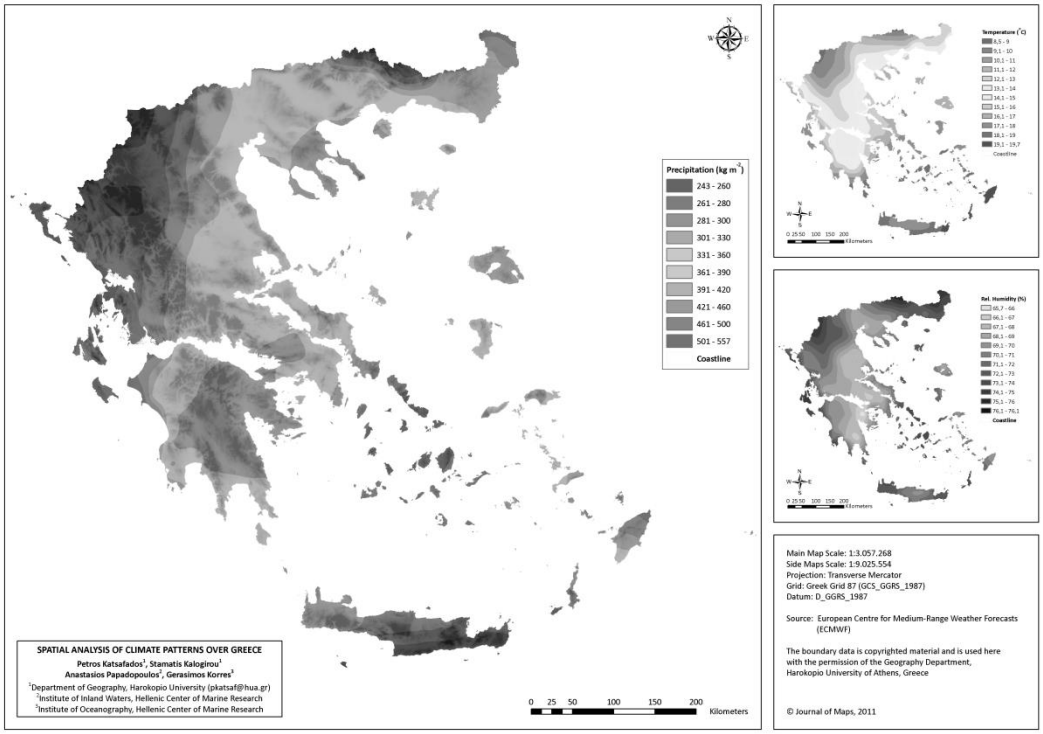
Οι ζημιές που θα προκληθούν λόγω πλημμύρας εξαρτώνται από:

- την ένταση των φυσικών φαινομένων
- την παρουσία αντιπλημμυρικών έργων
- την αλλοίωση του φυσικού περιβάλλοντος
- την ετοιμότητα των μηχανισμών
- την ένταση των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων στο πεδίο πλημμυρών (Μαμάσης, 2011)

Στον ακόλουθο Χάρτη παρουσιάζονται οι μέσες υπερετήσιες βροχοπτώσεις ανά υδατικό διαμέρισμα στην Ελλάδα για το διάστημα 1960-1990.

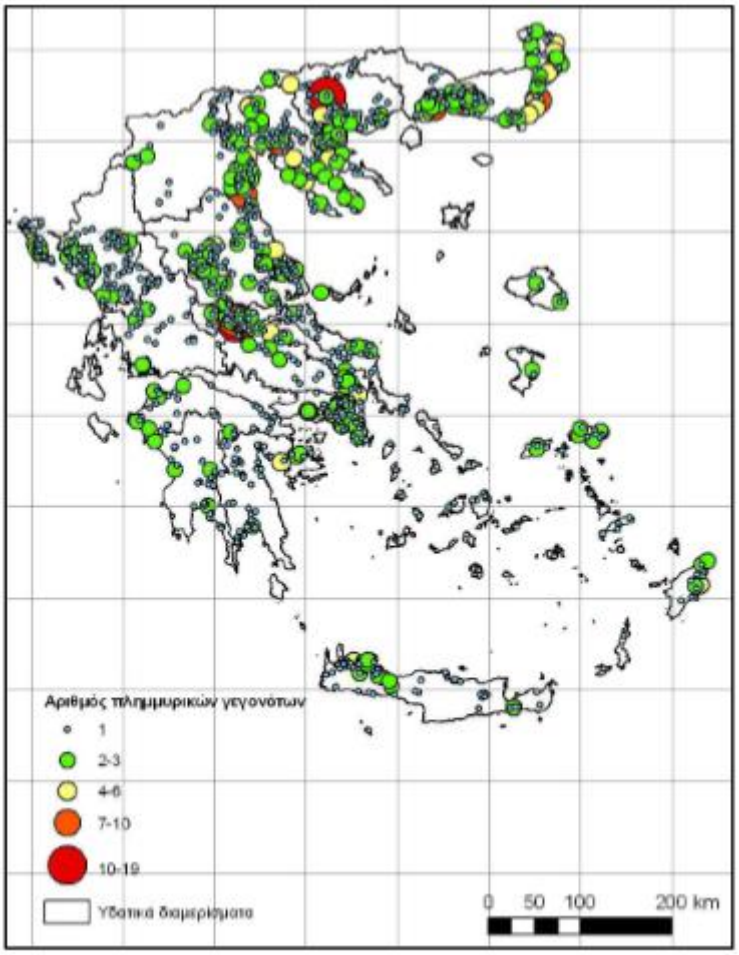


Χάρτης 1: Μέση υπερετήσια βροχόπτωση (mm) για την περίοδο 1960 –1990 ανά υδατικό διαμέρισμα, (Πηγή: http://ndbhmi.chi.civil.ntua.gr ΕΤΥΜΠ)



Χάρτης 2: Χωρική κατανομή της βροχόπτωσης, της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας για τον ελλαδικό χώρο (Katsafados κ.ά. 2012).

Στο υδατικό διαμέρισμα της Αττικής (GR06), όπου βρίσκεται και η περιοχή μελέτης, παρατηρείται μεγάλος αριθμός πλημμυρικών γεγονότων. Η παρατήρηση αυτή ως ένα βαθμό αποδίδεται στο αστικό περιβάλλον της περιοχής που έχει ως συνέπεια την αύξηση του ποσοστού της αδιαπέρατης επιφάνειας (στέγες, πεζοδρόμια και τσιμέντο). Γενικά η αστικοποίηση αυξάνει την επιφανειακή απορροή και κατά επέκταση, τον κίνδυνο πλημμύρας (Λέκκας, 2000).



Χάρτης 3: Αριθμός πλημμυρικών γεγονότων (Πηγή: Ειδική Γραμματεία Υδάτων,2012)

Σε γενικές γραμμές τα έντονα πλημμυρικά φαινόμενα στην Ελλάδα παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της υγρής ή βροχερής περιόδου του έτους. Οι μήνες Νοέμβριος και Δεκέμβριος παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συχνότητα πλημμυρικών συμβάντων. Επιπλέον, ο μήνας Νοέμβριος είναι ο μήνας που παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές έντασης βροχής ανά 24ώρο (Στάθης, 2004).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Πλημμυρικός κίνδυνος

2.1 Κίνδυνος, Τρωτότητα, Έκθεση και αποσπάσματα Οδηγίας 2007/60/ΕΚ

Στο πλαίσιο της ανάλυσης ενός φυσικού κινδύνου και της εκτίμησης της κρισιμότητας αλλά και του διακυβεύματος που βρίσκεται υπό απειλή εξετάζονται όροι όπως ο κίνδυνος (hazard), η τρωτότητα (vulnerability), η έκθεση (exposure) και η διακινδύνευση (risk) που ορίζονται παρακάτω. Με μια γενική θεώρηση ο φυσικός κίνδυνος (hazard) είναι μια απειλή σε ένα σύστημα που περιλαμβάνει στοιχεία (elements) όπως ο άνθρωπος, οι περιουσίες, οι υποδομές, οι οικονομικές δραστηριότητες, το περιβάλλον και τα μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς. Ο κίνδυνος εκδηλώνεται με μεταβαλλόμενη ένταση στο χώρο και στο χρόνο με αποτέλεσμα να απειλεί με διαφορετική ένταση κάθε σύστημα και κάθε στοιχείο που μελετάται. Η τρωτότητα (vulnerability) αντιπροσωπεύει τη δυνατότητα αντίστασης στον κίνδυνο ή τη δυνατότητα προστασίας των στοιχείων του συστήματος έναντι του συγκεκριμένου κινδύνου. Τέλος η διακινδύνευση (risk) είναι το μέγεθος του κινδύνου που τελικά πραγματικά απειλεί τα στοιχεία του συστήματος.

Σε γενικές γραμμές, οι καταστροφές συμβαίνουν όταν συνυπάρχει η επικινδυνότητα (hazard) με την τρωτότητα (vulnerability) (Wisner et al., 2004) και η πιθανότητα για ένα κίνδυνο να προκαλέσει καταστροφή εξαρτάται κυρίως από την ικανότητα μιας κοινωνίας να αντιμετωπίσει τους υποκείμενους παράγοντες κινδύνου, να μειώσει την τρωτότητα της κοινότητας και να είναι έτοιμη να ανταποκριθεί σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει αυξανόμενη τρωτότητα της κοινωνίας, της οικονομίας και των οικοσυστημάτων μας. Αυτή η κοινωνικο-οικονομική-οικολογική τρωτότητα στους κινδύνους πρόκειται, πιθανότατα, να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια, κυρίως λόγω των συνεχιζόμενων κοινωνικο-οικονομικών εξελίξεων που περιλαμβάνουν την παγκοσμιοποίηση, την φτώχεια, την αύξηση του πληθυσμού, την αστικοποίηση, την υποβάθμιση του περιβάλλοντος και άλλων παραγόντων, όπως η κλιματική αλλαγή (EEA, 2010)

Κίνδυνος, Τρωτότητα και Διακινδύνευση για την πλημμύρα:

- Πλημμυρικός κίνδυνος (Flood Hazard): νοείται η συνολική πιθανότητα εκδήλωσης ενός καταστροφικού γεγονότος λόγω πλημμύρας σε μια συγκεκριμένη περιοχή.

- Τρωτότητα (Vulnerability): νοείται ο βαθμός επιδεκτικότητας ή αλλιώς το πόσο ευάλωτο είναι ένα σύστημα του φυσικού ή ανθρωπογενούς περιβάλλοντος στην πλημμύρα
- Πλημμυρική Διακινδύνευση (ή επικινδυνότητα) (Flood Risk): ο συνδυασμός της πιθανότητας να λάβει χώρα πλημμύρα και των δυνητικών αρνητικών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται με αυτή την πιθανότητα, σε μια συγκεκριμένη περιοχή.

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση και την Οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και την διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας:

«Οι πλημμύρες μπορεί να προκαλέσουν θανάτους, μετακινήσεις πληθυσμών και ζημίες στο περιβάλλον, να θέσουν σοβαρά σε κίνδυνο την οικονομική ανάπτυξη και να υπονομεύσουν τις οικονομικές δραστηριότητες της Κοινότητας.»

«Οι πλημμύρες είναι φυσικά φαινόμενα τα οποία είναι αδύνατο να προληφθούν. Ωστόσο, ορισμένες ανθρώπινες δραστηριότητες (όπως η αύξηση των ανθρωπίνων οικισμών και περιουσιακών στοιχείων στις πλημμυρικές περιοχές καθώς και η μείωση της φυσικής ικανότητας του εδάφους όσον αφορά την κατακράτηση υδάτων κατά τη χρήση γης) και η αλλαγή του κλίματος συμβάλλουν στην αύξηση της πιθανότητας επέλευσης φαινομένων πλημμύρας και των αρνητικών τους επιπτώσεων.»

«Είναι σκόπιμο και επιθυμητό να μειωθεί ο κίνδυνος των αρνητικών συνεπειών που συνδέονται με τις πλημμύρες, ιδίως στην ανθρώπινη υγεία και ζωή, στο περιβάλλον, στην πολιτιστική κληρονομιά, στην οικονομική δραστηριότητα και στις υποδομές. Εντούτοις, τα μέτρα για τη μείωση αυτών των κινδύνων θα πρέπει, κατά το μέτρο του δυνατού, να συντονίζονται σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού για να είναι αποτελεσματικά.»

2.2 Η κοινοτική Οδηγία 2007/60/ΕΚ

Οι διαπιστώσεις και οι συνέπειες των πλημμυρικών φαινομένων οδήγησαν στην έκδοση από την Ευρωπαϊκή Ένωση και το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της 23ης Οκτωβρίου 2007 της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ που αναφέρεται σε όλους τους τύπους πλημμυρών (ποταμών, στιγμιαίων-flash flood, σε αστικά κέντρα και σε παράκτιες περιοχές στις πλημμύρες από τη θάλασσα) και καθορίζει ότι τα κράτη θα πρέπει να αντιμετωπίσουν το θέμα των πλημμυρών με την μεθοδολογία της εκτίμησης και της διαχείρισης της πλημμυρικής διακινδύνευσης. Η οδηγία τέθηκε σε ισχύ στις 26 Νοεμβρίου 2007.

Η οδηγία αποτελεί συμπλήρωμα της οδηγίας 2000/60/ΕΚ (Water Framework Dirctive-WFD) που θεσπίζει το πλαίσιο της κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων και επιβάλλει την ανάπτυξη ολοκληρωμένων σχεδίων για την διαχείριση των υδατικών πόρων σε επίπεδο λεκάνης απορροής κάθε ποταμού, ώστε να επιτυγχάνεται η καλή οικολογική και χημική κατάσταση και επιδιώκει επίσης να αμβλύνει τις επιπτώσεις από τις πλημμύρες. Με το άρθρο 3 η Οδηγία 2007/60/ΕΚ υιοθετεί την ίδια προσέγγιση του άρθρου 3 της WFD ιδίως σε ότι αφορά στη μονάδα διαχείρισης που είναι η λεκάνη απορροής ποταμού και την ίδια αρμόδια αρχή. Επιπλέον των λεκανών και υπολεκανών απορροής όλα τα τμήματα της ακτής θεωρούνται τμήματα των περιοχών της λεκάνης απορροής ποταμού.

Ο βασικός στόχος της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ, που ενσωματώθηκε στο Εθνικό Δίκαιο με την Η.Π. 31822/1542/Ε103 (ΦΕΚ Β 1108/21-07-2010), είναι η πρόληψη, περιορισμός και αντιμετώπιση των πλημμυρών και των επιπτώσεών τους στα Κράτη Μέλη της Ε.Ε.. Με την Οδηγία θεσμοθετείται ένα κοινό ευρωπαϊκό πλαίσιο για τον προσδιορισμό και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, διαδικασία που όπως προαναφέρθηκε βρίσκεται σε άμεση συσχέτιση με την Οδηγία Πλαίσιο (2000/60/ΕΚ) για τα Νερά.

Σύμφωνα με το Άρθρο 7 της Οδηγίας, τα Κράτη Μέλη πρέπει να εκπονήσουν Σχέδια Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας (ΣΔΚΠ) για όλες τις περιοχές για τις οποίες διαπιστώνεται σοβαρός δυνητικά κίνδυνος για πλημμύρες (potentially significant flood risk) σύμφωνα με το Άρθρο 5 ή το Άρθρο 13.1.(α) καθώς και τις περιοχές που εντάσσονται στο Άρθρο 13.1.(β), με βάση τους χάρτες που θα συνταχθούν σύμφωνα με το Άρθρο 6.

Η νέα αυτή Οδηγία προβλέπει την εκπόνηση ενός μεσοπρόθεσμου και μακροπρόθεσμου σχεδίου για την διαχείριση των κινδύνων από τις πλημμύρες, το οποίο υλοποιείται σε τρία στάδια, που περιλαμβάνουν αντίστοιχα

(1) προκαταρκτική εκτίμηση των κινδύνων πλημμύρας,

(2) σύνταξη χαρτών επικινδυνότητας και κινδύνων πλημμύρας και

(3) κατάρτιση Σχεδίων Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας (ΣΔΚΠ).

Από την παραπάνω ανάλυση γίνεται σαφές ότι η Οδηγία εισάγει μια προσέγγιση βασισμένη στην εκτίμηση του κινδύνου (risk oriented), με αποτέλεσμα η 'παραδοσιακή - συμβατική' προσέγγιση της 'προστασίας - πρόληψης' που είχε μέχρι σήμερα εφαρμογή για την αντιμετώπιση των πλημμυρών να χρήζει αναθεώρησης - αναπροσαρμογής. Ο όρος 'διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου' που εισάγεται με την Οδηγία, περιλαμβάνει μεν την 'προστασία' και την 'πρόληψη', αλλά επεκτείνεται περαιτέρω. Συγκεκριμένα, εκτός από τα μέτρα αντιπλημμυρικής προστασίας και περιορισμού της πιθανότητας κατάκλυσης περιοχών, έμφαση δίνεται κυρίως στον περιορισμό των δυνητικών κινδύνων, επιπτώσεων και ζημιών, μέσω μιας κυκλικής διαδικασίας που παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα και αποτελείται από την παρακάτω αλληλουχία:

- Πρόληψη πλημμύρας
- Ετοιμότητα - επαγρύπνηση
- Προστασία
- Δράσεις στη περίπτωση πλημμυρικού γεγονότος (disaster management)
- Ανάλυση του πλημμυρικού γεγονότος και μετέπειτα φροντίδα
- Πρόληψη πλημμύρας…κ.ο.κ.

Πρόληψη: η πρόληψη των ζημιών που προκαλούνται από τις πλημμύρες συνίσταται στην αποφυγή ανέγερσης κατοικιών και βιομηχανιών σε περιοχές ευαίσθητες στην εμφάνιση πλημμύρας, προσαρμόζοντας τις μελλοντικές εξελίξεις στον κίνδυνο πλημμυρών και προωθώντας την ορθή χρήση του εδάφους και τις ορθές γεωργικές και δασοπονικές πρακτικές.

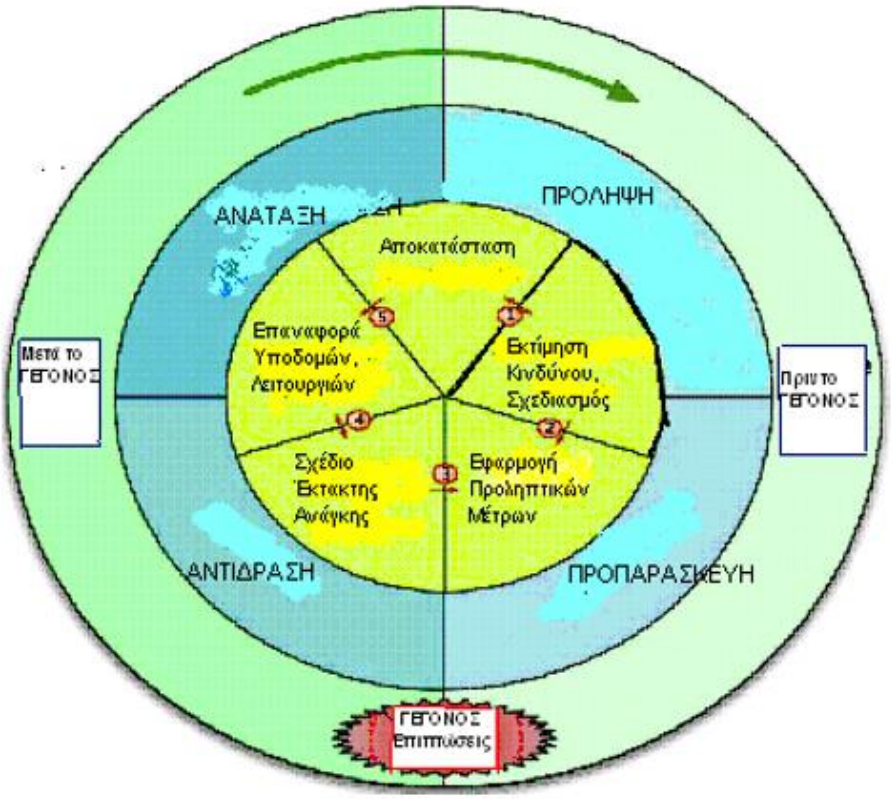
Ετοιμότητα: η ενημέρωση του πληθυσμού για τους κινδύνους πλημμυρών και για τον τρόπο αντίδρασης σε περίπτωση πλημμύρας.

Προστασία: η λήψη μέτρων, διαρθρωτικών και μη, για να μειωθεί η πιθανότητα πλημμύρας και ή οι επιπτώσεις τους σε συγκεκριμένες περιοχές.

Αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης: η κατάρτιση σχεδίων για την αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση πλημμύρας.

Αποκατάσταση και εξαγωγή συμπερασμάτων: η επιστροφή σε κανονικές συνθήκες το ταχύτερο δυνατόν και η μείωση τόσο των κοινωνικών όσο και των οικονομικών επιπτώσεων στον πληγέντα πληθυσμό (CEC, 2004).

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η εξέλιξη και βελτίωση των μέτρων πρόληψης, προστασίας και ετοιμότητας με βάση τις προτεραιότητες που θεσπίζονται, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της διαχείρισης του πλημμυρικού κινδύνου και των αποτελεσμάτων. Για παράδειγμα αναλύοντας ένα πλημμυρικό γεγονός μπορεί να βελτιωθεί ο τρόπος που διαχειρίζονται οι πλημμύρες. Το σύνολο των παραδοσιακά εφαρμοζόμενων μέτρων, δράσεων και στρατηγικών για την προστασία από τις πλημμύρες, όπως τα αντιπλημμυρικά έργα, η διαχείριση των λεκανών κατάκλυσης - πλημμυρικών πεδίων (χωροταξικός σχεδιασμός - χρήσεις Γης - φυσική κατακράτηση των υδάτων) και τα μέτρα πρόληψης (προληπτικά δομικά μέτρα, μέτρα που λαμβάνουν οι ΟΤΑ και οι κάτοικοι στα πλαίσια της προστασίας από τις πλημμύρες π.χ. ασφάλιση), εντάσσονται πλέον στην 'ολοκληρωμένη διαχείριση' του πλημμυρικού κινδύνου και το Σχέδιο Διαχείρισης.



Σχήμα 4: Ένταξη του Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνων στην ολοκληρωμένη διαχείριση Πλημμυρικών Γεγονότων. Πηγή: WL Delft Hydraulics, Φεβρουάριος 2007.

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4:

- Οι προβλέψεις του φυσικού σχεδιασμού (π.χ. Χωροταξικά Σχέδια, ΣΓΠ, κλπ.), ως συνάρτηση του Πλημμυρικού Κινδύνου, έχουν άμεση αλληλεξάρτηση με το Σχέδιο Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας
- τα προληπτικά Μέτρα αποτελούν τη βάση του Σχεδίου Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας
- η εμπειρία από τον Σχεδιασμό Έκτακτης Ανάγκης που εφαρμόστηκαν σε προηγούμενες πλημμύρες εντάσσονται στη διαδικασία διαμόρφωσης-αναθεώρησης των Προληπτικών Μέτρων
- η αποκατάσταση των υποδομών και επαναφορά των λειτουργιών εντάσσεται στο Σχέδιο Έκτακτης Ανάγκης
- μετά την αρχική επαναφορά των πλέον κρίσιμων λειτουργιών, η Αποκατάσταση στοχεύει στην εγκαθίδρυση και ενδεχομένως βελτίωση - συμπλήρωση των υποδομών και λειτουργιών, ώστε να έχουν βελτιωμένη συμπεριφορά στις πλημμύρες.

Η μεγαλύτερη αλλαγή στην προσέγγιση της Οδηγίας σε σχέση με τη μέχρι σήμερα κυρίαρχη αντίληψη στη διαχείριση των πλημμυρών είναι ότι η οικολογική κατάσταση θα αποτελέσει το κλειδί στον καθορισμό της καλής ποιότητας των επιφανειακών, κυρίως, υδάτων, αντίθετα με την παραδοσιακή αντιμετώπιση η οποία βασιζόταν στην επίτευξη καλής χημικής ποιότητας. Στη συνέχεια, γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση των δράσεων της ΟΚΠ ανά φάση.

ΦΑΣΗ 1: Δραστηριότητες που θα έπρεπε να έχουν ολοκληρωθεί μέχρι τέλος του 2011. Για τα Κράτη Μέλη θα πρέπει να έχει ολοκληρωθεί η προκαταρκτική εκτίμηση των κινδύνων πλημμύρας για τις λεκάνες απορροής ποταμών και τις αντίστοιχες παράκτιες περιοχές ώστε να προσδιοριστούν οι περιοχές με δυνητικά σοβαρό κίνδυνο πλημμύρας.

ΦΑΣΗ 2: Δραστηριότητες που θα έπρεπε να έχουν ολοκληρωθεί μέχρι τέλους του 2013. Για τις περιοχές, οι οποίες με βάση την προκαταρκτική αξιολόγηση κινδυνεύουν από πλημμύρες, πρέπει να έχουν συνταχθεί χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας και χάρτες κινδύνων πλημμύρας. Οι χάρτες αυτοί θα προσδιορίζουν τις περιοχές με μέτρια (συχνότητα τουλάχιστον 1 φορά κάθε 100 χρόνια) χαμηλή ή υψηλή επικινδυνότητα ως προς τις πλημμύρες. Στους χάρτες θα αποτυπώνονται τα εκτιμώμενα βάθη κατάκλυσης από τα νερά και οι αρνητικές συνέπειες (στο πληθυσμό,

την οικονομία και τις υποδομές, τη πολιτιστική κληρονομιά, το φυσικό περιβάλλον, κλπ.).

ΦΑΣΗ 3: Δραστηριότητες που θα έπρεπε να έχουν ολοκληρωθεί μέχρι τέλους του 2015. Για τις περιοχές που βρίσκονται σε κίνδυνο, πρέπει να καταρτισθούν Σχέδια Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας (ΣΔΚΠ). Τα ΣΔΚΠ πρέπει να περιλαμβάνουν μέτρα για τη μείωση της πιθανότητας πλημμύρας και τον περιορισμό των πιθανών της επιπτώσεων. Τα σχέδια θα καλύπτουν όλες τις φάσεις ενός κύκλου διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας, αλλά θα εστιάζονται κυρίως στην πρόληψη (όπως πρόληψη των ζημιών από πλημμύρες, με την αποφυγή κατασκευής οικιών και βιομηχανιών σε περιοχές που απειλούνται σήμερα ή που θα απειληθούν στο μέλλον από πλημμύρες ή/και προσαρμογή των χρήσεων γης και του αναπτυξιακού χωροταξικού σχεδιασμού στους κινδύνους πλημμύρας), την προστασία (με την λήψη μέτρων μείωσης της πιθανότητας πλημμυρών ή/και περιορισμού των επιπτώσεων των πλημμυρών σε συγκεκριμένες τοποθεσίες όπως π.χ. με αποκατάσταση κατακλυσμένων περιοχών και υγροτόπων) και την ετοιμότητα (π.χ. μέσω της παροχής οδηγιών στο κοινό σχετικά με το τι πρέπει να κάνει σε περίπτωση πλημμύρας).

Οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας διαχωρίζονται σύμφωνα με τα ακόλουθα πλημμυρικά σενάρια σε (παρ. 3):

- Χαμηλής πιθανότητας ή σενάρια ακραίων φαινομένων
- Μέσης πιθανότητας (με πιθανή περίοδο επαναληπτικότητας ≥ 100 χρόνια)
- Υψηλής πιθανότητας

Για κάθε σενάριο παρουσιάζονται τα εξής υδραυλικά χαρακτηριστικά:

- η έκταση της πλημμύρας
- το βάθος του νερού
- η ταχύτητα ροής του νερού.

Στους χάρτες κινδύνου πλημμύρας περιγράφονται οι δυνητικές αρνητικές συνέπειες που προκαλούνται από το πιθανό πλημμυρικό φαινόμενο εξετάζοντας:

- τον πιθανό αριθμό κατοίκων που ενδέχεται να πληγούν
- τον τύπο της οικονομικής δραστηριότητας στην περιοχή

- εγκαταστάσεις που πιθανολογείται ότι μπορεί να αποτελέσουν πηγή ρύπανσης σε ενδεχόμενη πλημμύρα καθώς και προστατευόμενες περιοχές που ενδέχεται να πληγούν
- άλλες πληροφορίες που το κράτος μέλος θεωρεί χρήσιμες, όπως η επισήμανση των περιοχών όπου υπάρχει το ενδεχόμενο πλημμυρών με αυξημένο ποσοστό μεταφερόμενων ιζημάτων και πλημμυρών που παρασύρουν υπολείμματα και πληροφορίες για πιθανές άλλες σημαντικές πηγές ρύπανσης.

Τα τρία αυτά στάδια θα πρέπει να επαναλαμβάνονται σε εξαετείς κύκλους, ώστε να εξασφαλιστεί η συνεκτίμηση των μακροπρόθεσμων εξελίξεων. Στις περιπτώσεις διεθνών λεκανών απορροής ποταμών, για τα στάδια αυτά πρέπει να υπάρξει συντονισμός μεταξύ των εμπλεκόμενων χωρών για να μην μετατεθούν τα προβλήματα από τη μια περιοχή στην άλλη. Τέλος, θα πρέπει να εξασφαλιστεί η ενεργός συμμετοχή όλων των ενδιαφερόμενων μερών στην κατάρτιση και επικαιροποίηση των σχεδίων διαχείρισης κινδύνου πλημμυρών και τα σχέδια, οι εκτιμήσεις και οι χάρτες κινδύνου θα πρέπει να δημοσιοποιούνται.

2.3 Πρόοδος εφαρμογής της Οδηγίας στην Ελλάδα

Η κοινοτική Οδηγία 2007/60/ΕΚ ενσωματώθηκε στο Εθνικό Δίκαιο με την έκδοση της Κοινής Υπουργικής Απόφασης 31822/1542/Ε103/20-7-2010(ΦΕΚ 1108/Β/21-07-2010) για την «Αξιολόγηση και Διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας».

Υπάρχει ήδη σημαντική καθυστέρηση στην υλοποίηση των δράσεων της ΟΚΠ στην Ελλάδα. Συγκεκριμένα, έχουν γίνει μέχρι σήμερα αποσπασματικές ενέργειες κυρίως για την προστασία από τις πλημμύρες με την κατασκευή αντιπλημμυρικών έργων στις πλέον ευαίσθητες περιοχές, χωρίς όμως αυτά να εντάσσονται σε ένα ολοκληρωμένο σχέδιο βάση του προσδιορισμού των κινδύνων και να συμπληρώνονται από πρόσθετα μέτρα και δράσεις.

Με βάση τα συμπεράσματα ημερίδας του ΤΕΕ, 2007:

- Οι λεκάνες απορροής των Ελληνικών ποταμών είναι διαφορετικές από αυτές των ποταμών της Κ.Ευρώπης ως προς την έκταση τους με αποτέλεσμα τα πλημμυρικά φαινόμενα να έιναι ταχείας απόκρισης και να υπάρχει μικρό χρονικό περιθώριο αντίδρασης σε επίπεδο πολιτικής προστασίας.

- Οι λεκάνες απορροής των μεγάλων ποταμών της χώρας Αξιός, Στρυμώνας, Νέστος, Έβρος ανήκουν στην κατηγορία των διακρατικών και πρέπει να επιτευχθούν διμερείς ή πολυμερείς συμφωνίες ή να αναθεωρηθούν οι υπάρχουσες (όπως η συμφωνία του Νέστου) για την διαχείριση των λεκανών σύμφωνα με τα νέα δεδομένα των Οδηγιών 2000/60/ΕΚ και 2007/60/ΕΚ.
- Η αλλαγή της χρήσης γης (αστικοποίηση, πυρκαγιές, μείωση δασικών εκτάσεων) που έχει επέλθει σε πολλές περιοχές και που επηρεάζει καθοριστικά και προκαλεί την μείωση του χρόνου συγκέντρωσης (συρροής) των νερών και την αύξηση του συντελεστή απορροής επιβάλλει την επικαιροποίηση των παλαιών μελετών.
- Τα έργα που θα υλοποιούνται είναι τις περισσότερες φορές αποσπασματικά, ελλιπή ή και ανεπαρκή και δεν εντάσσονται σε έναν ευρύτερο στρατηγικό σχεδιασμό.
- Υπάρχει σημαντική έλλειψη υδρολογικών και υδραυλικών δεδομένων για να εκπονηθούν υδρολογικές μελέτες με την χρήση νεώτερων μεθόδων υπολογισμού που δεν στηρίζονται σε εμπειρικές μεθόδους υπολογισμού. (ΤΕΕ, 2007)

Αξιολόγηση - επισήμανση κύριων αδυναμιών - Προτάσεις αντιμετώπισης:

Οι κύριες αδυναμίες, που κατά εντοπίζονται στις μέχρι σήμερα διαδικασίες εφαρμογής, είναι: (Καραμολέγκος, 2012)

1. Οι σημαντικές ελλείψεις σε πρωτογενή στοιχεία και πληροφορίες, π.χ. στοιχεία πλημμυρών (χρονική εξέλιξη, έκταση κατάκλυσης, ζημίες, κλπ.), υδρολογικά στοιχεία, καταγραφή στάθμης – παροχής στους ποταμούς και στάθμης κατάκλυσης, ψηφιακά μοντέλα εδάφους, κλπ., η διασπορά των στοιχείων σε μεγάλο αριθμό φορέων, καθώς και η μη συστηματική καταγραφή και αξιολόγησή τους. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο λόγω της ελλιπούς συνεργασίας με τη Βουλγαρία και την Τουρκία, όσον αφορά την παροχή κρίσιμων πληροφοριών. Αποτέλεσμα είναι η αδυναμία διεξαγωγής αξιόπιστης ανάλυσης με προφανείς επιπτώσεις στην φερεγγυότητα των αποτελεσμάτων-συμπερασμάτων.

2. Η έλλειψη ενιαίου συντονισμού και καθοδήγησης για τον προγραμματισμό των ενεργειών και την αντιμετώπιση των συνεπειών από τις πλημμύρες, τόσο στην Ελλάδα αλλά κυρίως με τις γειτονικές χώρες.

3. Η ελλιπής στελέχωση και κατάρτιση των αρμόδιων φορέων.
4. Η μέχρι σήμερα ελλιπής χρηματοδότηση εκπόνησης των προβλεπόμενων από την οδηγία μελετών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών και Υδρολογική Ανάλυση

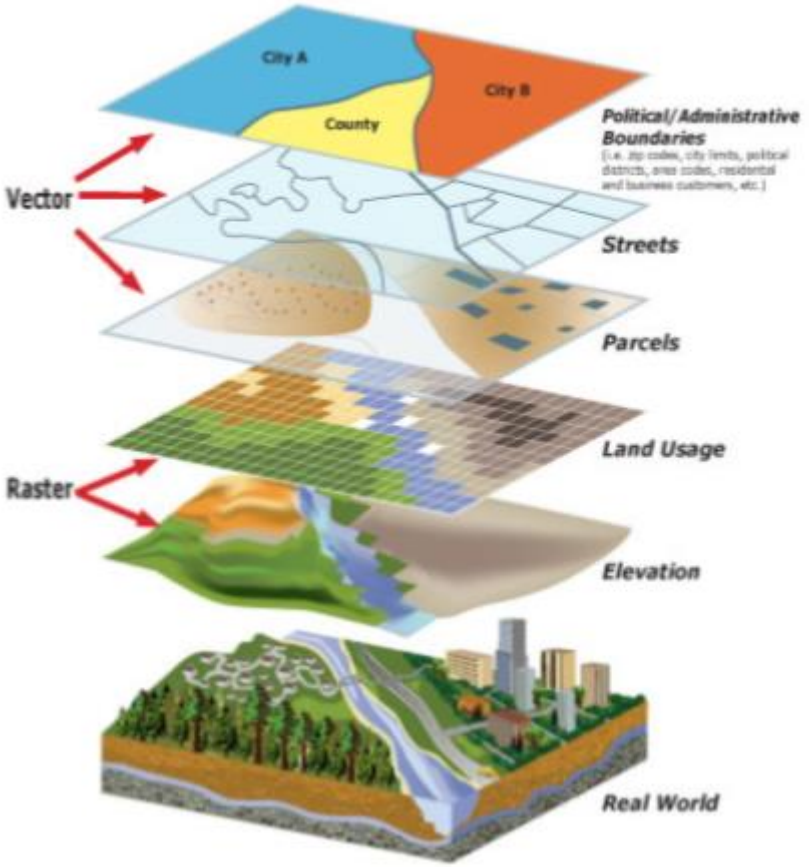
3.1 Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών

Σε πολλές περιπτώσεις οι μεθοδολογίες εκτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου που παρουσιάσθηκαν υποστηρίζονται από τις εξαιρετικές δυνατότητες των υπολογιστών και των εργαλείων λογισμικού της οικογένειας των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS). Πολλές από τις εφαρμογές που έχουν αναπτυχθεί για τη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου απαιτούν ως προϋπόθεση για τη λειτουργία τους τη χρήση λογισμικού GIS ως υποβάθρου.

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών είναι συστήματα διαχείρισης χωρικών δεδομένων (spatial data) και συσχετισμένων ιδιοτήτων. Αποτελούνται από τρία βασικά μέρη: την βάση δεδομένων, την χωρική πληροφορία (χάρτη) και ένα σύστημα επικοινωνίας των δύο μερών και περιλαμβάνουν τα απαραίτητα μέσα έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, το σύστημα Σ.Γ.Π. και τον χρήστη (Clarke, 2001). Τα ΓΣΠ είναι ένα ισχυρό σύστημα εργαλείων που επιτρέπει στο χρήστη να αποθηκεύση, να ανακαλεί, να μετασχηματίζει και να αποτυπώνει τα χωρικά δεδομένα από τον πραγματικό κόσμο για συγκεκριμένο σκοπό (Burrough, 1986).

Κατά καιρούς έχουν δοθεί διάφοροι ορισμοί για τα Σ.Γ.Π. όπως «Ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής, αποθήκευσης, διαχείρισης, ανάλυσης και απόδοσης πληροφορίας που αναφέρεται σε φαινόμενα που εξελίσσονται στο γεωγραφικό χώρο» (Goodchild, 1985). Σύμφωνα με τον Βαϊόπουλο (1997), πρόκειται για ένα δυναμικό σύστημα πληροφορίας υψηλής ποιότητας, χρησιμοποιώντας την εξελιγμένη τεχνολογία της πληροφορικής. Ένας άλλος ορισμός σύμφωνα με τον Κωστή Κουτσόπουλο είναι: «Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών είναι μια οργανωμένη συλλογή μηχανικών υπολογιστικών μηχανημάτων (hardware), λογισμικών συστημάτων (software), χωρικών δεδομένων

και ανθρώπινου δυναμικού, με σκοπό τη συλλογή, καταχώρηση, ενημέρωση, διαχείριση, ανάλυση και απόδοση, κάθε μορφής πληροφορίας που αφορά στο γεωγραφικό περιβάλλον» (Κουτσόπουλος, 2002).



Εικόνα 1: Επίπεδα πληροφορίας ΣΓΠ (πηγή : http://www.srh.noaa.gov/bmx?n=gis)

Οι κύριες αιτίες οι οποίες ώθησαν την τεχνολογία των ΣΓΠ στα μεγάλα άλματα της τελευταίας εικοσιπενταετίας ήταν οι εξής:

- η ραγδαία ανάπτυξη της πληροφορικής και το διαρκώς μειούμενο κόστος των αντίστοιχων μηχανημάτων και προγραμμάτων
- η βελτίωση των μεθόδων ανάλυσης, ερμηνείας και πρόβλεψης των συνθηκών του γήινου περιβάλλοντος
- η αυξανόμενη ανησυχία για την περιβαλλοντική υποβάθμιση σε τοπική, εθνική και υπερεθνική κλίμακα,
- η αδυναμία επεξεργασίας με παραδοσιακούς τρόπους του τεράστιου αριθμού στοιχείων τα οποία απαιτούνται για τη μελέτη των φυσικών αλλά

και κοινωνικοοικονομικών μεγεθών των σύγχρονων πολύπλοκων προβλημάτων ανάπτυξης (Μανιάτης,1993).

Τα χωρικά δεδομένα μπορούν να αναπαρίστανται με δύο βαικές δομές: την διανυσματική (vector) και την ψηφιδωτή (raster) δομή. Τα χαρακτηριστικά των δύο δομών δεδομένων των ΣΓΠ είναι:

- τα διανυσματικά δεδομένα (vector data), όλα τα χωρικά δεδομένα μπορεί να αναπαρασταθούν με σημεία (π.χ. ένα βροχόμετρο), με γραμμές (π.χ. ένα ποτάμι) ή με πολύγωνα (π.χ. μια υδρολογική λεκάνη). Τα διανυσματικά δεδομένα έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν την τοπολογία των δεδομένων που περιλαμβάνει τις χωρικές σχέσεις μεταξύ σημείων, γραμμών και πολυγώνων,
- τα ψηφιδωτά (raster data) περιγράφουν χωρικά συνεχή πληροφορία σε καναβικό αρχείο με σταθερό μέγεθος ψηφίδας (π.χ. το υψόμετρο του εδάφους).

Στην παρούσα υδρολογική ανάλυση πέρα από το hardware και το software που αναφέρθηκαν προηγούμενα στον ορισμό των ΣΓΠ, στα χωρικά δεδομένα της υδρολογικής ανάλυσης κύριο λόγο έχει το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και το δίκτυο των υδατορεμάτων της λεκάνης απορροής μελέτης. Η ανάλυση έχει αφετηρία το μοντέλο εδάφους από το οποίο εξάγονται δεδομένα με τα οποία πραγματοποιείται ο υπολογισμός της πλημμυρικής απορροής.

3.2 Υδρολογική Ανάλυση (Συσσόρευση, Βλάστηση, Απορροή, Ταχύτητα Ροής κλπ.)

Αντικείμενο της υδρολογικής ανάλυσης αποτελεί κυρίως ο υπολογισμός της πλημμυρικής απορροής. Όταν ο υπολογισμός πραγματοποιείται για κάποιο σύντομο χρονικό διάστημα αφορά κυρίως απορροή σχεδιασμού τεχνικών έργων εκτόνωσης αυτής, ενώ στην περίπτωση μελέτης μεγάλης χρονικής διάρκειας αυτή αφορά την διαχείριση, τη συλλογή ή τον προσδιορισμό του υδατικού ισοζυγίου της υπό μελέτη λεκάνης. Ανά περίπτωση ο μελετητής-ερευνητής θα συλλέξει τα αντίστοιχα αναγκαία δεδομένα. Βασικό στοιχείο στον υπολογισμό της πλημμυρικής απορροής αποτελεί ο

προσδιορισμός του χρόνου συγκέντρωσης, ο οποίος θεωρείται ο χρόνος που απαιτεί η πιο απομακρυσμένη ποσότητα υδάτων να καταλήξει στο προσδιορισμένο σημείο ελέγχου, μελέτης ή μετρήσεων παροχής. Όταν όλα τα σημεία της λεκάνης έχουν συνεισφέρει το περίσσευμα της βροχόπτωσης η οποία γίνεται απορροή, τότε το υδρογράφημα βρίσκεται στο ψηλότερο σημείο και η απορροή στη μέγιστη τιμή της για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Βασική παραδοχή στην περίπτωση αυτή είναι ότι η ένταση της βροχόπτωσης παραμένει σταθερή αποδίδοντας ανάλογο χρόνο συγκέντρωσης. Ο συνήθης τρόπος για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης είναι η κατηγοριοποίηση των εδαφών ανά κλίση σε επίπεδα τμήματα της λεκάνης απορροής όπου αυτά βρίσκονται κοντά στον υδροκρίτη ή σε κεκλιμένα τμήματα αποδίδοντας σε κάθε περίπτωση ταχύτητες ροής και ειδικά στα κεκλιμένα ανάλογα του μεγέθους της διατομής του υδατορέματος που τα διατρέχει. Εκτός όμως της κλίσης, την ταχύτητα ροής σε μία λεκάνη απορροής επηρεάζει η ύπαρξη βλάστησης ή όχι, το είδος της και η κατάσταση στην οποία βρίσκεται (δυναμικότητα εξατμισοδιαπνοής), εάν είναι δηλαδή σε πλήρη ανάπτυξη (καλοκαιρινή περίοδος) ή σε καταστολή (χειμώνας). Κάτω από την βλάστηση το έδαφος ανάλογα με τη σύστασή του ή την ήδη υφιστάμενη υγρασία του θα επιτρέψει ή όχι την είσοδο τμήματος της βροχόπτωσης σε αυτό. Όταν η ροή ξεκινήσει έχοντας κατακρατηθεί τμήμα της βροχόπτωσης από την εξάτμιση, τη διαπνοή, την υπεδάφια καθίσδυση, ζητούμενο για τον προσδιορισμό της ταχύτητας ροής αποτελεί το είδος του εδάφους όπου η ροή θα πραγματοποιηθεί και οι τριβές που αυτό θα αποδώσει στο νερό. Επιπλέον βασικό στοιχείο της ταχύτητας ροής αποτελεί η ποσότητα του πλεονάσματος του νερού που ρέει, ποσότητα η οποία εξαρτάται κυρίως από την ένταση της βροχόπτωσης. Όλα τα παραπάνω στοιχεία - δεδομένα που περιληπτικά και ενδεικτικά περιγράφουν τη δυναμική της συσχέτισης βροχής - απορροής, η ανάπτυξη των ΣΓΠ μπορεί να τα συμπεριλάβει στην εκπόνηση των υπολογισμών.

3.3 Υδρολογική Ανάλυση της Ελληνικής Τεχνικής Νομοθεσίας και Προδιαγραφών

Κατά την υδρολογική ανάλυση γίνεται μία προσπάθεια από τον μελετητή να υπολογιστεί η πλημμυρική παροχή σχεδιασμού με δεδομένα εισόδου τα γεωμορφολογικά στοιχεία της λεκάνης απορροής και τα αντίστοιχα μετεωρολογικά δεδομένα που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή ως παρατηρήσεις, ως στατιστικώς εξαγόμενες εξισώσεις (όμβριες καμπύλες) ή ως εμπειρικά προσδιορισμένους τελεστές που εκφράζουν - προσομοιάζουν τη χρονική αλληλουχία της απορροής (υδρογραφήματα). Τα υδρολογικά μοντέλα προσπαθούν να μαθηματικοποιήσουν τις φυσικές διεργασίες και τους μηχανισμούς του υδρολογικού κύκλου έτσι ώστε να προσδιοριστεί η πλημμυρική απορροή. Κατά τη διαδικασία αυτή επειδή η δυναμική του υδρολογικού κύκλου είναι πολύ σύνθετη γίνονται παραδοχές οι οποίες γενικεύουν τις υδρολογικές διαδικασίες και απλοποιούν τους υπολογισμούς. Οι παραδοχές συνήθως είναι αντιστρόφως ανάλογες των δεδομένων που υπάρχουν σε μια λεκάνη απορροής προς μελέτη καθώς όσο περισσότερα δεδομένα υπάρχουν τόσο λιγότερες παραδοχές πρέπει να γίνουν για να εκφραστεί ποσοτικά η υδρολογική συμπεριφορά της περιοχής μελέτης.

Μέχρι σήμερα η εύρεση των δεδομένων αποτελεί πρόβλημα για τους μελετητές, καθώς αποτελεί εμπόρευμα το οποίο εκποιούν δημόσιοι οργανισμοί. Αντίστοιχο πρόβλημα αποτελούσε η διαχείριση της γεωγραφικό - υδρολογικής πληροφορίας καθώς τα συστήματα υπολογισμού αλλά και το αντίστοιχο λογισμικό ήταν στην κατοχή μόνο των τεχνικών υπηρεσιών των προαναφερόμενων δημόσιων οργανισμών. Υπάρχουν όμως σήμερα τεχνολογίες οι οποίες ανοίγουν νέους δρόμους στην απόκτηση της γεωγραφικό - υδρολογικής πληροφορίας που έχουν να κάνουν κυρίως με την ανάπτυξη του διαδικτύου και συγκεκριμένα του ιστοτόπου GOOGLE EARTH, ο οποίος έχει δείξει τον δρόμο στην ελεύθερη διαχείριση της γεωγραφικής πληροφορίας. Αντίστοιχα πολλά ερευνητικά ιδρύματα που οργανώνουν την υποδομή τους και σχεδιάζουν το μέλλον παρέχουν τη δυνατότητα απόκτησης της υδρολογικής πληροφορίας και των εργαλείων ανάλυσής της. Στην Ελλάδα το πρόγραμμα του Υδρογνώμονα και της ΕΤΥΜΠ, που αναπτύχθηκε από το ΕΜΠ και το ΥΠΕΧΩΔΕ, αποτελεί το πλέον χαρακτηριστικό παράδειγμα της προσπάθειας αυτής. Στην Ευρώπη χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το ελεύθερο λογισμικό του ITC ILWIS και αντίστοιχα στις ΗΠΑ.

Η προηγούμενη περιγραφή αποτελεί τη σημερινή τάση στην υδρολογική ανάλυση και στη διαχείριση δεδομένων. Στην τεχνική όμως νομοθεσία της χώρας μας η υδρολογική ανάλυση έχει παραμείνει στον Νόμο 696 του 1974. Σήμερα και ενώ σύμφωνα με την ευρωπαϊκή οδηγία προωθούνται προς εκπόνηση οι απαραίτητες μελέτες διαχείρισης του πλημμυρικού κινδύνου οι προδιαγραφές εκπόνησης μελετών είναι αυτές του 1974. Παρατίθεται απόσπασμα της Διακήρυξης της μελέτης για την λεκάνη απορροής του ποταμού Έβρου (Εικόνα 2).

1. Γενικά

1.1. Το έργο θα εκπονηθεί σε 3 Στάδια. Το περιεχόμενο των επί μέρους σταδίων του έργου περιγράφεται αναλυτικά στο παρόν Τεύχος.

1.2. Το έργο θα εκπονηθεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζονται στο παρόν Τεύχος. Θα ληφθούν επίσης υπόψη τα προβλεπόμενα στο Π.Δ. 696/74 που αφορούν σε θέματα που εξετάζονται στο έργο, και τα οποία είναι δυνατόν να συμπληρωθούν ή να βελτιωθούν ύστερα από πρόταση του αναδόχου και έγκριση της Υπηρεσίας.

1.3. Για την εκπόνηση του έργου θα ληφθούν υπόψη η Κοινοτική Οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, όπως αυτή ενσωματώθηκε στο Εθνικό δίκαιο (ΚΥΑ Η.Π 31822/1542/Ε103 ΦΕΚ Β 1108/21.07.2010), η Κοινοτική Οδηγία πλαίσιο 2000/60 και το σύνολο του θεσμικού κοινοτικού πλαισίου που αφορά στα νερά, ο Ν. 3199/2003 «για την Προστασία και διαχείριση των υδάτων» και οι σχετικές κανονιστικές διατάξεις που εκδόθηκαν ή/και θα εκδοθούν σε εφαρμογή του κατά τη διάρκεια υλοποίησης του έργου.

Εικόνα 2: Τμήμα Προδιαγραφής Μελέτης Κατάρτισης Χάρτη Πλημμυρικού κινδύνου

Στην Ελληνική Τεχνική Νομοθεσία χαρακτηριστικό παράδειγμα υδρολογικών παραδοχών αποτελεί ο τύπος του FULLER, ο οποίος προβλέπεται από την Τεχνική Νομοθεσία για τον υπολογισμό της παροχής σχεδιασμού σε κάποια ανά είδος έργου προβλεπόμενη περίοδο επαναφοράς. Αναφέρεται ότι «εφόσον δεν υπάρχουν ακριβέστερα στοιχεία βροχοπτώσεων επιτρέπεται για μικρές και μέσου μεγέθους λεκάνες η εκτίμηση της παροχής μελέτης να γίνεται, σύμφωνα με όσα αναφέρονται παρακάτω με βάση τον τύπο του FULLER :

$$Q = Qi \times F0,80 \times (1+0,80 \times \log T) \times [(1+(2,66/F0,30)]$$

Όπου:

- Q = η παροχή υπολογισμού σε m^3/ sec
- F = η επιφάνεια της λεκάνης απορροής σε $χλμ^2$

- T = η περίοδος επαναφοράς
- Qi = Συντελεστής εξαρτώμενος από την περίοδο επαναφοράς

Η εφαρμογή του τύπου του FULLER μπορεί να γίνεται μόνο:

1. Για τον υπολογισμό της κρίσιμης παροχής από φυσικές λεκάνες βροχόπτωσης σε μη αστικές περιοχές.

2. Για την εκτίμηση της κρίσιμης παροχής από λεκάνες απορροής μικρού και μέσου μεγέθους οποιασδήποτε διαμόρφωσης.

Ο συντελεστής Qi ανάλογα με περίοδο επαναφοράς λαμβάνει τις τιμές:

Περίοδος Επαναφοράς σε έτη :

10ετία, Qi = 1.80

50ετία, Qi =2.35

100ετία, Qi =2.60

Αντίστοιχα στην Ορθολογική μέθοδο η παροχή αιχμής Q (σε m3/s) μιας πλημμύρας εκτιμάται από τη σχέση: $Q = 0.278 \cdot c \cdot i \cdot A$

Όπου:

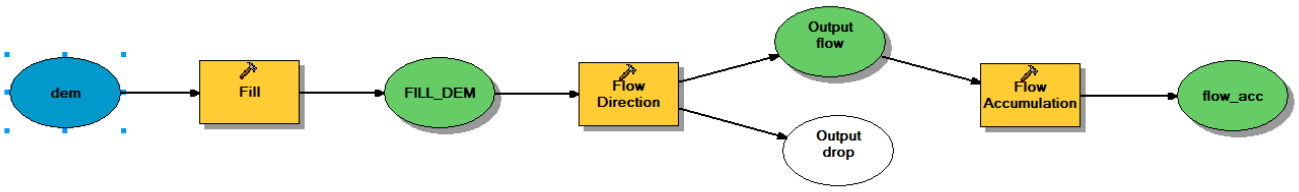
- i (σε mm/h) η ένταση της βροχής διάρκειας ίσης με το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής (φόρτιση),
- A (σε km2) η έκταση της λεκάνης (ιδιότητα)
- c αδιάστατος συντελεστής απορροής (παράμετρος).

Στην ορθολογική μέθοδο εκτιμάται η στιγμιαία τιμή της μεταβλητής που ενδιαφέρει στη μελέτη, ενώ παραλείπεται η περιγραφή της διαχρονικής εξέλιξης της ίδιας μεταβλητής και των λοιπών διεργασιών στη διάρκεια της πλημμύρας.

Το αποτέλεσμα των παραπάνω εμπειρικών τύπων είναι να παρέχεται ο υπολογισμός της παροχής αιχμής σε ελάχιστο χρονικό διάστημα. Οι παραδοχές όμως οι οποίες έχουν γίνει δίνουν μεγάλο συντελεστή αβεβαιότητας ως προς την προσδιορισμένη τιμή της παροχής σχεδιασμού.

Τα υδρολογικά μοντέλα και ειδικά αυτά τα οποία αναπτύσσονται επάνω σε πλατφόρμες των ΣΓΠ προσπαθούν να συμπεριλάβουν όλες εκείνες τις μεταβλητές οι οποίες προσδιορίζουν την υδρολογική απορροή, με τελικό στόχο η ανάλυση να πραγματοποιείται στο μοναδιαίο γεωγραφικό στοιχείο το οποίο είναι το εικονοστοιχείο.

Ο ιδεατός υπολογισμός της πλημμυρικής απορροής με τα ΣΓΠ, προσβλέπει στην υδρολογική ανάλυση όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν αυτήν σε επίπεδο εικονοστοιχείου.



Σχήμα 5: Σχηματική αναπαράσταση υδρολογικής ανάλυσης στο πόγραμμα ArcMap (ΨΜΕ (dem και FILL_DEM), κατεύθυνση ροής (Flow Direction), συσσόρευση ροής (Flow Accumulation)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Υδρολογία : Υδατορρεύματα και πλημμύρες

4.1 Μέτρηση των βροχοπτώσεων

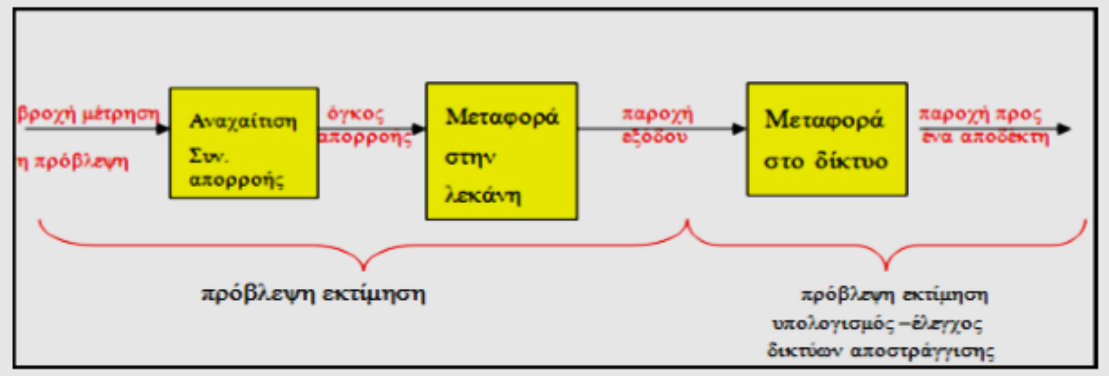
Η μέτρηση των βροχοπτώσεων, αλλά και όλων των κατακρημνίσεων γενικότερα, γίνεται με τα βροχόμετρα και τους βροχογράφους. Τα βροχόμετρα είναι τυποποιημένα δοχεία συλλογής των κατακρημνίσεων. Οι βροχογράφοι είναι βροχόμετρα εφοδιασμένα με ένα αυτογραφικό μηχανισμό (με ζύγιση ή καταγραφή όγκου).

Η αξιόπιστη μέτρηση των κατακρημνίσεων, απέχει πολύ από το είναι τόσο απλή απ'όσο αφήνουν να φανεί τα χρησιμοποιούμενα για το σκοπό αυτό όργανα. Οι μετρήσεις αυτές είναι σημειακές. Μία εξαιρετικά απλή μέθοδος για τον υπολογισμό του μέσου ισοδυνάμου ύψους κατακρημνίσεων σε μία περιοχή είναι η μέθοδος των

πολυγώνων Thiessen. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, η περιοχή της μελέτης χωρίζεται σε υποπεριοχές, τα όρια των οποίων προκύπτουν από τις μεσοκαθέτους στις ευθείες που ενώνουν δύο παρακείμενους σταθμούς. Οι υποπεριοχές που δημιουργούνται με τον τρόπο αυτό έχουν το χαρακτηριστικό ότι περιλαμβάνουν όλα τα σημεία που βρίσκονται πιο κοντά στο σταθμό που περικλείει η υποπεριοχή αυτή, παρά σε οποιοδήποτε άλλο σταθμό (δυσδιάστατα). Η μέθοδος αυτή είναι καθαρά γεωμετρική και δεν λαμβάνει υπόψη το εδαφικό ανάγλυφο (Βαφειάδης, 2000).

4.2 Σχέση βροχής - απορροής

Η βροχή αποτελεί την αφετηρία του επίγειου τμήματος του υδρολογικού κύκλου και βασική προϋπόθεση για τη δημιουργία των επιφανειακών απορροών. Μπορούμε να διακρίνουμε τρεις φάσεις στη διαδικασία βροχή-απορροή όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Διαδικασία βροχής-απορροής

Οι σκοποί μελέτης της σχέσεως "βροχής-απορροής":

Η πρόβλεψη πλημμυρών σε πραγματικό χρόνο, μελέτη του υδρολογικού κύκλου και η αποκατάσταση ή αναδημιουργία χαμένων δεδομένων. Η παραγωγή δεδομένων για τη σχεδίαση και τον έλεγχο των υδραυλικών συστημάτων μεγάλης

κλίμακας (υδροηλεκτρικά, αρδευτικά, αποστραγγιστικά, αποχετευτικά πόλεων) (Βαφειάδης, 2000).

Μόλις η βροχή φθάσει στην επιφάνεια της Γης αναχαιτίζεται από τη βλάστηση και τις κατασκευές που την καλύπτουν και δεσμεύεται προσωρινά. Σε κάθε περίπτωση όμως, το νερό της βροχής θα καταμερισθεί τελικά σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

βροχή = εξάτμιση + διήθηση + απορροή

Η παραπάνω σχέση είναι προσδιοριστική καθώς εάν γνωρίζουμε την τιμή τριών από τους όρους της αμέσως προσδιορίζεται και ο τέταρτος. Το βάρος των διαφόρων όρων στη σχέση αυτή εξαρτάται από τη χωρική και χρονική κλίμακα που θα διαλέξουμε.

Για παράδειγμα, συνήθως αγνοούμε την εξάτμιση στις προβλέψεις σε πραγματικό χρόνο σε περιορισμένες περιοχές. Το εντελώς αντίθετο συμβαίνει κατά την κατάστρωση των ετησίων υδατικών ισοζυγίων για μία ολόκληρη χώρα.

4.3 Υδρογράφημα – απορροή

Ένα μέρος του νερού που φθάνει στην επιφάνεια της γης από τις κατακρημνίσεις κινείται στην επιφάνεια του εδάφους και καταλήγει σε κάποιο υδατόρευμα και ένα άλλο διηθείται στο έδαφος. Μέρος του διηθούμενου κινείται πλευρικά και εμφανίζεται σε χαμηλότερα υψόμετρα στην επιφάνεια του εδάφους ή σε υδατορεύματα, το υπόλοιπο εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφόρους που τροφοδοτούν κάποιο επιφανειακό υδατόρευμα.

Η συνολική επιφάνεια εδάφους που τροφοδοτεί με νερό απορροής ένα ρέμα αποτελεί τη λεκάνη απορροής. Κάθε υδρολογική λεκάνη διαχωρίζεται από τις γειτονικές με τον υδροκρίτη. Το μέρος του νερού που φθάνει στο υδατόρρευμα καλείται απορροή. Το νερό που κινείται στην επιφάνεια του εδάφους αποτελεί την επιφανειακή απορροή, το μέρος που κινείται μέσω του εδάφους την υπεδάφια απορροή και το μέρος που προέρχεται από τους υπόγειους υδροφόρους την υπόγεια απορροή. Η άμεση απορροή είναι εκείνη που καταλήγει στα υδατορεύματα αμέσως μετα την βροχή ή την τήξη του χιονιού και αποτελείται από την επιφανειακή και μέρος της υπεδάφιας, ενώ η βασική απορροή αποτελείται κύρια από την υπόγεια και είναι συνεχής. Το ποσό της βροχής που προκαλεί την άμεση απορροή καλείται ενεργός βροχόπτωση και η

εκτίμηση των απωλειών της βροχής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και τα χαρακτηριστικά της βροχής.

Η πρόβλεψη των πλημμυρών και η ανάπτυξη μοντέλων αφορά στην περιγραφή των διαδικασιών μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε υδρογράφημα πλημμύρας μέσα σε ένα υδρολογικό σύστημα. Αν η ανάλυση αφορά ένα μεμονωμένο γεγονός, μια σειρά διεργασίες, όπως η εξατμισοδιαπνοή ή η αλληλεπίδραση με τον υδροφόρο ή άλλες διαδικασίες που τα μεγέθη τους είναι αμελητέα κατά το χρονικό διάστημα εκδήλωσης της πλημμύρας μπορεί να αγνοηθούν.

Στην ανάλυση των πλημμυρών, η βασική ποσότητα που εξετάζεται είναι η παροχή των ποταμών, ο ρυθμός ογκομετρικής μεταφοράς του νερού. Τόσο η παροχή του ποταμού όσο και το βάθος του νερού (ή στάθμη) μεταβάλλεται με το χρόνο και το χώρο, και η γνώση αυτής της μεταβολής είναι προυπόθεση για την υδρολογική ανάλυση. Οι χωρικές μεταβολές οφείλονται σε γεωλογικούς παράγοντες και οι χρονικές προκαλούνται από την χρονοσειρά των κατακρημνισμάτων (Καρύμπαλης, 2011). Μια γραφική παράσταση της στάθμης ή της παροχής του ποταμού ως προς το χρόνο σε ένα σημείο ονομάζεται υδρογράφημα.

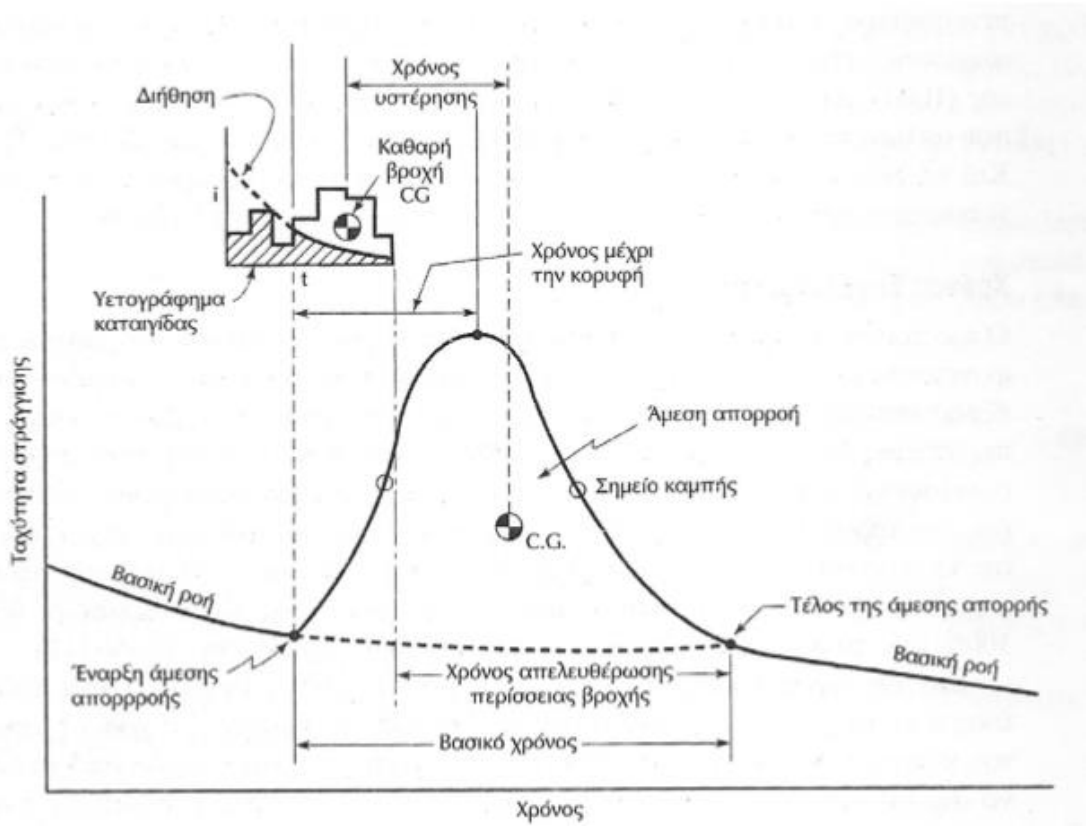
Το υδροφράφημα δεν μετριέται απευθείας, αλλά εξάγεται από το σταθμηγράφημα. Στις ΗΠΑ, τα δεδομένα της στάθμης καταγράφονται από έναν αισθητήρα πίεσης. Σε κάποια ποτάμια για την μέτρηση της στάθμης χρησιμοποιείται ραντάρ.

Η καταγραφή της στάθμης του νερού ως προς το χρόνο σε έναν υδρομετρικό σταθμό είναι το σταθμηγράφημα. Για να κατασκευαστεί ένα υδρογράφημα από αυτά τα δεδομένα, πρέπει να προσδιοριστεί η παροχή για διαφορετικές στάθμες. Μετρώντας την ταχύτητα του νερού σε αρκετά σημεία κατά πλάτος του ποταμού, η παροχή για τη συγκεκριμένη στάθμη μπορεί να προσδιοριστεί. Αυτές οι μετρήσεις γίνονται γενικώς με μυλίσκους.

Αφού μετρηθεί η παροχή για μια σειρά από στάθμες, μπορεί να κατασκευαστεί μια καμπύλη στάθμης-παροχής, η οποία συνδέει τη στάθμη με την παροχή. Οι σχέσεις αυτές συνήθως δεν είναι γραμμικές, αλλά προσεγγίζονται από μια εξίσωση δύναμης. Για να είναι χρήσιμος ένας σταθμός μέτρησης, πρέπει να τοποθετείται σε σημεία όπου η σχέση στάθμης-παροχής δεν μεταβάλλεται με το χρόνο. Μια τέτοια θέση ονομάζεται διατομή ελέγχου. Ένα παράδειγμα μιας διατομής ελέγχου μπορεί να είναι ένα μέρος όπου η ροή περιορίζεται μέσα σε βραχώδη κοίτη ή ανάμεσα στα βάθρα μιας γέφυρας.

Ένας σταθμός στον οποίο η διατομή αλλάζει συνεχώς, λόγω της διάβρωσης ή της εναπόθεσης φερτών υλικών στον πυθμένα, δεν παρέχει καλό έλεγχο.

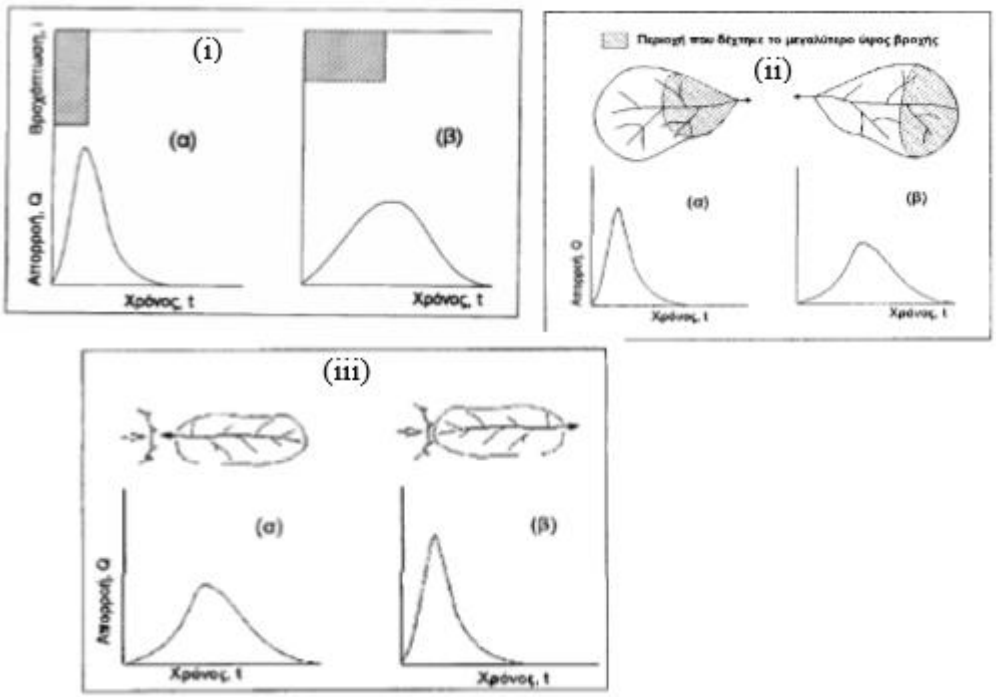
Αφού προσδιοριστεί η καμπύλη στάθμης - παροχής για ένα υδρομετρικό σταθμό, μπορεί έπειτα να χρησιμοποιηθεί, ώστε να μετατραπεί κάθε τιμή της στάθμης σε παροχή. Το αποτέλεσμα της παροχής αιχμής στο υδρογράφημα καλείται πλημμύρα, ανεξάρτητα αν το νερό υπερβαίνει τις όχθες του ποταμού και προκαλεί καταστροφή. Η απορροή «υποβάθρου» (μεταξύ των πλημμυρών) καλείται βασική ροή και τροφοδοτείται από την εισροή των υπογείων νερών. Η ακριβής φύση του κάθε υδρογραφήματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και της καταιγίδας. Ακόμη και μέσα στην ίδια κλιματική ζώνη οι διαφορές στο σχήμα, τη γεωλογία και τη φυτοκάλυψη μιας λεκάνης απορροής παράγουν διαφορετικά υδρογραφήματα σαν απόκριση σε παρόμοιες βροχοπτώσεις.



Σχήμα 7: Υδρογράφημα (Πηγή: Viessman and Lewis, 1996)

Συγκεκριμένα οι παράγοντες που επηρεάζουν το σχήμα του υδρογραφήματος είναι οι κλιματικοί παράγοντες, τα τοπογραφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (Παπαζαφειρίου, 1983, Μιμίκου και Μπάλτας, 2012).

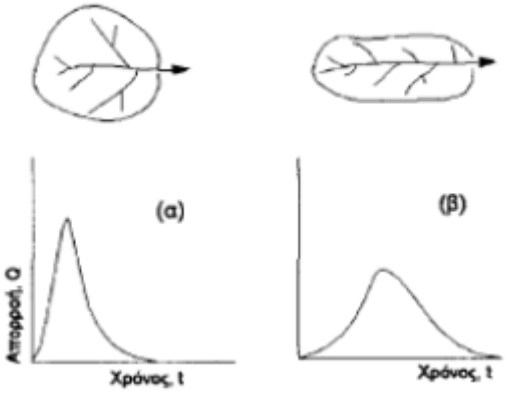
Οι βασικοί κλιματικοί παράγοντες είναι η ένταση, η διάρκεια και η χρονική κατανομή της βροχής (Σχημα 8), η κατανομή της βροχής πάνω στην υδρολογική λεκάνη (Σχήμα 8), η διεύθυνση της βροχής (Σχήμα 8), η μορφή του κατακρημνίσματος (βροχή ή χιόνι) και ο τύπος της βροχής.



Σχήμα 8: Επίδραση κλιματικών παραμέτρων στο σχήμα του υδρογραφήματος (Πηγή: Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012)

Τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής επηρεάζουν το υδρογράφημα απορροής. Οι κυριότεροι παράγοντες είναι το μέγεθος και το σχήμα της λεκάνης που καθορίζει το ρυθμό που το νερό φθάνει στο κύριο υδατόρευμα και επηρεάζει σημαντικά το χρόνο συγκέντρωσης και το μέγεθος της αιχμής (Σχήμα 9). Η κατανομή και η πυκνότητα του δικτύου των ρευμάτων επηρεάζει την καμπύλη ανόδου του υδρογραφήματος και το ύψος της αιχμής. Σε ομοιόμορφα κατανεμημένο και πυκνό υδρογραφικό δίκτυο η καμπύλη ανόδου είναι απότομη και το ύψος της αιχμής μεγαλύτερο. Η κλίση των πρανών της λεκάνης που ρυθμίζει την ταχύτητα με την οποία το νερό κινείται στην επιφάνεια και επίσης τη διάρκεια διήθησης του, είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας. Για μεγάλες κλίσεις, οι καμπύλες ανόδου και καθόδου γίνονται πιο απότομες και η αιχμή γίνεται μεγαλύτερη. Η κλίση του κύριου υδατορεύματος ρυθμίζει κυρίως την καμπύλη ανόδου. Επίσης σηματική επίδραση ασκούν το ανάγλυφο του εδάφους και το ποσοστό και το είδος της φυτοκάλυψης.

Γεωλογικοί παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν είναι εκείνοι που ρυθμίζουν την ροή του νερού προς τα ρέματα. Ειδικότερα τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής εδαφικής στρώσης καθορίζουν το ρυθμό διήθησης του νερού.



Σχήμα 9: Υδρογραφήματα λεκάνης ιδίου μεγέθους και διαφορετικού σχήματος (Πηγή: Μιμίκου και Μπάλτας, 2012)

4.4 Κίνηση πλημμυρικού κύματος

Σε ένα «ιδεατό» κανάλι με ένα ρευστό χωρίς τριβή, μπορούμε να δεχτούμε πως ένα πλημμυρικό κύμα ταξιδεύει χωρίς αλλαγή στη μορφή του από το σημείο που ξεκινά. Ωστόσο, η μηχανική ενέργεια χάνεται (δαπανάται) σε ένα φυσικό κανάλι λόγω της αντίστασης της τριβής που προκαλεί η τραχύτητα της κοίτης. Το νερό επίσης αποθηκεύεται σε λίμνες και σε υπερύψωση της στάθμης ανάντη και στη συνέχεια απελευθερώνεται. Σαν αποτέλεσμα της τριβής κια της αποθήκευσης περιμένουμε το μέγεθος του πλημμυρικού κύματος να μειώνεται ή να αποσβένεται, καθώς κατευθύνεται κατάντη. Αυτή η μείωση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες: τη δυνατότητα ενός ποταμού να αποθηκεύει και να απελευθερώνει το νερό, την τραχύτητα της κοίτης του, το ποσοστό της βλάστησης στο κανάλι και τις όχθες του, τη σχετική ευθύτητα του καναλιού και τον αριθμό των γεφυρών και άλλων εμποδίων που βρίσκονται στην πορεία του πλημμυρικού κύματος.

Η κατάσταση γίνεται ακόμη πιο περίπλοκη, καθώς η πλευρική εισροή από τους παραποτάμους και τα υπόγεια νερά αυξάνουν τον όγκο του νερού στο κανάλι, καθώς αυτό κινείται κατάντη. Γενικά, η παροχή αυξάνει στα κατάντη, καθώς μεγαλώνει η

λεκάνη απορροής. Αυτό φαίνεται να έρχεται σε αντίθεση με την υπόθεση «μείωσης λόγω τριβής και αποθήκευσης» που κάναμε παραπάνω, αλλά η συμπεριφορά περιπλέκεται από την αύξηση της λεκάνης στα κατάντη. Η επίδραση της αυξανόμενης επιφανείας της λεκάνης, μπορεί να ληφθεί υπόψη διαιρώντας την παροχή με την επιφάνεια της λεκάνης ώστε να «κανονικοποιηθούν» οι παροχές προτού να συγκριθούν. Τα κανονικοποιημένα υδρογραφήματα αποδεικνύουν ότι το πλημμυρικό κύμα όντως αποσβένεται, καθώς κινείται μέσα στο κανάλι. Τα κανονικοποιημένα υδρογραφήματα δείχνουν καθαρά τη χρονική καθυστέρηση μεταξύ της αιχμής της πλημμύρας και τη μείωση της μέγιστης παροχής ανά μονάδα επιφανείας στην κατάντη κατεύθυνση.

4.5 Διόδευση πλημμύρας

Η έγκαιρη προειδοποίηση και η αποφυγή των επιπτώσεων των πλημμυρών εξαρτάται από την κατανόηση του πόσο γρήγορα η κορυφή ενός πλημμυρικού κύματος ταξιδεύει κατάντη και πως το ύψος αλλάζει. Ουσιαστικά, το πρόβλημα έγκειται στο να είμαστε ικανοί να προβλέψουμε ποιό θα είναι το κατάντη υδρογράφημα, αν ξέρουμε το ανάντη υδρογράφημα. Αυτό ονομάζεται διόδευση πλημμύρας. Εκτός του ανάντη υδρογραφήματος, η πρόβλεψη του κατάντη υδρογραφήματος απαιτεί μια εκτίμηση του πόσο γρήγορα κινείται το πλημμυρικό κύμα, εκτίμηση του νερού που προστίθεται από την πλευρική εισροή, της επίδρασης της τριβής και, γενικώς, μια ολοκληρωμένη κατανόηση της υδρολογίας και της υδραυλικής της λεκάνης απορροής. Μπορούμε να απλοποιήσουμε το πρόβλημα, αναγνωρίζοντας το βάθος και την ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος σαν τις δύο πιο σημαντικές μεταβλητές. Η εξίσωση της συνέχειας και ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα αποτελούν τις δύο εξισώσεις που χρειαζόμαστε, προκειμένου να επιλύσουμε ως προς τους δύο αγνώστους, το βάθος και την ταχύτητα.

Αν ένα τμήμα ενός ποταμού λαμβάνεται ως όγκος ελέγχου, η εισροή δίνεται από το ανάντη υδρογράφημα και η εκροή από το κατάντη υδρογράφημα. Θα υποθέσουμε ότι η πλευρική εισροή είναι σχετικά μικρή σε σχέση με τη μεταβολή στην αποθήκευση που συνδέεται με το πλημμυρικό κύμα και έτσι μπορούμε να την αγνοήσουμε. Αυτή η υπόθεση μπορεί να μην ισχύει, αν το τμήμα του ποταμού είναι

πολύ μεγάλο. Η ανάλυση της κίνησης ενός πλημμυρικού κύματος είναι διαφορετική από την ανάλυση της μόνιμης ροής. Το βάθος και η ταχύτητα αλλάζουν γρήγορα με το χρόνο σε μια πλημμύρα, συνεπώς πρέπει να το επιλύσουμε σαν ένα πρόβλημα μη μόνιμης ροής.

Με απλά λόγια, απαλείφοντας οποιαδήποτε πλευρική εισροή, η εξίσωση συνέχειας για μη μόνιμη ροή μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$dV / dt = I - O$$

Όπου: το I είναι το γνωστό ανάντη υδρογράφημα (εισροή), το O είναι το κατάντη υδρογράφημα (εκροή) που θέλουμε να προβλέψουμε και το V είναι ο όγκος του νερού που αποθηκεύτηκε στο τμήμα του ποταμού. Σε συνθήκες μόνιμης ροής, ο όγκος αποθήκευσης είναι σταθερός και $I = O$. Κατά τη διάρκεια μιας πλημμύρας, η εισροή και το ύψος του νερού αυξάνονται. Σαν αποτέλεσμα, ο όγκος του νερού που αποθηκεύεται στην κοίτη του ποταμού αυξάνεται. Όσο μεγαλύτερη είναι η αλλαγή στην αποθήκευση σε ένα χρονικό διάστημα (dV / dt), τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ των ανάντη και κατάντη υδρογραφημάτων.

Για να λύσουμε ως προς τους δύο αγνώστους V και O την εξίσωση απαιτείται και μια δεύτερη εξίσωση. Η παραπάνω εξίσωση είναι μια έκφραση της διατήρησης της μάζας. Η δεύτερη εξίσωση προκύπτει από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα (διατήρηση της ορμής ή της ποσότητας κίνησης). Η δεύτερη αυτή εξίσωση μπορεί επίσης να παρέχει μια σχέση μεταξύ του όγκου V και της εκροής O, η οποία είναι $O = f(V)$. Αντικαθιστώντας αυτή την έκφραση στην πρώτη εξίσωση προκύπτει μια εξίσωση στην οποία ο ρυθμός αλλαγής του όγκου (dV / dt) εξαρτάται από τον όγκο V. Μια τέτοια εξίσωση ονομάζεται διαφορική εξίσωση.

Γενικά, δεν μπορούμε να επιλύσουμε απευθείας αυτή τη διαφορική εξίσωση ως προς τον όγκο V. Αντί αυτού, για την επίλυση αυτής της εξίσωσης χρησιμοποιείται μαι αριθμητική μέθοδος. Βασικά, αυτό περιλαμβάνει το μετασχηματισμό της διαφορικής εξίσωσης σε μία ή περισσότερες αλγεβρικές εξισώσεις που μπορούν να επιλυθούν πολύ πιο εύκολα.

4.6 Ανάλυση πλημμυρικών συχνοτήτων

Η διόδευση πλημμύρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστεί η αποτελεσματικότητα ενός πλημμυρικού έργου. Πάντα θα υπάρχουν πλημμύρες, οι οποίες θα υπερβαίνουν τις προδιαγραφές ενός τέτοιου έργου. Το ερώτημα είναι ποιά είναι η πιθανότητα εμφάνισης αυτών των πλημμυρών σε κάθε ένα έτος και αν αυτή η πιθανότητα είναι αποδεκτά χαμηλή. Υπάρχει μια πληθώρα ζητημάτων που απαιτούν τη χρήση των πιθανοτήτων στην ανάλυση των πλημμυρών.

Η πιθανότητα μιας πλημμύρας που θα είναι ίση ή μεγαλύτερη από ένα δεδομένο μέγεθος μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τα μητρώα των παροχών από ένα υδρομετρικό σταθμό.

Η τυπική διαδικασία συνοψίζεται στα επόμενα βήματα:

1. Καταγράφεται η μεγαλύτερη παροχή κάθε χρονιάς για τα n χρόνια του μητρώου. Αυτές οι μέγιστες παροχές καλούνται πλημμύρες και η σειρά αυτή των ετήσιων μεγίστων ονομάζεται ετήσια σειρά.
2. Αυτές οι πλημμύρες κατατάσσονται σύμφωνα με το μέγεθός τους. Η μεγαλύτερη πλημμύρα αναφέρεται ως 1 στην κατάταξη, η δεύτερη μεγαλύτερη ως 2 κοκ.
3. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά υπολογίζονται γραφικά με τη χάραξη σε χαρτί κανονικής κατανομής, του λογάριθμου της παροχής της κάθε πλημμύρας στην ετήσια σειρά ως προς το κλάσμα των πλημμυρών που είναι μεγαλύτερο ή ίσο με αυτή την πλημμύρα. Το κλάσμα αυτό δίνεται από τη σχέση $r / (n + 1)$, όπου r είναι η κατάταξη της συγκεκριμένης πλημμύρας.
4. Αν τα δεδομένα ταιριάζουν με την λογαριθμική κανονική κατανομή, θα αποτυπωθούν κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής εφόσον στον y άξονα χρησιμοποιηθεί κλίμακα κανονικής κατανομής.
5. Αν στα δεδομένα δεν εφαρμόζει καλά η λογαριθμοκανονική κατανομή, μια άλλη κατανομή, όπως για παράδειγμα, μια λογαριθμική κατανομή Pearson μπορεί να ταιριάζει καλύτερα. Ταιριάζοντας μια γραμμή τάσης στα δεδομένα, υπολογίζεται η πιθανότητα υπέρβασης και η περίοδος επαναφοράς μιας πλημμύρας οποιουδήποτε μεγέθους.
6. Η πιθανότητα υπέρβασης μιας δεδομένης πλημμύρας δίνεται από την τιμή που υποδεικνύεται από τη γραμμή τάσης που ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα. Η περίοδος επαναφοράς, το μέσο χρονικό διάστημα μεταξύ μιας πλημμύρας

οποιουδήποτε μεγέθους, και μιας ίσης ή μεγαλύτερης από αυτή, υπολογίζεται ως εξής: $T_{επαναφοράς} = 1 / (πιθανότητα υπέρβασης)$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Υδρολογικά Μοντέλα

5.1 Ορθολογική μέθοδος εκτίμησης πλημμυρικών αιχμών

Χρησιμοποιείται γαι την εκτίμηση της πλημμυρικής αιχμής σε μικρές σχετικά υδρολογικές λεκάνες και ισχύει:

$$Q = 0,278.C\ i\ A$$

Όπου:

Q: αιχμή της απορροής σε m^3/sec (παροχή)

C: συντελεστής απορροής, αδιάστατη παράμετρος

I: ένταση της βροχής σε mm/h

A: επιφάνεια της λεκάνης σε km^2

Η ένταση βροχής (I) μελέτης υπολογίζεται από τις όμβριες καμπύλες που χαράσσονται με βάση την ανάλυση υετογραμμάτων και την προσαρμογή των τιμών σε κατάλληλη συνάρτηση κατανομής πιθανότητας, συνήθως αυτή του Gumbel (δις-εκθετική). Ο νόμος αυτός συγκαταλέγεται στην ομάδα των ακραίων κατανομών διότι περιγράφει ικανοποιητικά τις κατανομές των ακραίων τιμών τυχαίων μεταβλητών. (π.χ. μέγιστες ετήσιες βροχοπτώσεις). Είναι ο απλούστερος νόμος και είναι απεριόριστος, στη σχέση μεταξύ των x και y. Καλείται και κατανομή ακραίων τιμών τυχαίων μεταβλητών τύπου I. Αντίστοιχα οι κατανομές των ακραίων τιμών τυχαίων μεταβλητών τύπου II έχουν ένα κατώτερο όριο, ενώ οι τύπου III ένα ανώτερο.

Για λόγους πρακτικούς διακρίνουμε δύο μεγάλες κατηγορίες λεκανών απορροής:

• Τις φυσικές ή αγροτικές λεκάνες απορροής. Αυτές είναι γενικά διαπερατές με συντελεστή απορροής C = 0.05 ~ 0.50, συχνά ομογενείς ως προς το έδαφος και τη βλάστηση, αλλά σε μεγάλη ποικιλία ως προς την έκταση, που πηγαίνει από μερικές δεκάδες χιλιόμετρα σε μερικές χιλιάδες χιλιόμετρα .

• Τις αστικές λεκάνες απορροής. Είναι γενικά αδιαπέρατες με συντελεστή απορροής C = 0.50 ~ 0.90, και μικρού μεγέθους. Αποτελούν ουσιαστικά πάντοτε μέρος

μίας μεγαλύτερης φυσικής λεκάνης απορροής, αλλά παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον σχετικά με τα δίκτυα αποχετεύσεως όμβριων και γι'αυτό μελετώνται ξεχωριστά (Βαφειάδης, 2000).

Η χρήση της ορθολογικής μεθόδου βασίζεται στις ακόλουθες υποθέσεις και περιορισμούς:

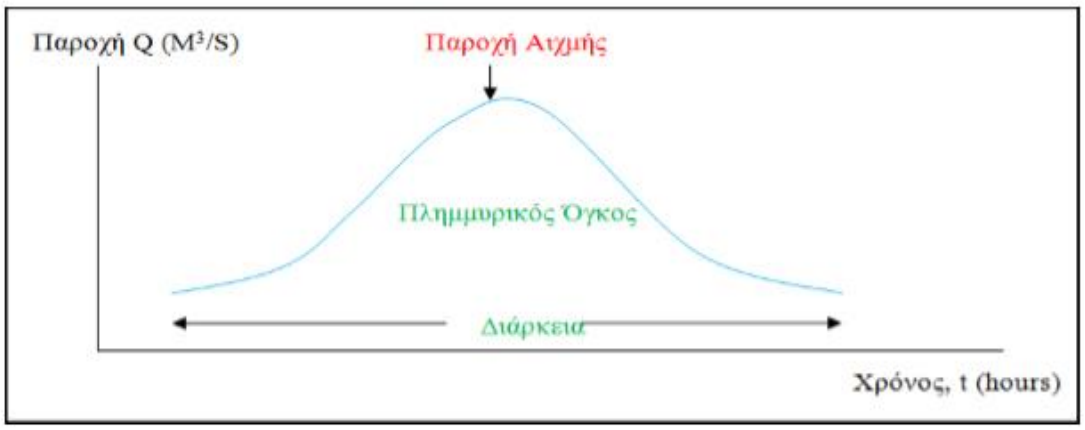
- Η ένταση της βροχόπτωσης είναι ομοιόμορφη σε όλη τη διάρκεια της καταιγίδας.
- Οι βροχοπτώσεις κατανέμονται ομοιόμορφα πάνω από την λεκάνη απορροής.
- Η υπολογισμένη απορροή είναι ευθέως ανάλογη προς την ένταση της βροχόπτωσης.
- Η μέγιστη απορροή σε μια υδρολογική λεκάνη για βροχή έντασης i που αρχίζει στιγμιαία και συνεχίζεται, προκύπτει όταν το νερό από όλα τα σημεία της φθάσει στην έξοδο της λεκάνης. Κατά συνέπεια, η μέθοδος εφαρμόζεται, εάν η διάρκεια της βροχής με την ομοιόμορφη ένταση είναι τουλάχιστον ίση με το χρόνο συγκέντρωσης t_c της λεκάνης απορροής.

Οι ανωτέρω παραδοχές και περιορισμοί είναι ο λόγος που η εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου περιορίζεται σε μικρές λεκάνες απορροής (<35 km^2).

Ο συντελεστής απορροής δεν είναι σταθερός για την ίδια υδρολογική λεκάνη, είναι συνάρτηση της περιεχόμενης στο έδαφος υγρασίας και της έντασης της βροχής. Εξαρτάται επίσης από το ανάγλυφο της επιφάνεια της λεκάνης, από την έκταση και την πυκνότητα της φυτοκάλυψης και από την κλίση των πρανών της λεκάνης.

Τα μεγέθη των πλημμυρών συνδέονται με τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης (συνολικό ύψος, ένταση, διάρκεια), της λεκάνης απορροής (έκταση, συντελεστής απορροής, χρόνος συρροής) και των υδατορεμάτων (διατομή, κλίση, τραχύτητα, κατάντη στάθμες).

Η λεκάνη απορροής είναι παράγοντας καθορισμού χρόνου συγκέντρωσης και συντελεστή απορροής, με επακόλουθο την αύξηση ή μείωση πλημμυρικού κίνδυνου, τα συστήματα αποστράγγισης με επακόλουθο την μείωση του φαινόμενου, το πλημμυρικό πεδίο όπου αναλόγως έντασης, και άξιας κοινωνικών δραστηριοτήτων αυξάνει τον κίνδυνο πλημμύρας. Σαν φυσικό πλαίσιο λαμβάνουμε υπόψη ότι στην πλημμυρά κατανέμονται τρία κύρια μεγέθη, η παροχή αιχμής και η αντίστοιχη στάθμη στο υδατόρεμα, ο πλημμυρικός όγκος και η χρονική διάρκεια όπως αυτά παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10: Τυπικό γράφημα παροχής αιχμής σε συνάρτηση με το χρόνο

5.2 Μοναδιαίο υδρογράφημα

Ο Sherman (1932) πρότεινε για πρώτη φορά την έννοια του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Ως μοναδιαίο υδρογράφημα (UH) μιας λεκάνης απορροής ορίζεται το υδρογράφημα της άμεσης απορροής που προκύπτει από ενεργό βροχόπτωση ίση με τη μονάδα (1cm) ομοιόμορφα κατανεμημένης στην λεκάνη απορροής, σταθερής έντασης συγκεκριμένης διάρκειας.

Το υδρολογικό σύστημα θεωρείται γραμμικό και αμετάβλητο στο χρόνο (Chow et al., 1988).

Οι βασικές παραδοχές που υπεισέρχονται στην προσέγγιση του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι:

1. Η ενεργός βροχόπτωση έχει σταθερή ένταση σε όλη τη διάρκειά της.
2. Η ενεργός βροχόπτωση κατανέμεται ομοιόμορφα σε ολόκληρη την λεκάνη απορροής.
3. Για μια δεδομένη λεκάνη ο χρόνος βάσης του υδρογραφήματος (η διάρκεια της άμεσης απορροής) που προκύπτει από ενεργό βροχή δεδομένης διάρκειας, είναι σταθερός.
4. Για μια δεδομένη υδρολογική λεκάνη οι τεταγμένες όλων των υδρογραφημάτων άμεσης απορροής με κοινό χρόνο βάσης, είναι ευθέως ανάλογες της συνολικής ποσότητας της άμεσης απορροής του κάθε υδρογραφήματος.

5. Το μοναδιαίο υδρογράφημα για ενεργό βροχή δεδομένης διάρκειας αντικατοπτρίζει τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και η κατάσταση της υδρολογικής λεκάνης θεωρείται ότι παραμένει αμετάβλητη με το χρόνο.

Όταν η ενεργός βροχόπτωση δίνεται ως υετογράφημα, (σαν μια αλληλουχία M παλμών της ίδιας διάρκειας Δt), το αντίστοιχο υδρογράφημα άμεσης απορροής δίνεται από το ολοκλήρωμα συνέλιξης του υετογραφήματος και του μοναδιαίου υδρογραφήματος.

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq M} P_m U_{n-m+1}$$

Όπου m<=M σαν άνω όριο σημαίνει ότι το m=1, 2,..., n για n<=M, και για n>M ισχύει m=1, 2,...., M.

$$Q_n = Q(n\Delta t)$$

Όπου n=1,2,…, N

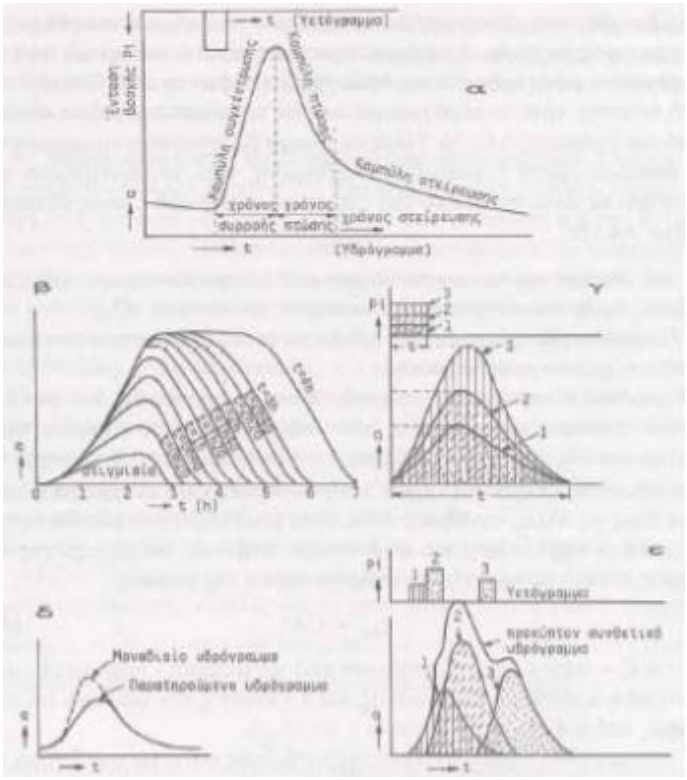
$$P_m = \int_{(m-1)\Delta t}^{m\Delta t} I_e\,(r)dt$$

Όπου: m=1,2,…, M

P_m το ύψος της ενργού βροχόπτωσης του m χρονικού διαστήματος

Q_n η άμεση απορροή στο τέλος του n χρονικού διαστήματος και U_{n-m+1} η τεταγμένη του μοναδιαίου υδρογραφήματος.

Για την εκτίμηση της ενεργού βροχόπτωσης και των απωλειών λόγω διήθησης του νερού της βροχής στο έδαφος έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις. Ενδεικτικά αναφέρεται η ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος της Soil Conservation Service (SCS). Το ενεργό ύψος βροχής, η ποσότητα βροχής που απορρέει επιφανειακά, υπολογίζεται με βάση τον αριθμό καμπύλης CN (με τιμή από 0 εώς 100) που προσδιορίζεται από πίνακες ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, την υγρασιακή του κατάσταση κατά τον χρόνο της βροχόπτωσης και την χρήση γης.



Σχήμα 11: Μοναδιαία υδρογραφήματα απλά και σύνθετα (Πηγή: Καρύμπαλης, 2011)

Στις θέσεις όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις χρησιμοποιούνται τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα που προέρχονται από την ρύθμιση μέσω εξισώσεων μια ή και περισσότερων παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτοί αφορούν συνήθως την παροχή αιχμής, το χρόνο συγκέντρωσης, το χρόνο υστέρησης και ορίζονται με βάση τα χαρακτηριστικά της λεκάνης. Διάφορες προσεγγίσεις για την δημιουργία συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων έχουν αναπτυχθεί όπως του Snyder, 1938, του Nash, 1958, 1959, το αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα. (SCS, 1972).

5.3 Μέθοδος χρόνου – επιφανείας

Μια από τις μεθόδους που χρησιμοποιείται συχνά για την προσομοίωση της βροχής - απορρής είναι η μέθοδος χρόνου – επιφανείας. Η βασική αρχή της μεθόδου χρόνου επιφανείας είναι το ιστόγραμμα χρόνου – επιφανείας που εκφράζει τη σχέση μεταξύ του χρόνου διαδρομής της απορροής και της επιφάνειας της λεκάνης απορροής, που συμβάλλει στην απορροή κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου (McCuen, 1989). Η λεκάνη χωρίζεται σε υποπεριοχές με καμπύλες που ονομάζονται

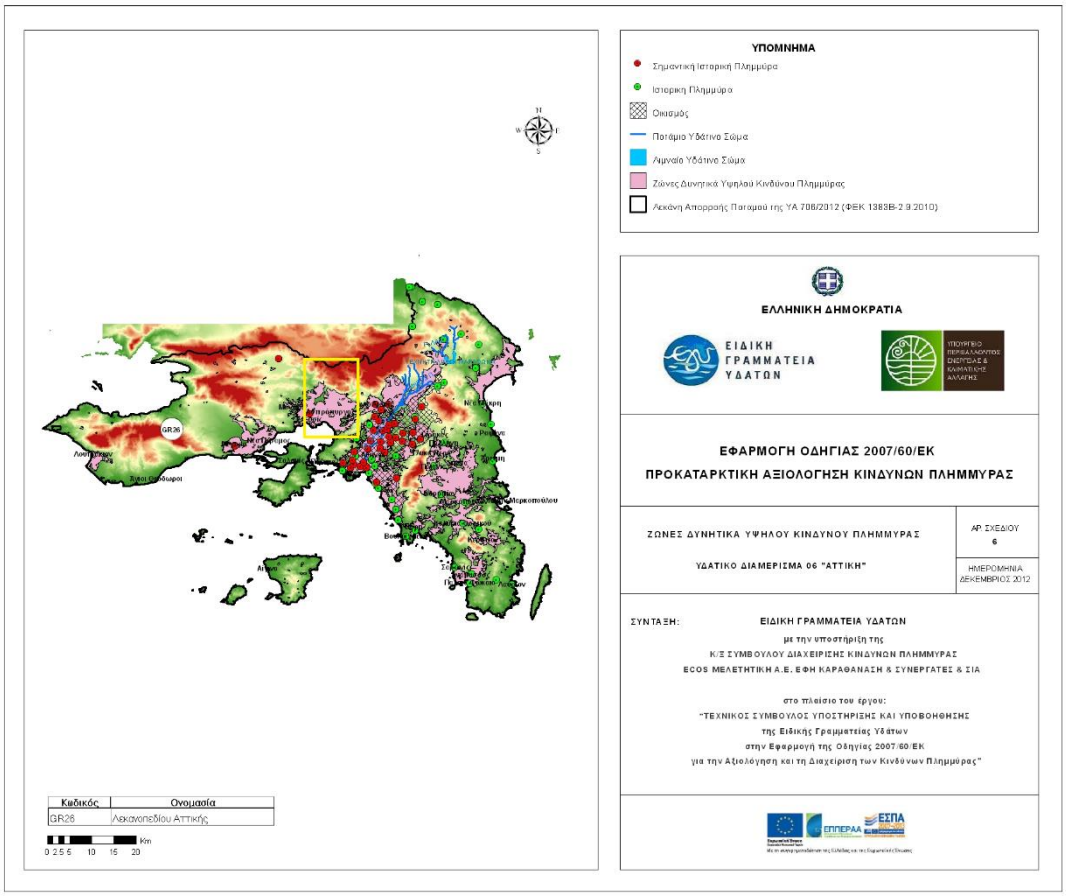
ισόχρονες. Ισόχρονη καμπύλη είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων όπου οι σταγόνες της βροχής απέχουν χρονικά το ίδιο από την έξοδο της λεκάνης. Οι ισόχρονες καμπύλες δεν μπορούν να διασταυρωθούν και μπορούν να ξεκινούν και να τερματίζουν μόνο στα όρια της λεκάνης (Dooge, 1959). Η μέθοδος χρόνου – επιφάνειας δεν λαμβάνει υπόψη την αποθηκευτικότητα της λεκάνης και κατά συνέπεια μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε μικρές ή μεσαίου μεγέθος λεκάνες. Επίσης, ισχύουν οι δύο αρχές του μοναδιαίου υδρογραφήματος, η αρχή της αναλογίας και η αρχή της επαλληλίας. Αυτό σημαίνει ότι για τον υπολογισμό της πλημμυρικής απορροής εφαρμόζεται μία και μοναδική συνάρτηση, ανεξάρτητα από τις μεταβολές της έντασης της ενεργού βροχόπτωσης (Sagjafian et al., 2002). Ο Clark (1945) ανέπτυξε μια μέθοδο για την απόκτηση του μοναδιαίου υδρογραφήματος βασιζόμενος στην σχέση χρόνου – επιφανείας και υπολίγισε επίσης και την αποθηκευτικότητα του συστήματος μέσω της εν συνεχεία διόδευσης της απορροής σε μια γραμμική δεξαμενή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Μελέτη Περίπτωσης

6.1 Η περιοχή του Θριάσιου Πεδίου:

Το Θριάσιο πεδίο (ή αλλιώς πεδιάδα της Ελευσίνας) εντοπίζεται στο δυτικό τμήμα του νομού Αττικής. Το βόρειο τμήμα της περιοχής συνορεύει με το Νομό Βοιωτίας ενώ νότια βρέχεται από τον Κόλπο της Ελευσίνας. Η περιοχή αυτή, παρουσιάζει απλή γεωμορφολογική εικόνα με το μεγαλύτερο τμήμα της να αποτελεί εκτεταμένη πεδιάδα ήπιου αναγλύφου, με μέση τοπογραφική κλίση 2%, περικλειόμενη από ορεινά τμήματα περιμετρικά. Το Θριάσιο πεδίο οριοθετείται βόρεια από το όρος Πάστρα (1016m), βορειοδυτικά από το όρος Κιθαιρώνας (1408m), νοτιοδυτικά από το όρος Πατέρας, ανατολικά από το όρος Πάρνηθα (1413m) και νότια από τους λόφους Ράχη Σωτήρος (432m) και Κορυφή (384m) (Μαριολάκος κ.α., 2001). Η περιοχή χαρακτηρίζεται από πλούσια υδροφορία τόσο σε υπόγεια όσο και σε επιφανειακά ύδατα με τα σημαντικότερα ρέματα να είναι αυτό του Σαρανταπόταμου, το ρέμα Γιαννούλας και το ρέμα Σούρες. Τα ρέματα αυτά συγκεντρώνουν τις απορροές των γύρω ορεινών όγκων διασχίζουν το Θριάσιο πεδίο και εκβάλλουν στην παραλία Ασπροπύργου - Ελευσίνας. Η περιοχή του Θριάσιου πεδίου αποτελεί τμήμα του

υδατικού διαμερίσματος της Αττικής (GR06) βάσει της 2007/60/ΕΚ Οδηγίας όπως βλέπουμε στον παρακάτω χάρτη.



Χάρτης 4: Υδατικό διαμέρισμα 06 ΑΤΤΙΚΗ

6.2 Το κλίμα της περιοχής:

Το κλίμα στην περιοχή του Θριάσιου πεδίου χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό με εξαίρεση τα υψηλά σημεία όπου είναι ορεινό. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 17 ºC και 19 ºC ανάλογα με το υψόμετρο και την απόσταση από τη θάλασσα, ενώ το ετήσιο θερμομετρικό εύρος είναι περίπου 19 ºC. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κυμαίνεται από 300mm έως 400mm (δεδομένα ετών 1950-2001 από τους σταθμούς Ελευσίνας, Μεγάρων και Αστεροσκοπείου Αθηνών) και οι ημέρες βροχής ετησίως κυμαίνονται μεταξύ 50 με 100 (Κουτσογιάννης & Μαμάσης, 2001). Η χιονόπτωση είναι σπάνια στις παράκτιες περιοχές, ενώ αυξάνει στα υψηλότερα σημεία του αναγλύφου.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι μέσες ετήσιες τιμές των μετεωρολογικών μεταβλητών από τους σταθμούς Ελευσίνας, Μεγάρων και Αστεροσκοπείου Αθηνών.

	Αστεροσκοπείο	Ελευσίνα	Μέγαρα
Θερμοκρασία (° C)	17.7	18.1	18
Βροχόπτωση (mm)	389	385	440
Σχετ. Υγρασία (%)	62	55	62
Ημέρες με βροχή	60	75	65
Ημέρες με χιόνι	3.3	5.0	0.5
Ημέρες με χαλάζι	2.8	0.5	0.2

6.3 Το υδρογραφικό δίκτυο του ρέματος Γιαννούλας:

Ο χείμαρρος Γιαννούλας, με εμβαδόν συνολικής λεκάνης απορροής 110 km^2, είναι ο δεύτερος σημαντικότερος χείμαρρος της περιοχής του Θριάσιου Πεδίου, μετά τον Σαρανταπόταμο. Ξεκινά από την Πάρνηθα σε υψόμετρο 1200 m περίπου, περνά ανατολικά του Ασπροπύργου, κινείται περίπου παράλληλα και σε επαφή με τη σιδηροδρομική γραμμή Αθηνών - Κορίνθου, διατρέχει ένα τμήμα των Διυλιστηρίων, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί το όριο αυτού και εκβάλλει στη θάλασσα στο ύψος του προς τα ΒΔ ορίου του χώρου των Διυλιστηρίων, αφού διέλθει κάτω από την Εθνική Οδό Αθηνών - Κορίνθου. (www.minenv.gr) Το συγκεκριμένο ρέμα πηγάζει από την πηγή Ρουμάνι, βόρεια του Σπηλαίου Πανός, και το οποίο, στο ύψος του σπηλαίου, ενώνεται με το ρέμα Ρεματάκι και σχηματίζουν το ρέμα Γιαννούλας. (www.parnitha-np.gr)

Το ρέμα της Γιαννούλας στην αρχαιότητα ονομαζόταν φαράγγι του Κελαδώνα. Το ρέμα της Γιαννούλας (μπορεί να το συναντήσουμε πλέον και με τις ονομασίες Γκούρας ή Αγ. Γεωργίου), έχει μήκος πολλών χιλιομέτρων, καθώς εκτείνεται σε μεγάλο κομμάτι του ορεινού όγκου της Πάρνηθας και διασταυρώνεται με πληθώρα άλλων μικρότερων ρευμάτων. Η κύρια μισγάγγεια του ρέματος έχει συνολικό μήκος περίπου 22 km. Ένα τμήμα του, μήκους, 3 km, από την τοποθεσία Μεσονύχτι μέχρι την Μονή Κλειστών της Φυλής, είναι ένα ιδιαίτερα δύσβατο φαράγγι και σε ορισμένα σημεία οι κάθετες πλευρές του υψώνονται μέχρι 500 m.

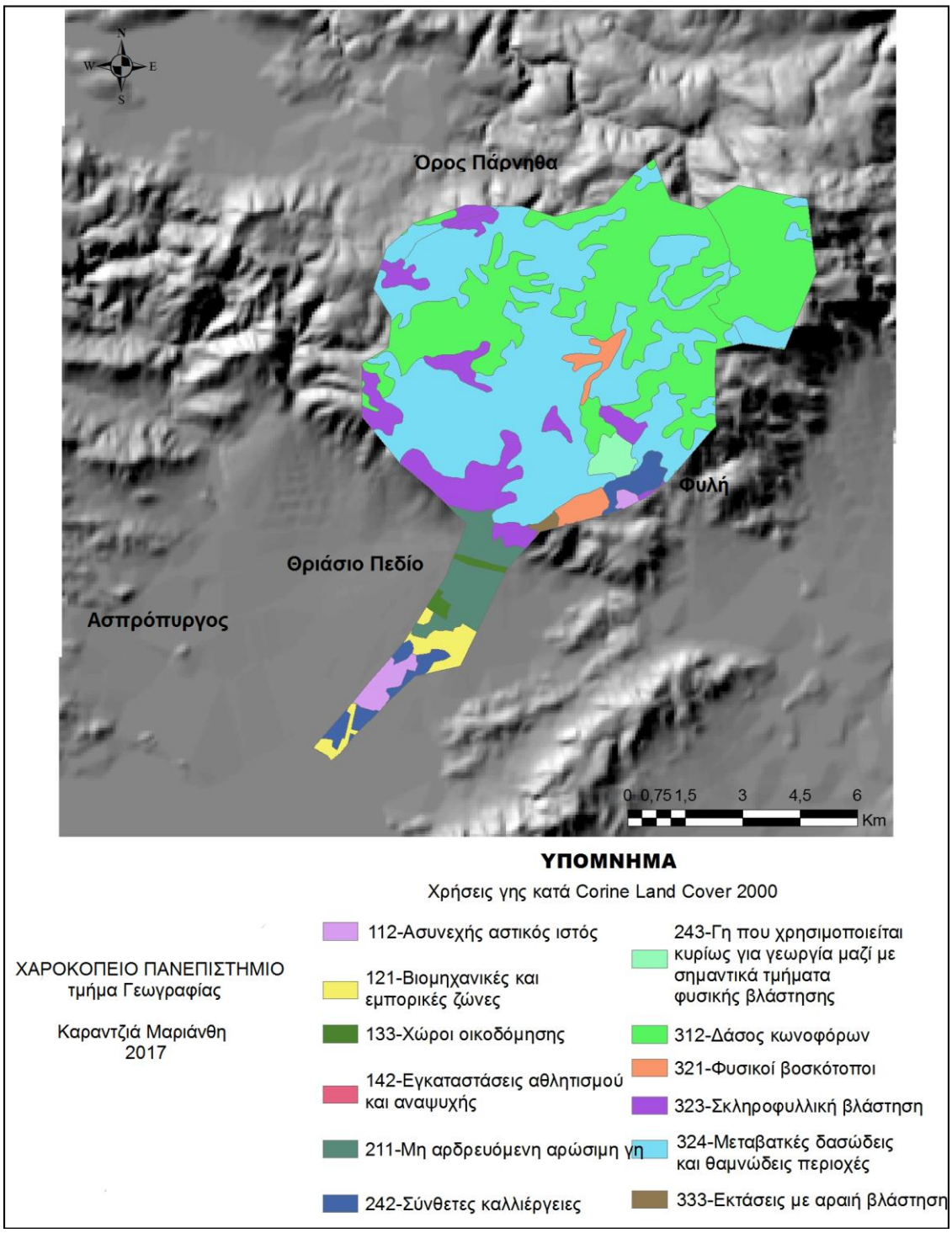
Αρχικά, ρέει με διεύθυνση ροής Β-Ν, στη συνέχεια για ένα μήκος 3 km ρέει από τα Α.ΒΑ προς Δ.ΝΔ και στη συνέχεια, με διεύθυνση ροής Β.ΒΑ-Ν.ΝΔ. Χειμώνα και άνοιξη έχει πολλούς μικρούς και μεγάλους καταρράκτες. Το καλοκαίρι ξεραίνεται. Γενικότερα, είναι ένας χείμαρρος περιοδικής ροής, που εμφανίζει επιφανειακή απορροή μόνο κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου του έτους και, ιδιαίτερα, μετά από έντονες βροχοπτώσεις. Η απόθεση των φερτών υλών από τη διάβρωση του ορεινού αναγλύφου της λεκάνης απορροής του υδρογραφικού δικτύου του ρ. Γιαννούλας έχει διαμορφώσει στην ευρύτερη πεδινή περιοχή του Ασπροπύργου ένα εκτεταμένο αλλουβιακό ριπίδιο που αποτελεί το ανατολικό τμήμα του Θριάσιου πεδίου.

Το υδρογραφικό δίκτυο του χειμάρρου θα μπορούσε να χαρακτηρισθεί ως σύνθετου τύπου. Το βορειοανατολικό τμήμα του ρέματος ανήκει στον δενδριτικό τύπο. Οι κλάδοι του σε αυτό το σημείο συμβάλουν μεταξύ τους με οξείες γωνίες. Στο μεγαλύτερο μέρος του όμως μπορεί να θεωρηθεί ότι προσεγγίζει τον κλιμακωτό ή ορθογώνιο τύπο με μεγάλου σχετικά μήκους κεντρικούς κλάδους και πολλούς μικρού μήκους κλάδους να συμβάλλουν με τις κεντρικές κοίτες με σχεδόν ορθές γωνίες. Γενικά, το υδρογραφικό δίκτυο φαίνεται να είναι σχετικά μικρής συχνότητας και πυκνότητας καθώς, όπως θα ειπωθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο της γεωλογίας, η λεκάνη απορροής καταλαμβάνεται σε μεγάλο ποσοστό από ανθρακικούς σχηματισμούς (ασβεστόλιθους και δολομίτες).

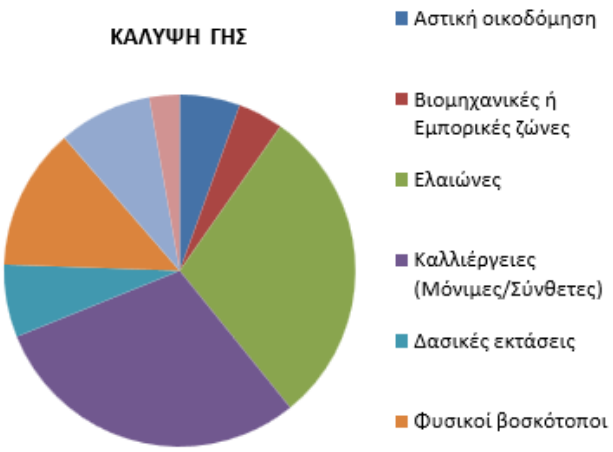
Μετά την περιοχή της Φυλής, υπάρχουν κατά την ροή του καταβόθρες κι αυτός είναι ο λόγος που δεν προκαλεί κάθε χρόνο πλημμύρες στο Θριάσιο. Όταν κατεβάζει όμως πολύ νερό, λόγω καταιγίδων, οι καταβόθρες δεν αρκούν για να περιορίσουν την ροή και, έτσι, προκαλεί μεγάλες πλημμύρες στην περιοχές του Ασπρόπυργου, όπως έγινε το 1977 και το 2002. (www.focusmag.gr)

Από τη μελέτη του προγράμματος Corine που προμηθευθήκαμε σε μορφή ΓΣΠ από το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων και του δασικού χάρτη της περιοχής για τη λεκάνη απορροής του ρέματος (φύλλο χάρτη Αθήνα-Ελευσίς), διαπιστώθηκε ότι οι κύριες χρήσεις της λεκάνης είναι στα βόρεια της λεκάνης δασικές εκτάσεις, κυρίως δάση κωνοφόρων και μικτά δάση, σκληροφυλλική βλάστηση και μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις, ενώ, όσο προχωράμε νοτιότερα, μπορούμε να συναντήσουμε θάμνους και χερσότοπους, φυσικούς βοσκότοπους, εκτάσεις με αραιή βλάστηση, αγροτικές δασικές περιοχές και γη που καλύπτεται από καλλιέργειες αλλά και σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης. Στο νότιο τμήμα τις λεκάνης παρατηρείται έντονη αστικοποίηση με βιομηχανικές ζώνες και σύνθετα συστήματα

καλλιέργειας, σε συνδυασμό με εκτάσεις με αραιή βλάστηση. Η πεδινή περιοχή του Θριασίου πεδίου είναι αυτή που εμφανίζει και τα περισσότερα προβλήματα πλημμυρών. Στο τμήμα αυτό παρουσιάζεται, εκτός από τη σημαντική οικιστική ανάπτυξη, και παράλληλη σταδιακή υποχώρηση της αγροτικής δραστηριότητας (Ασπρόπυργος).



Χάρτης 5: Πρόγραμμα Corine, φύλλο χάρτη Αθήνα-Ελευσις



Σχήμα 12: Κάλυψης γης της περιοχής μελέτης

Λόγω της έντονης κλίσης και της ταχείας ροής του, το ρέμα Γιαννούλας κατεβάζει και κομμάτια κορμών από δέντρα που ξεράθηκαν στις κορυφές. Το υπέδαφος της λεκάνης αποτελείται στο μεγαλύτερο τμήμα του από αμμώδη πηλό και χαλαρά υλικά. Επίσης, συναντά κανείς αργιλοάμμους με κυμαινόμενο ποσοστό χαλίκων, αλλουβιακές προσχώσεις και εξασθενημένα αργιλώδη αμμοχάλικα. Τα στοιχεία αυτά πάρθηκαν από εδαφοτομές που έχει πραγματοποιήσει στη λεκάνη το Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών και παρατίθενται στο Παράρτημα 1.

Η ορεινή κοίτη του ρέματος θεωρείται αρκετά καλά διαμορφωμένη και, όπως ελέχθη, η πεδινή είναι αυτή που παρουσιάζει τα πλημμυρικά προβλήματα. Το πεδινό τμήμα του ρέματος από την άποψη της αντιπλημμυρικής προστασίας θα μπορούσε να διακριθεί στο τμήμα από την παλαιά σιδηροδρομική γραμμή έως τη θάλασσα και στο τμήμα ανάντη της παλαιάς σιδηροδρομική γραμμή μέχρι το πέρας της περιοχής που εμφανίζει οικιστική ανάπτυξη και η οποία συμπίπτει περίπου με τον άξονα της Ε.Λ. Ελευσίνας – Σταυρού – Α.Δ.Σπάτων (ΕΛΕΣ) (Πέππας, 2005).

Για το πρώτο τμήμα, η εκβολή των χειμάρρων προς θάλασσα είχε τη μορφή δέλτα, δηλαδή η κοίτη απλωνόταν και διασπώνταν σε μικρότερες επιμέρους κοίτες. Πράγματι, κατά την κατασκευή της παλαιάς σιδηροδρομικής γραμμής τον περασμένο αιώνα, επειδή η γραμμή διασταυρώνεται με όλα τα επιμέρους ρέματα, κατασκευάστηκαν κατά μήκος αυτής πολλές γέφυρες και οχετοί μέσω των οποίων διέρχονταν τα πλημμυρικά νερά προς τη θάλασσα. Έκτοτε η περιοχή από τη σιδηροδρομική γραμμή μέχρι τη θάλασσα έχει δομηθεί έντονα και οι κοίτες των μικρών ρεμάτων ή περιορίστηκαν δραστικά ή εξαφανίστηκαν. Έτσι, λόγω έλλειψης φυσικής διεξόδου των ρεμάτων προς τη θάλασσα, σε κάθε καταιγίδα παρουσιάζονται μικρά ή μεγάλα πλημμυρικά προβλήματα. (www.kathimerini.gr)

6.4 Γεωλογική δομή λεκάνης απορροής του χειμάρρου Γιαννούλας

Η διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου είναι συνάρτηση του αναγλύφου, του υπεδάφους, των κλιματολογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή και του χρόνου. Ένας από του πιο σημαντικούς παράγοντες είναι η γεωλογία της περιοχής. Η περιοχή μελέτης αποτελείται κυρίως από ανθρακικά πετρώματα, τα οποία διαβρώνονται εύκολα, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται δευτερεύοντες κλάδοι παίρνοντας κυρίως δενδριτικού τύπου μορφή.

Στην περιοχή του Θριάσου πεδίου, γενικότερα, αναπτύσσονται ασβεστόλιθοι και αποτελούν σχηματισμούς πολύ υδροπερατούς, λόγω έντονης τεκτονικής διάρρηξης και καρστικοποίησης. Τοπικά, όπου υπάρχει αυξημένη συμμετοχή δολομιτών, ο βαθμός καρστικοποίησης μειώνεται. Αν και υδρολογικά ο σχηματισμός αναπληρώνεται πολύ ικανοποιητικά η τεκτονική του δομή επιτρέπει τον σχηματισμό κορεσμένης ζώνης στην οριακή περιοχή του σχηματισμού με το υπόβαθρο του (Κούνης, 1981, μέσω Καράμπελα, 1997). Οι αλλουβιακές προσχώσεις αποτελούνται από ανομοιογενείς φερτές ύλες (ασβεστολιθικά τεμάχια με μικρή αναλογία κερατολιθικών κροκαλών), συνδέονται με ερυθροκάστανο αργιλοψαμμιτικό υλικό και περικλείουν ερυθρή άργιλο, η οποία είναι αδιαπέραστη. Καλύπτουν την πεδινή έκταση του Θριάσιου πεδίου, με κατανομή των αδρομερών υλικών στην περίμετρο και το στενό τμήμα κάθε κοιλάδας και των άμμων και της ιλύος στην έξοδο της προς την κατεύθυνση της θάλασσας, καθώς και στα πρανή των ασβεστολιθικών κλιτύων (Καράμπελα, 1997).

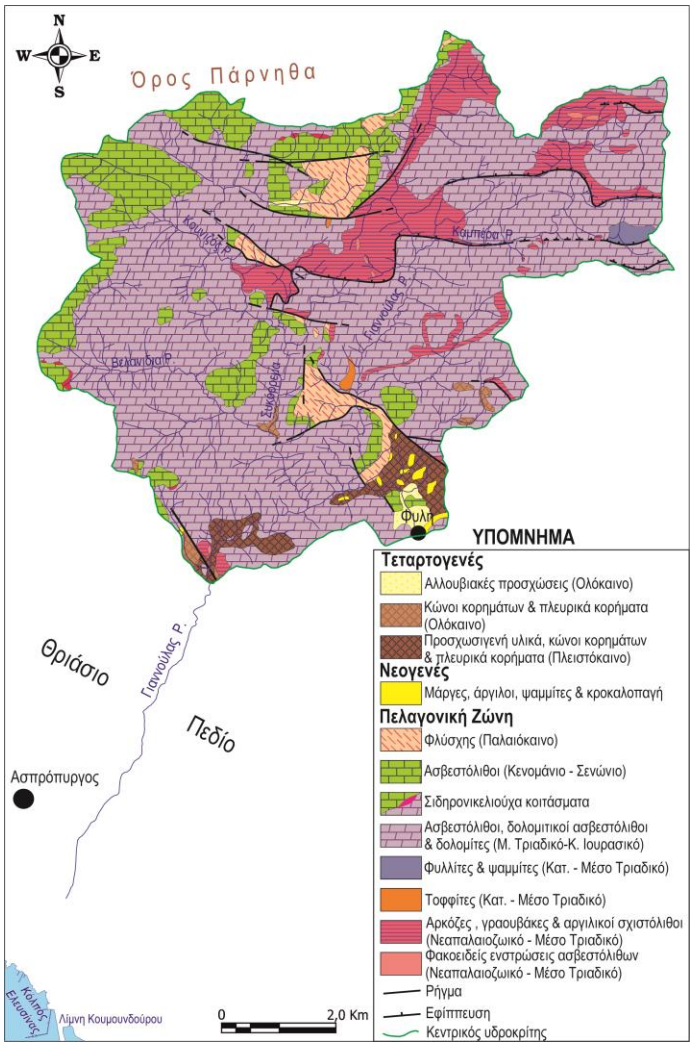
Τα ριπίδια και οι κώνοι κορημάτων είναι αποθέσεις που συναντώνται σε περιοχές που βρίσκονται κατάντη των εξόδων των χειμάρρων. Εκεί, λόγω απότομης μείωσης της κλίσης της κοίτης, η ταχύτητα των ρεόντων υδάτων ελαττώνεται απότομα, με αποτέλεσμα την αντίστοιχη μείωση της μεταφορικής ικανότητας των υδάτων και την απόθεση των, μεταφερόμενων από αυτά, φερτών υλικών. Τα ριπίδια αποτελούνται από ασβεστολιθικές λατύπες ποικίλου μεγέθους, άργιλους, αμμούχους άργιλους και άμμους τα οποία είναι συνδεδεμένα με ασβεστοαργιλικό υλικό και αποτελούν σχηματισμούς αρκετά υδροπερατούς (Καράμπελα, 1997).

Συγκεκριμένα, οι γεωλογικοί σχηματισμοί που καταλαμβάνουν τη λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας είναι τόσο Αλπικοί όσο και Μεταλπικοί. Οι Ελληνικές οροσειρές, που ανήκουν στο Διναρικό κλάδο του Αλπικού συστήματος αλύσεων ορέων, υποδιαιρούνται σε γεωτεκτονικές ζώνες, η κάθε μια από τις οποίες

συνίσταται από ορισμένη στρωματογραφική διαδοχή των ιζημάτων της, από τους ιδιαίτερους λιθολογικούς χαρακτήρες της και από την ιδιαίτερη τεκτονική της συμπεριφορά, στοιχεία γενικά που εξαρτώνται από την παλαιογεωγραφική της θέση (Παπανικολάου, 1986).

Οι Αλπικοί σχηματισμοί που καταλαμβάνουν τη λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας ανήκουν στη γεωτεκτονική ζώνη της Πελαγονικής, που είναι μια από τις εσωτερικές Ελληνίδες. Κατά τους Αλπικούς χρόνους, η Πελαγονική ζώνη αποτελούσε ηπειρωτικό τέμαχος με ρηχή θάλασσα και λάμβανε χώρα μηριτική ιζηματογένεση (Μουντράκης, 1985).

Τα δεδομένα για τη γεωλογία της περιοχής βασίστηκαν στον γεωλογικό χάρτη κλίμακας 1:50000 του ΙΓΜΕ και συγκεκριμένα στο φύλλο Αθήνα - Ελευσίς (Κατσικάτσος κ.α., 1986). Στον ίδιο χάρτη βασίστηκε ο γεωλογικός χάρτης που σχεδιάστηκε για τη λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας. (Καρύμπαλης, 2015)



Χάρτης 6: Γεωλογικός χάρτης ρέματος Γιαννούλας (φύλλο χάρτη Αθήνα-Έλευσις) (πηγή: Καρύμπαλης, 2015)

Οι Αλπικοί γεωλογικοί σχηματισμοί από τους παλαιότερους προς τους νεότερους είναι οι εξής:

- Αρκόζες, γραουβάκες και αργιλικοί σχιστόλιθοι σε εναλλαγές με φυλλίτες και χαλαζιακά κροκαλοπαγή κατά θέσεις. Μέσα σε αυτούς απαντούν φακοειδείς ενδιαστρώσεις απολιθωματοφόρων ασβεστόλιθων κυρίως χρώματος τεφρού μέχρι μελανότεφρου. Η ηλικία αυτού του σχηματισμού είναι Νεοπαλαιοζωικό – Μέσο Τριαδικό και εντοπίζονται, κυρίως, στο κεντρικό και βορειοανατολικό τμήμα της λεκάνης απορροής. Θεωρούνται ως σχετικά υδατοστεγείς σχηματισμοί, που επιτρέπουν την επιφανειακή απορροή και δεν ευνοούν την κατείσδυση.
- Φυλλίτες και ψαμμίτες που φέρουν σώματα εκρηξιγενών πετρωμάτων κυρίως κερατοφυρών που συνοδεύονται από τοφίτες. Η ηλικία του σχηματισμού είναι Κατώτερο – Μέσο Τριαδικό και η έκταση που καταλαμβάνουν στη λεκάνη απορροής είναι πολύ περιορισμένη.
- Ασβεστόλιθοι, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες ηλικίας Μέσου Τριαδικού – Κατώτερου Ιουρασικού. Είναι ανοικτότεφροι έως σκοτεινότεφροι, μέσο έως παχυστρωματώδεις και κατά θέσεις χωρίς στρώση, έντονα κερματισμένοι, μικροκρυσταλλικοί και κατά θέσεις πολύ κρυσταλλικοί. Στη βάση τους είναι τοπικά λεπτοστρωματώδεις και έχουν χρώμα τεφρόμαυρο ή κόκκινο. Ο σχηματισμός αυτός καλύπτει τη μεγαλύτερη έκταση της λεκάνης απορροής του ρέματος Γιαννούλας. Σε ό,τι αφορά τη συμπεριφορά του σχηματισμού αυτού στο ατμοσφαιρικό νερό, μπορεί να ειπωθεί ότι είναι ένας υδροπερατός σχηματισμός που ευνοεί την κατείσδυση και περιορίζει σχετικά την επιφανειακή απορροή.
- Σιδηρονικελιούχα κοιτάσματα φακοειδούς-στρωματοειδούς μορφής, που υπέρκεινται ασύμφωνα των προανωκρητιδικών ασβεστόλιθων και υπόκεινται σύμφωνα των Άνω κρητιδικών ασβεστόλιθων. Το μετάλλευμα είναι πισσολιθικό ή συμπαγές με μεγάλο ποσοστό αιματίτη-λειμωνίτη και κατά κανόνα με πολλές πυριτικές λατύπες. Η περιεκτικότητά τους σε Νικέλιο είναι γενικά χαμηλή. Οι εμφανίσεις τους στη λεκάνη απορροής περιορίζονται στο δυτικό και το βόρειο τμήμα της.

- Ασβεστόλιθοι επικλισιγενείς ηλικίας Κενομάνιου - Σενώνιου. Στη βάση τους είναι λεπτοστρωματώδεις, τοπικά μαργαϊκοί, χρώματος κιτρινόλευκου και καλύπτουν κατά θέσεις με συμφωνία στρώσεως σιδηρονικελιούχα και βωξιτικά κοιτάσματα. Στρωματογραφικά ψηλότερα γίνονται μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις, χρώματος τεφρού και εγκλείουν απολιθώματα του Κενομάνιου-Τουρώνιου. Στο ανώτερο τμήμα του σχηματισμού οι ασβεστόλιθοι είναι λεπτοί μέχρι μεσοστρωματώδεις, μαργαϊκοί, χρώματος τεφράφαιου μέχρι τεφρού και μερικές φορές υποπράσινου ή κοκκινωπού με βολβούς πυριτόλιθων και κατά θέσεις με παρεμβολές ασβεστολιθικών λατυποπαγών. Υπέρκεινται τοπικά ασύμφωνα των Κενομάνιων - Τουρώνιων ασβεστόλιθων ή και παλαιότερων προανωκρητιδικών σχηματισμών. Εμφανίζονται κυρίως στο κεντρικό και βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Θεωρούνται υδροπερατοί σχηματισμοί που ευνοούν την κατείσδυση και περιορίζουν την επιφανειακή απορροή.
- Φλύσχης ηλικίας Παλαιοκαίνου, που αποτελείται από εναλλαγές αργιλικών σχιστόλιθων και ψαμμιτών με ενστρώσεις ψαμμούχων ασβεστόλιθων. Πρόκειται για αδιαπέρατους σχηματισμούς που ενισχύουν την επιφανειακή απορροή. Στη λεκάνη απορροής έχουν περιορισμένη εξάπλωση, κυρίως, στο κεντρικό και το βόρειο τμήμα.

Οι Μεταλπικοί σχηματισμοί περιλαμβάνουν ιζήματα του Νεογενούς όπως και του Τεταρτογενούς. Συγκεκριμένα:

- Οι Νεογενείς σχηματισμοί έχουν πολύ μικρή εμφάνιση στο νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης απορροής. Στη βάση τους αποτελούνται από εναλλαγές στρωμάτων λιμναίας φάσης, μαργών, αργίλων και ψαμμιτών, με παρεμβολές κροκαλοπαγών και κοιτασμάτων λιγνίτη. Προς τα πάνω εξελίσσονται σε χερσαίους σχηματισμούς που αποτελούνται κυρίως από ερυθροπηλούς και κροκαλοπαγή.
- Οι σχηματισμοί του Πλειστόκαινου περιορίζονται στο νότιο τμήμα της λεκάνης πριν την έξοδο της κεντρικής κοίτης από το ορεινό ανάγλυφο στην πεδινή περιοχή του Θριάσιου. Είναι προσχωριγενή υλικά και αποθέσεις παλαιών ριπιδίων, κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα από λατυποκροκάλες ποικίλου μεγέθους, κυρίως ασβεστολιθικές, ισχυρά συνδεδεμένες μεταξύ τους

με συνδετικό υλικό ψαμμιτομαργαϊκό. Κατά θέσεις εγκλείουν ακανόνιστες φακοειδείς ενστρώσεις καστανέρυθρου, αμμούχου αργιλομαργαϊκού υλικού.

- Οι αποθέσεις του Ολόκαινου περιλαμβάνουν αλλουβιακές προσχώσεις από χαλαρά αργιλοαμμώδη υλικά, που αναπτύσσονται κατά μήκος των κοιτών του υδρογραφικού δικτύου και κυρίως στον κάτω ρου του ποταμού, στη διαδρομή της κεντρικής κοίτης του ρέματος κατά μήκος του αλλουβιακού του ριπιδίου. Όλη η χαμηλή πεδινή έκταση μετά την έξοδο του ρέματος από τον ορεινό όγκο έως την ακτογραμμή καταλαμβάνεται από τις αλλουβιακές αποθέσεις του χειμάρρου, που έχουν διαμορφώσει ένα εκτεταμένο αλλουβιακό ριπίδιο.
- Τέλος, σε συγκεκριμένες θέσεις μεγάλης τοπογραφικής κλίσης, έχουν σχηματισθεί στα πρανή κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα ασύνδετα ή μικρής συνεκτικότητας Ολοκαινικής ηλικίας.

Στην περιοχή μελέτης υπάρχουν δύο συστήματα ρηγμάτων με σχεδόν κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις. Το ένα σύστημα περιλαμβάνει ρήγματα διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ, ενώ το δεύτερο έχει διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Ορισμένες τεκτονικές επαφές έχουν επηρεάσει το υδρογραφικό δίκτυο, αναγκάζοντας κάποιους κλάδους του να ακολουθήσουν τα ρήγματα (Καρύμπαλης, 2011).

6.5 Οι πλημμύρες στο Θριάσιο πεδίο και η ευθύνη του ρέματος Γιαννούλας:

Η συγκεκριμένη περιοχή έχει πληγεί από πλημμύρες πολλές φορές, ακόμη και από την αρχαιότητα. Στους νεότερους χρόνους η πρώτη πλημμύρα στην περιοχή καταγράφτηκε το 1953 με την υπερχείλιση του Σαρανταπόταμου και το 1963 με την υπερχείλιση του χειμάρρου Σούρες, που προκάλεσε το θάνατο ενός ανθρώπου.

Το Νοέμβριο του 1977 οι χείμαρροι Αγίου Γεωργίου ή Γιαννούλας και Μαυριώρας απείλησαν την Παραλία Ασπροπύργου προκαλώντας καταστροφές σε σπίτια, βιοτεχνίες και καλλιέργειες. Ειδικά ο χείμαρρος Γιαννούλας απείλησε τα κρατικά διυλιστήρια. Τα ίδια προβλήματα παρουσιάστηκαν και ένα μήνα μετά, το Δεκέμβριο του 1977.

Μια από τις μεγαλύτερες καταστροφές, σημειώθηκε το Φεβρουαρίου 1978, όταν η γέφυρα Κουραμάνη, κοντά στο αεροδρόμιο, φράχτηκε από κορμούς δένδρων

και φερτά υλικά, με αποτέλεσμα τον πνιγμό εκατοντάδων ζώων και τον αποκλεισμό των κατοίκων της περιοχής. Μεγάλες ζημιές λόγω της πλημμύρας προκλήθηκαν σε σπίτια και βιοτεχνίες, ενώ η οδική και η σιδηροδρομική συγκοινωνία διακόπηκε για αρκετές ώρες. Μετά τα παραπάνω συμβάντα έγινε σημαντική προσπάθεια επίλυσης των πλημμυρικών προβλημάτων στην περιοχή του Θριάσιου πεδίου, με τη μελέτη και κατασκευή έργων αντιπλημμυρικής προστασίας.

Ωστόσο, μετά τη ραγδαία ανάπτυξη και την αναπόφευκτη αλλαγή των χρήσεων γης της περιοχής του Θριάσιου πεδίου τα προβλήματα αντιπλημμυρικής προστασίας επανήλθαν. Η πλέον καταστροφική πλημμύρα καταγράφτηκε στις 26 Ιανουαρίου 1996 η οποία έπληξε κυρίως τους Δήμους Ελευσίνας και Μάνδρας. Ο τραγικός απολογισμός αυτής της πλημμύρας ήταν ο θάνατος δύο ανθρώπων, η καταστροφή αυτοκινήτων και περιουσιών, η υποχώρηση του οδοστρώματος και η ακινητοποίηση αμαξοστοιχιών του ΟΣΕ. Όλες οι καταστροφές προκλήθηκαν από υπερχειλίσεις των χειμάρρων Σαρανταπόταμου, Σούρες και Αγ. Γεωργίου. (Νικολόπουλος, 2004) Τα τελευταία χρόνια τα πλημμυρικά φαινόμενα στην περιοχή είναι ακόμα πιο έντονα και η έλλειψη υποδομών και σωστών αντιπλημμυρικών έργων, δυσχεραίνει περαιτέρω την κατάσταση.

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΥΨΟΣ ΥΕΤΟΥ (mm)	ΥΨΟΣ ΥΕΤΟΥ (mm/h)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ (min)	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
7/11/1961				40 θύματα
19/11/1963	25	4,35	345	1 θύμα
29/11/1963	59,90	11,57	311	
2/11/1977	90,50	7,49	725	20 θύματα
3/11/1977	11,00	3,67	180	
11/12/1977	27,00	2,75	589	16 θύματα
17/12/1977	16,50	0,94	1053	
18/12/1977	13,80	0,82	1010	
5/2/1978	2,70	0,50	324	
6/2/1978	26,40	2,93	541	2 θύματα
27/1/1996	17,30	1,60	649	2 θύματα
29/1/1996	0,90	0,54	100	
8/7/2002	4,50	3,00	90	
17/6/2003	39,00	18,72	125	
4/11/2003	31,00	1,96	949	
24/12/2003	35,90	2,43	886	

Πίνακας 4: Ιστορικό έντονων πλημμυρικών γεγονότων στο Θριάσιο Πεδίο (Πηγή: Ζυγουρά, 2011)

Από τον παραπάνω πίνακα μπορούν να εξαχθούν κάποια γενικά συμπεράσματα για την πλημμυρική συμπεριφορά της περιοχής:

- Σημαντικά ύψη βροχής ενδέχεται να προκαλέσουν ή να μην προκαλέσουν ανθρώπινα θύματα.
- Μεγάλη διάρκεια βροχής μπορεί να μην προκαλέσει ανθρώπινα θύματα, ενώ μπορεί να προκαλέσει μικρή διάρκεια βροχής, σε συνδιασμό με το ύψος βροχής.
- Οι πλημμύρες που προξένησαν τα περισσότερα ανθρώπινα θύματα σχετίζονται με σημαντικά ύψη βροχής (2/11/1997, ύψος βροχής 90,50 mm, 20 θύματα)
- Ακόμη και σε πλημμυρικά επεισόδια με σημαντικά μικρότερο ύψος βροχής υπήρξαν ανθρώπινα θύματα (27/1/1996, ύψος βροχής 17,30 mm, 2 θύματα). (Καρύμπαλης, 2015).

6.6 Αντιπλημμυρικά έργα πεδινής κοίτης:

Όπως προαναφέρθηκε το μεγαλύτερο πρόβλημα πλημμυρικής επικινδυνότητας παρατηρείται στο πεδινό τμήμα του χειμάρρου Γιαννούλας, για αυτό και στο παρελθόν έχουν γίνει προσπάθειες για την διευθέτηση του προβλήματος αυτού.

Μέχρι τις πλημμύρες του 1978, η παροχή του χειμάρρου χωριζόταν, στο ύψος της γραμμής του ΟΣΕ, σε δύο τμήματα. Ένα πρώτο τμήμα περνούσε μέσω τεχνικού έργου κάτω από τις γραμμές του ΟΣΕ και, δια μέσου της περιοχής «Παραλία Ασπροπύργου», κατέληγε, χωρίς διαμορφωμένη κοίτη, στη θάλασσα. Το δεύτερο τμήμα ακολουθούσε κατ' αρχάς διαδρομή παράλληλη προς τις γραμμές του ΟΣΕ, τις οποίες περνούσε μέσω γέφυρας στο σημείο της συμβολής του με τα ρέματα Διυλιστηρίων και Μαύρης Ώρας, ενώ κατέληγε στη θάλασσα διερχόμενο μέσω του οικοπέδου των Διυλιστηρίων. Κατά την πλημμύρα του 1978 το πρώτο τμήμα της απορροής του χειμάρρου κατέκλυσε, όπως ήταν αναμενόμενο, την περιοχή Παραλία Ασπροπύργου (μεταξύ σιδηροδρομικής γραμμής και παραλίας) με αποτέλεσμα να κινδυνεύσουν σπίτια και άνθρωποι στην περιοχή αυτή. Για το λόγο αυτό, εμφράχθηκε η δίοδος του πρώτου τμήματος που επέτρεπε τη διέλευση των παροχών μέσω της περιοχής Παραλία Ασπροπύργου, με αποτέλεσμα το δεύτερο τμήμα του χειμάρρου να γίνει η κύρια και μοναδική κοίτη του. Η προσωρινή αυτή λύση εξακολουθούσε να

υφίσταται μέχρι το 1999 οπότε έγινε τροποποίηση της διευθέτησης του χειμάρρου με συνέπεια, λόγω της ανεπάρκειας της κοίτης, να υπάρχει σοβαρό ζήτημα ασφάλειας του αναχώματος της σιδηροδρομικής γραμμής σε μήκος 900 m περίπου.

Η τροποποίηση της διευθέτησης το 1999 είχε ως αποτέλεσμα να αντιμετωπιστούν και μια σειρά από άλλα προβλήματα που προκαλούνταν λόγω του ρέματος:

• Η έμφραξη της διόδου του πρώτου τμήματος της παροχής επιδείνωσε ακόμα περισσότερο την ήδη προβληματική κατάσταση στο χώρο των Διυλιστηρίων, καθώς το σύνολο πλέον της απορροής του χειμάρρου διερχόταν από το χώρο αυτό.

• Η υφιστάμενη κοίτη είχε πλάτος το οποίο κυμαινόταν από 2.20 έως 8.00 m και βάθος από 0.55 έως 2.80 m.

• Η ενεργός διατομή της κοίτης περιοριζόταν σημαντικά λόγω της τοποθέτησης εντός αυτής, παράλληλα αλλά και κάθετα προς τη ροή, πλήθους σωληνώσεων.

• Η γέφυρα στο σημείο διασταύρωσης της κοίτης με την Εθνική Οδό Αθηνών - Κορίνθου είχε φραχθεί από φερτά υλικά στο μεγαλύτερο τμήμα της, κατάσταση που εμπόδιζε την ομαλή εκβολή των απορροών στη θάλασσα.

Έτσι, το 1999 έγινε τροποποίηση της διευθέτησης της κοίτης. Η διευθέτηση του χειμάρρου έγινε από την εκβολή του μέχρι ανάντη της σιδηροδρομικής γραμμής Αθηνών - Κορίνθου η οποία διέρχεται σε επαφή με τον προς τα ΒΑ περιμετρικό τοίχο των οικοπέδων των Διυλιστηρίων και της Ελληνικής Χαλυβουργίας. Πραγματοποιήθηκαν επίσης έργα συμβολής του χειμάρρου Αγ. Γεωργίου και των ρεμάτων Μαύρης Ώρας και Διυλιστηρίων, καθώς και η διευθέτηση του κοινού τμήματος των δύο ρεμάτων. Η υφιστάμενη γέφυρα του ΟΣΕ, η οποία σήμερα εξυπηρετεί την προς τα κατάντη διέλευση των παροχών και των τριών υδατορευμάτων, και σύμφωνα με την προηγούμενη Οριστική Μελέτη τη διέλευση των ρεμάτων Μ. Ώρας και Διυλιστηρίων, έπαψε να χρησιμοποιείται ως δίοδος των ρεμάτων κάτω από τις σιδηροδρομικές γραμμές. Μετά τη συμβολή, το κοινό πλέον τμήμα των δύο ρεμάτων Μ. Ώρας και Διυλιστηρίων ακολουθεί πορεία προς τα δυτικά παράλληλα προς τη σημερινή κοίτη του χειμάρρου Γιαννούλας, διέρχεται κάτω από τις γραμμές του ΟΣΕ και τελικά συμβάλλει με το χείμαρρο Γιαννούλας εντός του χώρου των Διυλιστηρίων . Η διευθέτηση του χειμάρρου Γιαννούλας εκτελέστηκε επί συνολικού μήκους 1835 m. (ΥΠΕΧΩΔΕ, 1998).

Σκοπός των έργων ήταν η αντιμετώπιση του προβλήματος της αντιπλημμυρικής προστασίας της ευρύτερης ζώνης του χειμάρρου Αγ. Γεωργίου, από

το σημείο υπερχείλισης αυτού προς την περιοχή Παραλία Ασπροπύργου και προς τα κατάντη, και η εξασφάλιση της απρόσκοπτης διέλευσης των πλημμυρικών απορροών τόσο στο τμήμα κατά μήκος των γραμμών του ΟΣΕ, όσο και στο τμήμα εντός του οικοπέδου των Διυλιστηρίων, καθώς και της ομαλής εκβολής στη θάλασσα. Στόχος ήταν, με την ολοκλήρωση των έργων διευθέτησης, στις κοίτες των ρεμάτων ανάντη να έχει αναπτυχθεί πλήρως η παροχετευτική τους ικανότητα και τα μεγέθη των πλημμυρικών αιχμών να φθάσουν τα επίπεδα των εκτιμηθεισών παροχών σχεδιασμού (έως 230 m^3/s).

Σημειώνεται επίσης, ότι ο χείμαρρος Αγ. Γεωργίου εμφανίζει σοβαρό πρόβλημα ρύπανσης των υδάτων του, ιδιαίτερα των παροχών ξηράς περιόδου, εκ του γεγονότος ότι αποτελεί αποδέκτη των λυμάτων ορισμένων από τις πλέον ρυπογόνες βιομηχανικές μονάδες του Θριάσιου Πεδίου.

Η κύρια αιτία όλων αυτών, είναι η εκβιομηχάνιση της περιοχής και ο μετασχηματισμός της γης από αγροτική σε βιομηχανική που είχε ως αποτέλεσμα τις ραγδαίες αλλαγές στην κάλυψη γης, κάτι που συνέβη χωρίς κανένα προηγούμενο σχεδιασμό. Για αυτό το ρέμα προκαλεί, έτσι κι αλλιώς, πλημμύρες στο Θριάσιο Πεδίο της Ελευσίνας, αλλά με έντονες βροχές μετατρέπεται σε καταστροφικό, όπως έγινε το καλοκαίρι-φθινόπωρο του 2002 τότε που πλημμύριζε συχνά και ο Κηφισός λόγω έργων.

Από το καλοκαίρι του 2007 και εξαιτίας των εκτεταμένων πυρκαγιών και των φόβων των κατοίκων, πως δεν θα υπάρξει συγκράτηση των υδάτων με τις φθινοπωρινές βροχές, το ΥΠΕΧΩΔΕ είχε προχωρήσει στην εκπόνηση μελετών για το ρέμα, στην κατασκευή δύο φραγμάτων και πραγματοποιήθηκαν διαδικασίες καθαρισμού, ειδικά για τα φρεάτια που βρίσκονται σε πολυσύχναστους δρόμους. (www.thriassio.gr). Δυστυχώς όμως η σημερινή εικόνα της περιοχής αποδεικνύει ότι η περιοχή για ακόμη μια φορά έχει παραμεληθεί. Φωτογραφικό υλικό της ορεινής και της πεδινής περιοχής παρουσιάζεται στο Παράρτημα 2.

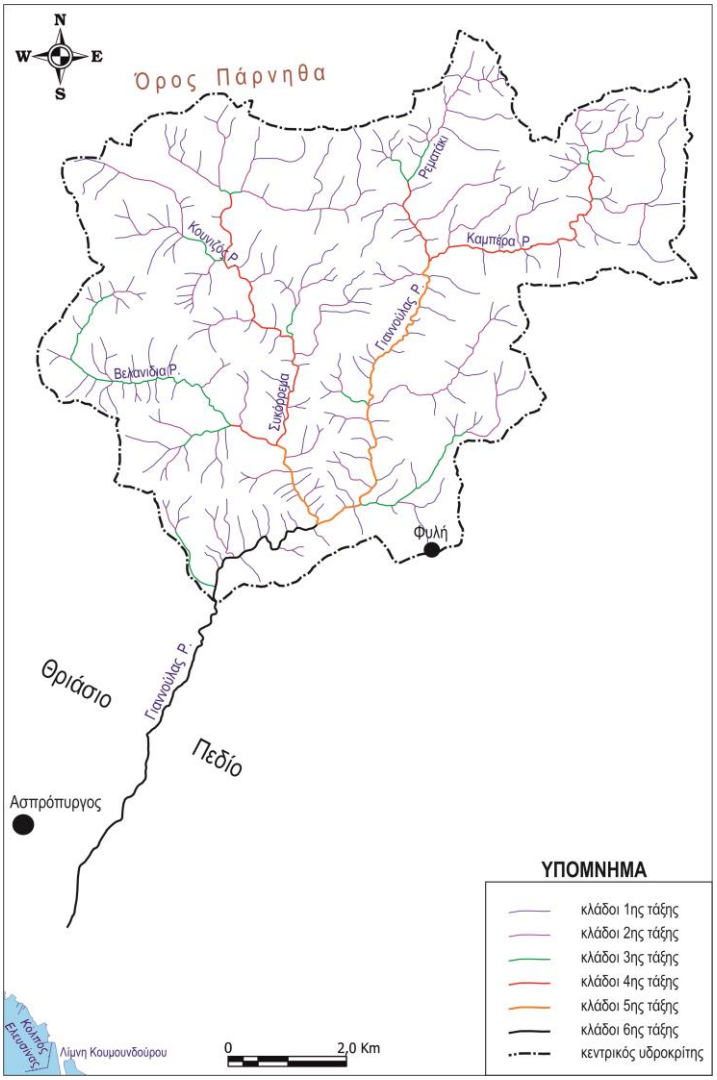
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: **Δεδομένα: Ποσοτική ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου**

Η ποσοτική γεωμορφολογική ανάλυση των υδρογραφικών δικτύων και των λεκανών απορροής είναι μια μεθοδολογική προσέγγιση, όπου μετρώντας φυσικά μεγέθη χαρακτηριστικά των ποτάμιων κλάδων και των αντίστοιχων λεκανών απορροής ή υπολογίζοντας παραμέτρους που συνδυάζουν τα μετρούμενα χαρακτηριστικά, επιχειρείται η αναζήτηση των κύριων παραγόντων που επέδρασαν στη διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου και του ανάγλυφου της λεκάνης απορροής. Τα αποτελέσματα της ποσοτικής προσέγγισης πρέπει πάντα να συνδυάζονται ή να συγκρίνονται με υπαίθριες παρατηρήσεις που αφορούν τη γεωμορφολογία της περιοχής.

Η ποσοτική γεωμορφολογική ανάλυση, πέραν του καθαρά ερευνητικού γεωμορφολογικού της ενδιαφέροντος, έχει χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς από διάφορες ερευνητικές ομάδες, τόσο διεθνείς όσο και ελληνικές, με στόχο τη διερεύνηση του ρόλου των ιδιαίτερων γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών των υδρογραφικών δικτύων και των αντίστοιχων λεκανών απορροής διαφόρων ποταμών στην εκδήλωση πλημμυρών. Στην προσπάθεια εκτίμησης του πλημμυρικού δυναμικού των λεκανών απορροής, η γεωμορφολογική ανάλυση περιλαμβάνει την επινόηση και τη μέτρηση δεικτών που ποσοτικοποιούν σημαντικές φυσιογραφικές ιδιότητες (Garbrecht-Shen, 1988). Παράμετροι όπως η μορφολογική κλίση των κοιτών, η τάξη του δικτύου που προκύπτει από την αρίθμηση των κλάδων του (κατά Strahler 1957), οι λόγοι διακλάδωσης και η διαδοχική κατά τάξη απορροή συσχετίζονται αρκετά ισχυρά με την πλημμυρική παροχή. Οι μορφομετρικές αυτές παράμετροι χρησιμεύουν, επίσης, για τη σύγκριση σε ό,τι αφορά τον πλημμυρικό κίνδυνο λεκανών με διαφορετικά μορφολογικά χαρακτηριστικά.

Η αρίθμηση του υδρογραφικού δικτύου Γιαννούλας οδήγησε στη διαπίστωση ότι αποτελείται από συνολικά 341 κλάδους εκ των οποίων 259 είναι κλάδοι 1ης τάξης, 61 κλάδοι δεύτερης τάξης, 14 κλάδοι 3ης τάξης, 4 κλάδοι 4ης τάξης, 2 κλάδοι 5ης τάξης και 1 κλάδος 6ης τάξης (Χάρτης 7). Από τους κλάδους 1ης τάξης, οι 271 απορρέουν απ' ευθείας σε κλάδους 2ης τάξης, οι 17 απορρέουν απ' ευθείας σε κλάδους 3ης τάξης, οι 21 σε κλάδους 4ης τάξης, οι 21 σε κλάδους 5ης τάξης και 11 κλάδοι

απορρέουν απ’ ευθείας στον κύριο κλάδο που είναι 6ης τάξης. Από τους κλάδους 2ης τάξης, οι 42 απορρέουν απ’ ευθείας σε κλάδους 3ης τάξης, οι 10 σε κλάδους 4ης τάξης , οι 7 σε κλάδους 5ης τάξης και 2 στον κύριο κλάδο 6ης τάξης. Από τους κλάδους 3ης τάξης, οι 2 απορρέουν απ’ ευθείας σε κλάδους 5ης τάξης και 1 κλάδος στον κύριο κλάδο 6ης τάξης. Οι ανωμαλίες στη διαδοχική κατά τάξη απορροή του δικτύου θα αναλυθούν λεπτομερώς στη συνέχεια.



Χάρτης 7: Χάρτης αρίθμησης του υδρογραφικού δικτύου του ρέματος Γιαννούλας (πηγή: Καρύμπαλης, 2011)

Στον παρακάτω πίνακα μπορούμε να δούμε τον αριθμό των κλάδων, το μήκος της κοίτης τους και το εμβαδό της λεκάνης απορροής ανά τάξη κλάδου.

ΤΑΞΗ ΚΛΑΔΟΥ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΛΑΔΩΝ	ΜΗΚΟΣ ΚΟΙΤΩΝ ΣΕ km	ΕΜΒΑΔΟ ΛΕΚΑΝΗΣ ΣΕ km^2
I	259	99,09	31,47
II	61	110,55	38,38
III	14	95,80	34,16
IV	4	122,03	42,57
V	2	164,28	57,23
VI	1	177,00	60,89

Πίνακας 5: Συνολικό μήκος και εμβαδό των κλάδων κάθε τάξης του υδρογραφικού δικτύου του ρ. Γιαννούλας (πηγή: Καρύμπαλης, 2011)

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται οι μετρούμενες και υπολογιζόμενες μορφομετρικές παράμετροι που εκτιμήθηκαν για το υδρογραφικό δίκτυο και τη λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας.

Ποσοτικές παράμετροι		Σύμβολο	Μονάδες μέτρησης
Μετρούμενες	Αριθμός κλάδου	N_u	-
	Μήκος κλάδου	L_u	km
	Έκταση λεκάνης απορροής	A_u	Km^2
Υπολογιζόμενες	Λόγος διακλάδωσης	R_b	-
	Λόγος μήκους	R_L	-
	Λόγος εμβαδού	R_A	-

Πίνακας 6: Οι ποσοτικές παράμετροι που μετρήθηκαν ή εκτιμήθηκαν για το υδρογραφικό δίκτυο του ρ. Γιαννούλας

7.1 Ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου κατά Horton

Ο Horton πρώτος (1945) υποστήριξε την άποψη ότι η ανάπτυξη κάθε υδρογραφικού δικτύου ακολουθεί ορισμένους φυσικούς νόμους. Διατύπωσε έτσι τρείς νόμους που πρέπει να διέπουν την ανάπτυξη και τη διαμόρφωση των υδρογραφικών δικτύων, όταν αυτά αναπτύσσονται σε μια περιοχή με σταθερές κλιματικές συνθήκες χωρίς τεκτονικές κινήσεις και με ενιαία λιθολογία. Ο κύριος σκοπός του ήταν να απλοποιήσει τα σύνθετα υδρολογικά φαινόμενα σε λίγα μετρούμενα μεγέθη, που έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη και τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής. Από τους τρεις αυτούς νόμους, ο πρώτος αφορά τον αριθμό

των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου, ο δεύτερος τις σχέσεις των αθροιστικών μηκών ανά τάξη και ο τρίτος τις σχέσεις των εμβαδών των λεκανών απορροής ανά τάξη.

Πρώτος Νόμος του Horton: Νόμος του αριθμού των κλάδων

Ο νόμος αυτός αναφέρεται στη σχέση του αριθμού των κλάδων κάθε υδρογραφικού δικτύου. Σύμφωνα λοιπόν με τον πρώτο νόμο του Horton, ο αριθμός των διαδοχικών μικρότερης τάξης κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου, τείνει να σχηματίσει μια αύξουσα γεωμετρική ακολουθία με πρώτο όρο τη μονάδα και λόγο τον συντελεστή διακλάδωσης.

Η μαθηματική του έκφραση είναι :

$$Nu = Rb(K-u)$$

όπου :

Nu : ο αριθμός ρευμάτων τάξης u

K : η μέγιστη τάξη

u : η ζητούμενη τάξη

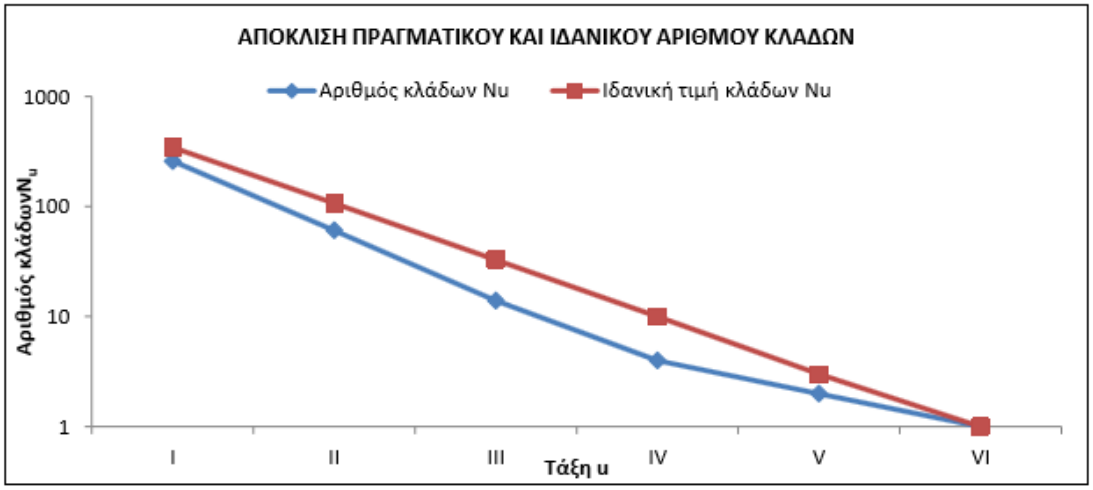
Rb : ο συντελεστής διακλάδωσης

Ο μέσος συντελεστής διακλάδωσης προκύπτει από τη σχέση $Rb = \frac{N_u}{N_{u+1}}$ και τείνει να είναι σταθερός για όλο το υδρογραφικό δίκτυο. Για τα υδρογραφικά δίκτυα που αναπτύσσονται κάτω από φυσιολογικές συνθήκες ισχύει ότι $3 \leq R_b \leq 5.$

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του 1ου νόμου του Horton για το υδρογραφικό δίκτυο του ρ. Γιαννούλας εμπεριέχονται στον παρακάτω πίνακα 7, ενώ η γραφική τους απεικόνιση φαίνεται στο ημιλογαριθμικό διάγραμμα.

Τάξη u	Αριθμός κλάδων N_u	Λόγος διακλάδωσης R_b	Μέσος λόγος διακλάδωσης R_b	Ιδανική τιμή κλάδων N_u	Απόκλιση από την ιδανική τιμή (%)
I	259	4,25	3,22	346	-25,14
II	61	4,36		107	-43,00
III	14	3,5		33	-57,58
IV	4	2		10	-60
V	2	2		3	-33,33
VI	1			1	0

Πίνακας 7: Σχέση μεταξύ των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου του ρ. Γιαννούλας σύμφωνα με τον 1ο νόμο του Horton (πηγή: Καρύμπαλης, 2011)



Σχήμα 13: Γραφική παράσταση αποκλίσεων πραγματικού και ιδανικού αριθμού κλάδων. (Πηγή: Καρύμπαλης, 2011)

Δεύτερος Νόμος του Horton: Νόμος του μήκους των κλάδων

Ο νόμος αυτός αναφέρει ότι τα αθροιστικά μέσα μήκη των διαδοχικά μεγαλύτερης τάξης κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου τείνουν να σχηματίσουν μια αύξουσα γεωμετρική ακολουθία της οποίας ο πρώτος όρος είναι το μέσο μήκος των κλάδων 1ης τάξης και λόγος ο συντελεστής μήκους.

Η μαθηματική του έκφραση είναι:

$$\Sigma MLu = ML1.RL(u-1)$$

όπου :

MLu : το μέσο μήκος των κλάδων τάξης u που προκύπτει από τη σχέση $ML_u = \frac{L_u}{N_u}$

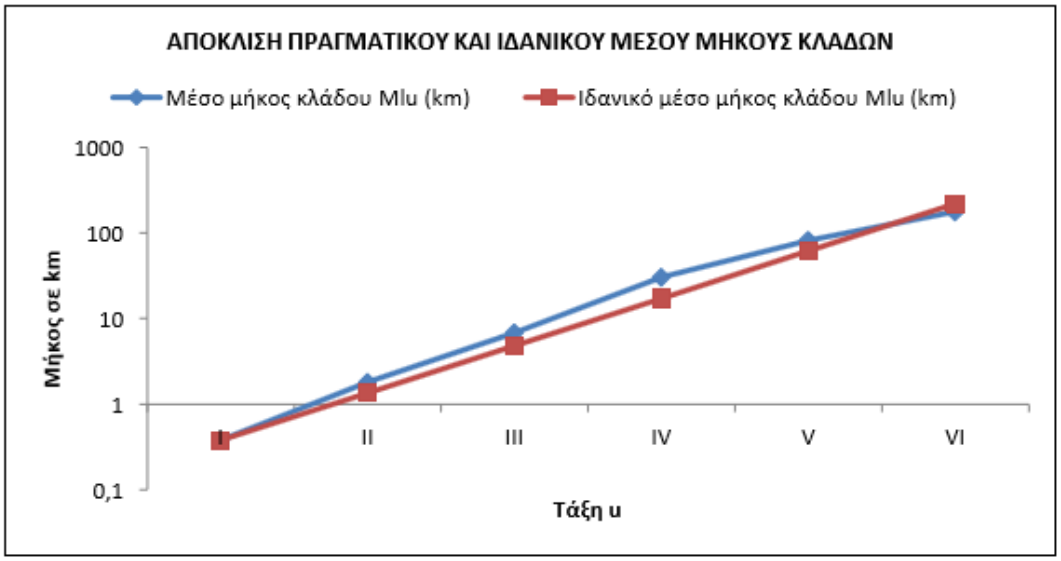
ML1 : το μέσο μήκος των κλάδων πρώτης τάξης

RL : ο συντελεστής μήκους που υπολογίζεται από τη σχέση $R_L = \frac{\Sigma[ML_u]}{\Sigma[ML_{u-1}]}$

Τα αποτελέσματα του 2ου νόμου του Horton για το υδρογραφικό δίκτυο του ρ. Γιαννούλας φαίνονται στον πίνακα 8 που ακολουθεί και γραφικά στο διάγραμμα 14.

Τάξη u	Μέσο μήκος κλάδου ML_u (km)	Λόγος μήκους R_L	Μέσος λόγος μήκους R_L	Ιδανικό μέσο μήκος κλάδου ML_u (km)	Απόκλιση από την ιδανική τιμή (%)
I	0,38	4,76	3,568	0,38	0
II	1,81			1,36	33,08
III	6,84	3,78		4,84	41,32
IV	30,51	4,46		17,26	76,76
V	82,14	2,69		61,59	33,36
VI	177,00	2,15		219,74	-19,45

Πίνακας 8: Αποτελέσματα εφαρμογής του 2ου νόμου του Horton στη λεκάνη απορροής του ρ. Γιαννούλας (πηγή: Καρύμπαλης, 2011)



Σχήμα 14: Γραφική παράσταση αποκλίσεων πραγματικού και ιδανικού μέσου μήκους κλάδων (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).

Τρίτος Νόμος του Horton: Νόμος του εμβαδού των λεκανών απορροής

Ο Horton πρώτος παρατήρησε τη σχέση μεταξύ της τάξης του κλάδου και του αντίστοιχου μέσου εμβαδού. Έτσι λοιπόν, ο τρίτος αυτός νόμος αναφέρει ότι το μέσο εμβαδό της διαδοχικά αυξανόμενης τάξης λεκανών απορροής ενός υδρογραφικού συστήματος τείνει να σχηματίσει μια αύξουσα γεωμετρική ακολουθία με πρώτο όρο το μέσο εμβαδό των λεκανών πρώτης τάξεως και λόγο το συντελεστή του εμβαδού. Η μαθηματική του έκφραση είναι η εξής :

$$MA_u = MA_1 \cdot R_A^{u-1}$$

όπου:

MAu : το μέσο εμβαδό των λεκανών τάξης u που προκύπτει από τη σχέση

$$MA_u = \frac{A_u}{N_u}$$

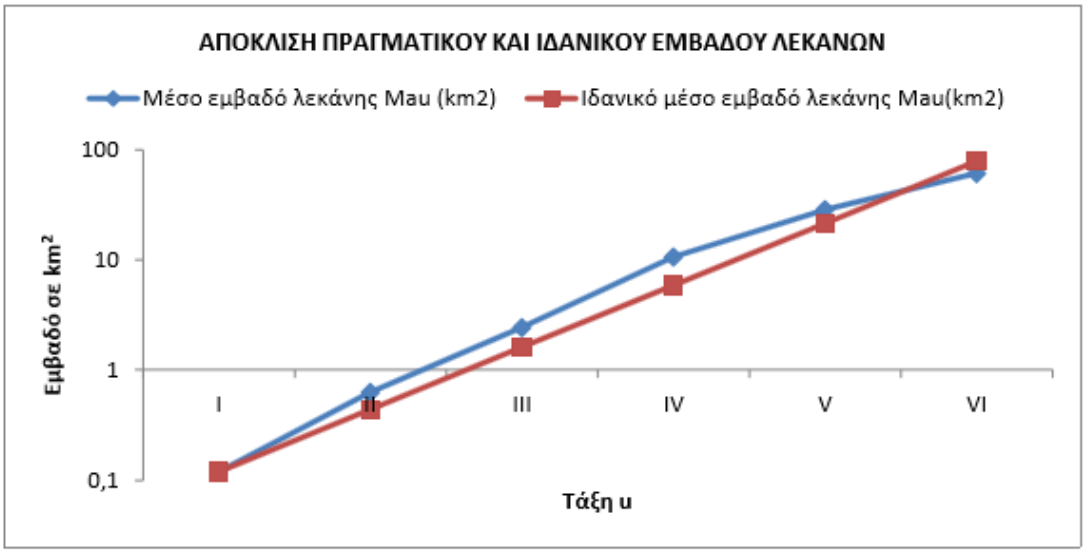
MA1 : το μέσο εμβαδό των λεκανών πρώτης τάξης

RA : ο συντελεστής εμβαδού που υπολογίζεται από τη σχέση $R_A = \frac{MA_u}{MA_{u-1}}$

Στην περίπτωση του ρ. Γιαννούλας ο 3ος νόμος του Horton δίνει τα αποτελέσματα που φαίνονται στον πίνακα 9 και γραφικά στο διάγραμμα 15.

Τάξη u	Μέσο εμβαδό λεκανών ανά τάξη MA_u (km^2)	Λόγος εμβαδού R_A	Μέσος λόγος εμβαδού R_A	Ιδανικό μέσο εμβαδό λεκάνης MA_u (km^2)	Απόκλιση από την ιδανική τιμή (%)
I	0,12	5,25	3,66	0,12	0
II	0,63			0,44	43,18
III	2,44	3,87		1,61	51,55
IV	10,64	4,36		5,88	80,95
V	28,62	2,69		21,53	32,93
VI	60,89	2,13		78,81	-22,74

Πίνακας 9: Αποτελέσματα εφαρμογής του 3ου νόμου του Horton στη λεκάνη απορροής του ρ. Γιαννούλας (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).



Σχήμα 15: Γραφική παράσταση αποκλίσεων πραγματικού και ιδανικού μέσου εμβαδού κλάδων (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).

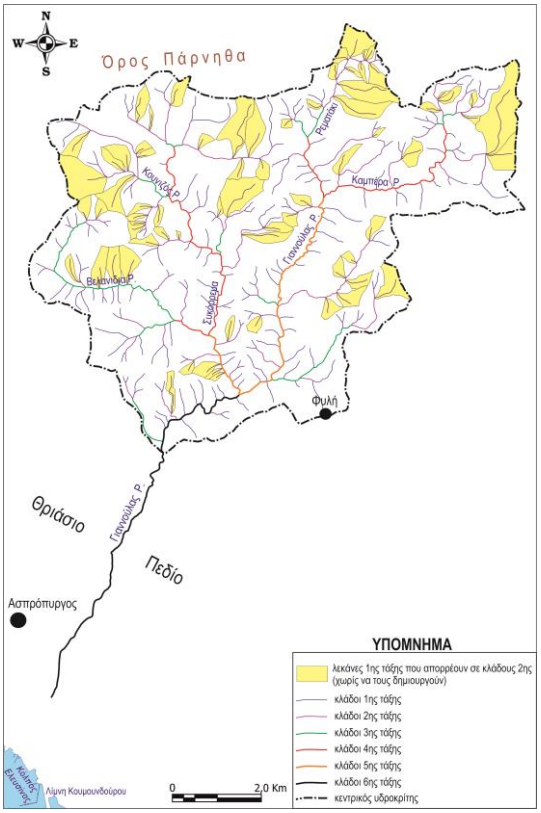
7.2 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων της εφαρμογής των Νόμων του Horton στην υδρολογική λεκάνη του ρέματος Γιαννούλας.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του 1ου νόμου στο υπό μελέτη υδρογραφικό δίκτυο δείχνει ότι τόσο οι λόγοι διακλάδωσης όσο και ο μέσος λόγος διακλάδωσης κυμαίνονται μεταξύ 2 και 4,36, γεγονός που αποτελεί ένδειξη σχετικά φυσιολογικών συνθηκών ανάπτυξης και εξέλιξης του δικτύου. Τις μεγαλύτερες τιμές εμφανίζουν οι λόγοι διακλάδωσης μεταξύ 1ης και 2ης (με τιμή 4,25) και μεταξύ 2ης και 3ης τάξης (τιμή λόγου 4,36), γεγονός το οποίο δείχνει την ύπαρξη αρκετών κλάδων πρώτης τάξης, οι οποίοι συμβάλλουν με κλάδους δεύτερης τάξης χωρίς να τους δημιουργούν. Το πλήθος των κλάδων αυτών είναι 67. Η γεωγραφική κατανομή των κλάδων αυτών φαίνεται στο χάρτη 8, όπου με κίτρινο χρώμα απεικονίζονται οι κλάδοι και οι αντίστοιχες λεκάνες 1ης τάξης που απορρέουν σε κλάδους 2ης χωρίς να τους δημιουργούν. Φαίνεται πως οι συμβολές αυτές δεν έχουν κάποια συγκέντρωση σε ένα συγκεκριμένο τμήμα της λεκάνης απορροής του ρέματος Γιαννούλας, αλλά παρουσιάζουν μια ομοιόμορφή διασπορά σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης. Εξάλλου, οι εκτάσεις που αποστραγγίζουν οι κλάδοι πρώτης τάξης είναι σχετικά μικρές, συνεπώς η παροχή των αντίστοιχων κλάδων δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική. Βέβαια, πρέπει να αναφερθεί ότι στην κλίμακα του συνόλου της λεκάνης αυτή η ανωμαλία μπορεί να θεωρηθεί σημαντική για την αύξηση της παροχής στις κεντρικές κοίτες του υδρογραφικού δικτύου σε περιπτώσεις έντονης βροχόπτωσης.

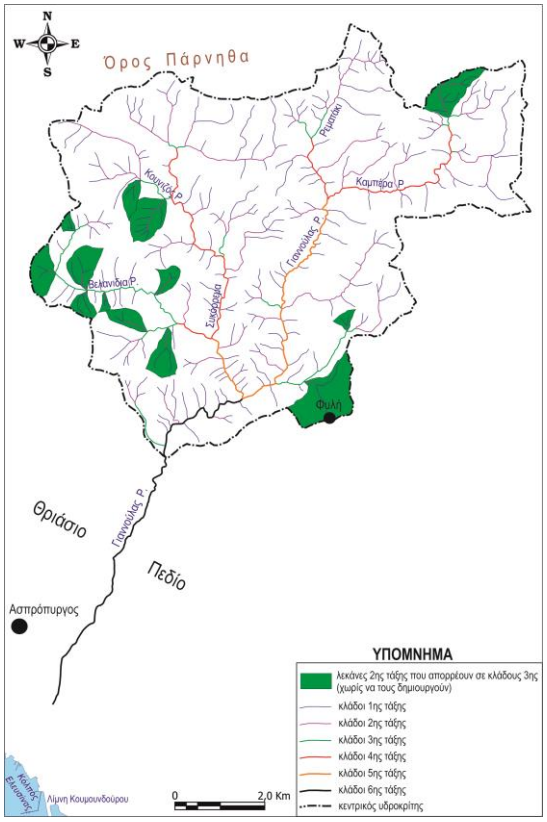
Αντίστοιχα ένας αριθμός 14 κλάδων 2ης τάξης απορρέουν άμεσα σε κλάδους 3ης τάξης χωρίς να τους δημιουργούν. Η γεωγραφική κατανομή των ποτάμιων αυτών συμβολών φαίνονται στο χάρτη 9. Ο χάρτης δείχνει ότι αρκετές λεκάνες 2ης τάξης απορρέουν απευθείας στον 3ης τάξης κλάδο του ρέματος Βελανίδια στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης, περίπου 2 km πριν την έξοδο του ρέματος Γιαννούλας από τον ορεινό όγκο και την είσοδό του στο Θριάσιο πεδίο.

Ο λόγος διακλάδωσης μεταξύ 3ης και 4ης τάξης έχει ελαφρώς μικρότερη τιμή από τους δύο προηγούμενους (τιμή λόγου 3,5). Η τιμή αυτή δηλώνει ότι 3 κλάδοι 3ης τάξης απορρέουν σε 4ης τάξης κοίτες χωρίς να τις δημιουργούν. Η γεωγραφική κατανομή των συμβολών αυτών εντοπίζονται στο ορεινό δυτικό και ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης (Χάρτης 10).

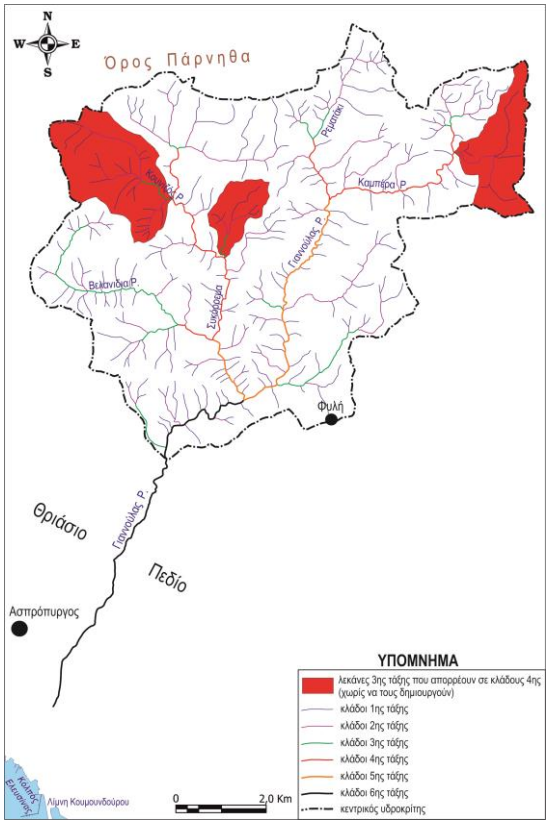
Οι υπόλοιποι δύο λόγοι διακλάδωσης είναι απολύτως φυσιολογικοί καθώς έχουν την τιμή 2.



Χάρτης 8: Χάρτης στον οποίο απεικονίζονται οι κλάδοι 1ης τάξης και οι αντίστοιχες λεκάνες απορροής τους που συμβάλλουν με κλάδους 2ης χωρίς όμως να τους δημιουργούν (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).



Χάρτης 9: Χάρτης στον οποίο απεικονίζονται οι κλάδοι 2ης τάξης και οι αντίστοιχες λεκάνες απορροής τους που συμβάλλουν με κλάδους 3ης χωρίς όμως να τους δημιουργούν (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).



Χάρτης 10: Χάρτης στον οποίο απεικονίζονται οι κλάδοι 3ης τάξης και οι αντίστοιχες λεκάνες απορροής τους που συμβάλλουν με κλάδους 4ης χωρίς όμως να τους δημιουργούν (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).

Παρόμοια, σχετικά υψηλές τιμές έχουν οι λόγοι μέσου μήκους κλάδων καθώς και οι λόγοι μέσου εμβαδού των λεκανών απορροής μεταξύ 1ης και 2ης, 2ης και 3ης και 3ης και 4ης τάξης. Οι σχετικά υψηλές αυτές τιμές μπορεί να θεωρηθούν υπεύθυνες για τις αυξημένες παροχές στην κεντρική κοίτη του ρέματος Γιαννούλας, σε περιπτώσεις ακραίων βροχοπτώσεων στα ορεινά τμήματα της λεκάνης.

Οι αποκλίσεις των πραγματικών από τις ιδανικές τιμές για τον αριθμό των κλάδων είναι αρνητικές και υψηλές, με τις μεγαλύτερες να αφορούν την 3^{η} τάξη (απόκλιση -57,58%) και 2η τάξη απόκλιση (-43,00 %). Οι αρνητικές αποκλίσεις δείχνουν ότι το υδρογραφικό δίκτυο δεν έχει αναπτυχθεί ικανοποιητικά ως προς το πλήθος των κλάδων, ώστε να αποστραγγίζεται επιφανειακά η περιοχή ικανοποιητικά. Ένας από τους λόγους της ελλιπούς ανάπτυξης των κλάδων του δικτύου είναι πιθανά η λιθολογία των γεωλογικών σχηματισμών που καταλαμβάνουν τη λεκάνη. Σημαντική έκταση της λεκάνης καταλαμβάνεται από ασβεστόλιθους και δολομίτες που θεωρείται ότι η υδρολιθολογική τους συμπεριφορά ευνοεί την κατείσδυση και όχι τόσο την επιφανειακή απορροή και, άρα δεν ευνοείται η ανάπτυξη μεγάλου αριθμού κλάδων. Επιπλέον, κάποιο ρόλο στη μη ανάπτυξη κλάδων πιθανά παίζει η περιορισμένη βροχόπτωση, που χαρακτηρίζει την περιοχή σε ετήσια βάση. Παρότι η δυναμική των κεντρικών κοιτών του υδρογραφικού δικτύου γίνεται ιδιαίτερα σημαντική σε

μεμονωμένες περιπτώσεις ακραίων βροχοπτώσεων στη διάρκεια του έτους, οι περιορισμένες βροχοπτώσεις έχουν σαν αποτέλεσμα την περιοδική ή εφήμερη ροή και όχι μόνιμη ροή σε όλες τις κοίτες.

Αντίθετα, οι αποκλίσεις τόσο των μέσων μηκών των κλάδων όσο και των μέσων εμβαδών των λεκανών απορροής είναι θετικές και υψηλές, με την 4η τάξη να εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές. Η υπερανάπτυξη του μήκους των κλάδων πιθανά οφείλεται στη λιθολογία της λεκάνης που κυριαρχείται από ασβεστόλιθους που ευνοούν μικρό αριθμό κλάδων μεγάλου όμως σχετικά μήκους. Σε ό,τι αφορά τις λεκάνες απορροής, τα μεγάλα μεγέθη αποτελούν ένδειξη ενός προχωρημένου σταδίου εξέλιξης. Οι αρνητικές αποκλίσεις τόσο των μηκών όσο και των εμβαδών για την 6η τάξη μπορεί να αποδοθεί στο ότι η λεκάνη απορροής κλείνει σε αρκετά μεγάλη απόσταση από τις εκβολές του ρέματος στον κόλπο της Ελευσίνας (περίπου 7 km ανάντη των εκβολών), συνεπώς υπάρχει ένα μεγάλο μήκος κεντρικής κοίτης 6ης τάξης που δεν συμπεριλαμβάνεται στην ποσοτική ανάλυση (Καρυμπαλης, 2011)

7.3 Διαδοχική κατά τάξη απορροή

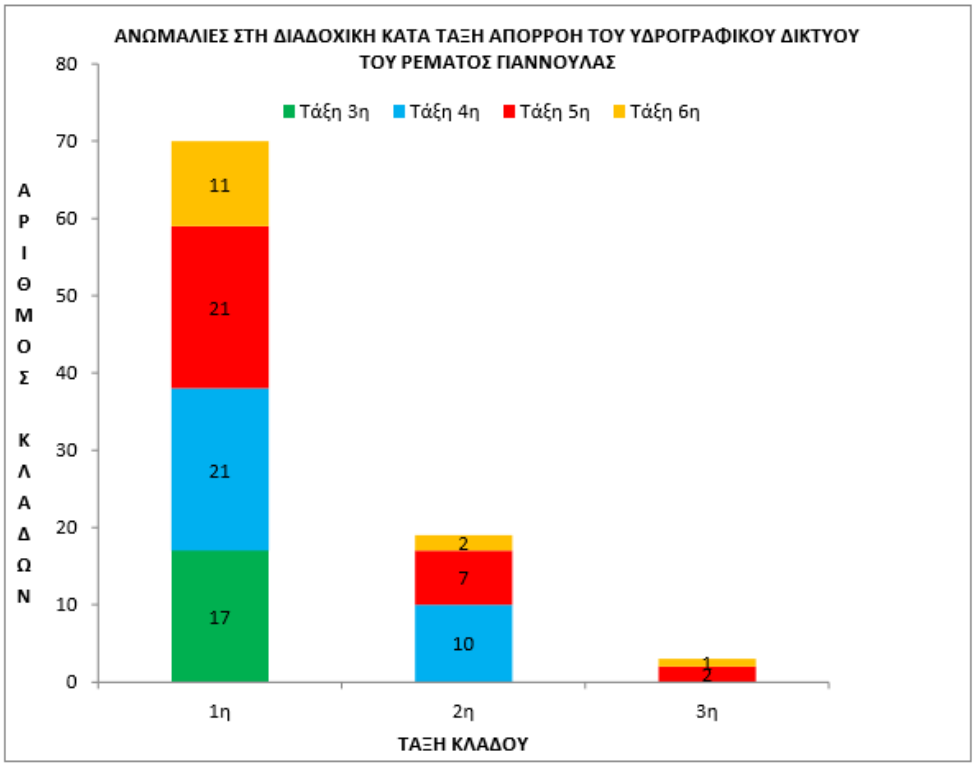
Στο πλαίσιο της αναζήτησης των φυσικών αιτιών εκδήλωσης πλημμυρικών συμβάντων στον κάτω ρου του ρέματος Γιαννούλας, επιχειρήθηκε η διερεύνηση της διαδοχικής κατά τάξη απορροής του υδρογραφικού δικτύου. Σκοπός είναι η αναζήτηση ανωμαλιών στη φυσιολογική αποστράγγιση της περιοχής καθώς και η γεωγραφική θέση των ανωμαλιών αυτών. Με τον όρο ανωμαλίες στη διαδοχική κατά τάξη απορροή ενός υδρογραφικού δικτύου νοείται η άμεση απορροή κλάδων μιας τάξης σε κλάδους όχι της επόμενης, αλλά δύο μεγαλύτερων τάξεων. Για παράδειγμα, ανωμαλία θεωρείται όταν ένας κλάδος πρώτης τάξης συμβάλλει με έναν κλάδο τρίτης τάξης, συνεπώς δεν παρεμβάλλεται μεταξύ τους η δεύτερη τάξη. Οι ανωμαλίες αυτές εκφράζονται τόσο με το πλήθος των κλάδων που συμβάλλουν με τον τρόπο αυτό, όσο και με το συνολικό μήκος των κοιτών τους, αλλά κυρίως με το συνολικό εμβαδόν των εκτάσεων που αποστραγγίζουν επιφανειακά.

Έχει διαπιστωθεί ότι οι ανωμαλίες στη διαδοχική κατά τάξη απορροή, οι οποίες σχετίζονται με την οργάνωση του υδρογραφικού δικτύου, είναι αιτία για την αυξημένη παροχή στις κεντρικές μεγάλων τάξεων κοίτες σε περιπτώσεις έντονης βροχόπτωσης, επομένως αποτελούν μια βασική αιτία εκδήλωσης πλημμυρών.

Οι ανωμαλίες στην οργάνωση του υδρογραφικού δικτύου του ρέματος Γιαννούλας συνοψίζονται στον Πίνακα 10 και απεικονίζονται γραφικά στο διάγραμμα 16.

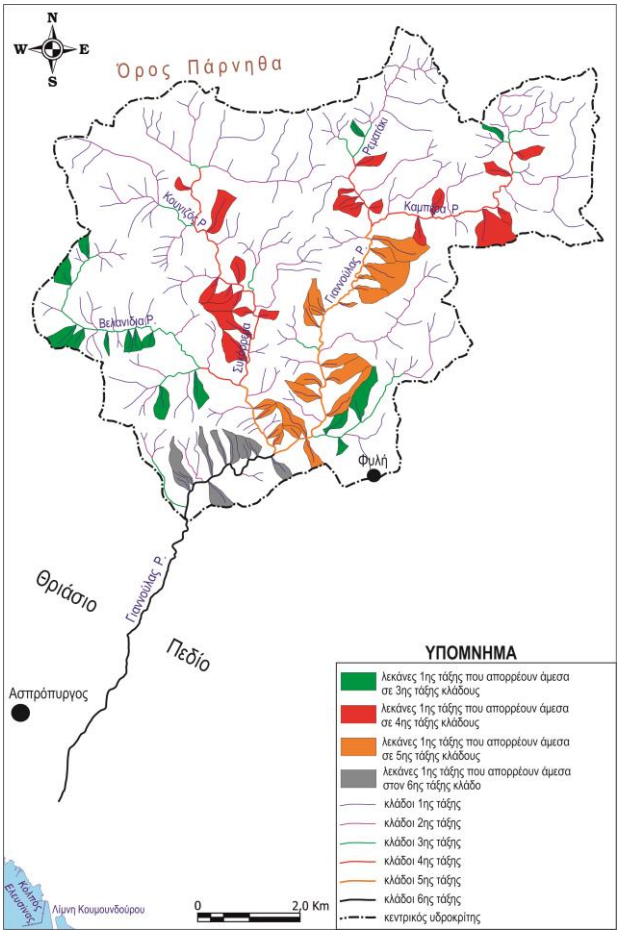
ΤΑΞΗ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΛΑΔΩΝ	ΠΟΣΟΣΤΟ %	ΜΗΚΟΣ ΚΛΑΔΩΝ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΗΚΟΥΣ %	ΕΜΒΑΔΟ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΜΒΑΔΟΥ %
$1_{ης}$ σε $3_{ης}$	17	6,57	7,32	7,39	1,91	6,07
$1_{ης}$ σε $4_{ης}$	21	8,11	8,00	8,07	2,24	7,12
$1_{ης}$ σε $5_{ης}$	21	8,11	8,80	8,88	2,30	7,31
$1_{ης}$ σε $6_{ης}$	11	4,25	4,58	4,62	0,94	2,99
$2_{ης}$ σε $4_{ης}$	10	16,40	19,49	17,63	6,28	16,36
$2_{ης}$ σε $5_{ης}$	7	11,48	13,58	12,28	4,43	11,54
$2_{ης}$ σε $6_{ης}$	2	3,28	2,88	2,61	0,53	1,38
$3_{ης}$ σε $5_{ης}$	2	14,29	11,37	11,87	4,67	13,67
$3_{ης}$ σε $6_{ης}$	1	7,15	2,85	2,97	0,72	2,11

Πίνακας 10: Ανωμαλίες στη διαδοχική κατά τάξη απορροή του υδρογραφικού δικτύου του ρέματος Γιαννούλας. Στον πίνακα περιλαμβάνονται το πλήθος των κλάδων κάθε τάξης που απορρέουν άμεσα σε κλάδους μεγαλύτερης τάξης, το μήκος των κοιτών τους (σε km) και το εμβαδό των λεκανών απορροής τους (σε km2) καθώς και τα αντίστοιχα ποσοστά (%) στο σύνολο της κάθε τάξης (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).



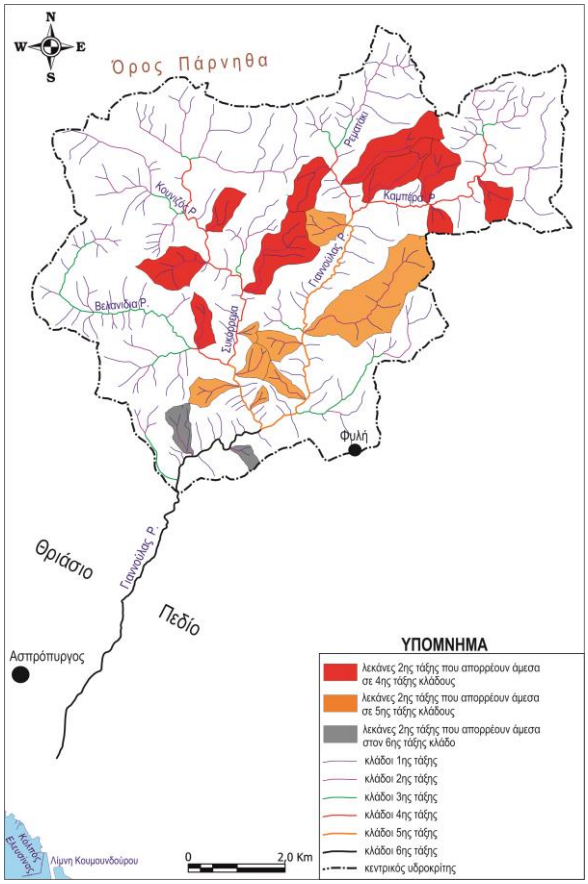
Σχήμα 16 : Γραφική απεικόνιση των ανωμαλιών στη διαδοχική κατά τάξη απορροή του υδρογραφικού δικτύου του ρέματος Γιαννούλας (Πηγή: Καρύμπαλης, 2011).

Για την 1η τάξη οι μεγαλύτερες ανωμαλίες εντοπίζονται στους κλάδους που απορρέουν άμεσα σε κλάδους 4ης και 5ης τάξης. Συγκεκριμένα, 21 κλάδοι 1ης, που αντιστοιχούν στο 8,11% του πλήθους της τάξης αυτής, απορρέουν άμεσα σε κεντρικές κοίτες 4ης τάξης. Τα αντίστοιχα ποσοστά του μήκους κοιτών και εμβαδών λεκανών απορροής είναι 8,07% και 7,12%. Ο ίδιος ακριβώς αριθμός κλάδων 1ης συμβάλλουν με κλάδους 5ης τάξης. Τα ποσοστά μήκους και εμβαδού λεκανών είναι παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση. Η γεωγραφική κατανομή των συμβολών αυτών εντός της λεκάνης απορροής φαίνονται στο χάρτη 11. Γίνεται φανερό ότι ο μεγαλύτερος αριθμός των κλάδων αυτών 1ης τάξης συμβάλλουν με τις δύο μεγάλες κεντρικές κοίτες του υδρογραφικού δικτύου που είναι το ρέμα Γιαννούλας (το τμήμα της διαδρομής του που είναι 5ης τάξης και η 4ης τάξης προέκτασή του στα ανάντη – ρέμα Καμπέρα) και το Συκόρεμμα που είναι η δεύτερη μεγάλη κεντρική κοίτη του δικτύου.



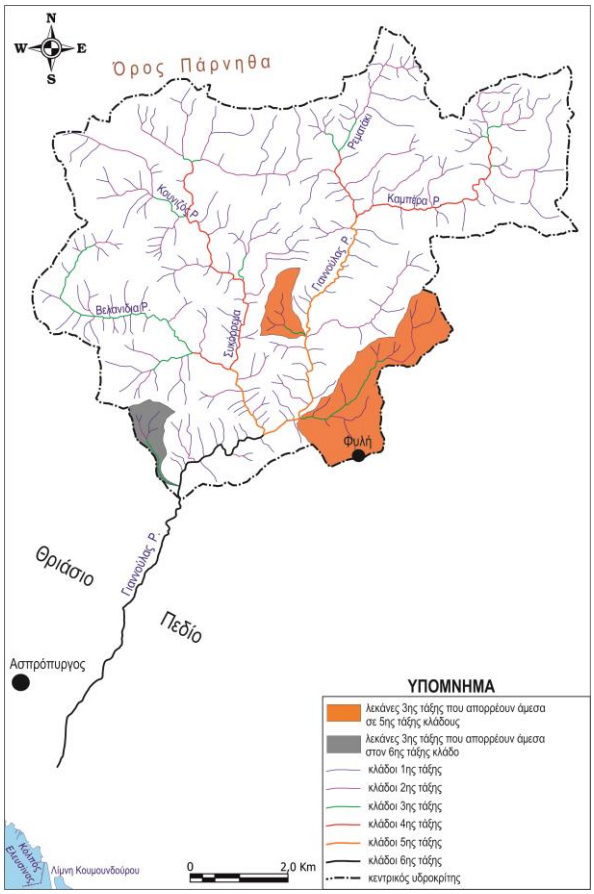
Χάρτης 11: Χάρτης στον οποίο απεικονίζονται οι κλάδοι 1ης τάξης και οι αντίστοιχες λεκάνες απορροής τους που απορρέουν άμεσα σε κλάδους τάξεων μεγαλύτερων της 2ης (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).

Για τη 2η τάξη οι μεγαλύτερες ανωμαλίες εντοπίζονται σε κλάδους που συμβάλλουν άμεσα με κλάδους 4ης και 5ης τάξης. Η μεγαλύτερη ανωμαλία στη διαδοχική κατά τάξη απορροή όλου του δικτύου αφορά τα ρέματα 2ης τάξης που καταλήγουν σε 4ης και 5ης τάξης κοίτες. Δέκα από τα ρέματα 2ης τάξης (που αντιστοιχούν στο 16,4 % του πλήθους της τάξης αυτής) χύνονται σε κλάδους 4ης. Τα ποσοστά μήκους κοιτών και εμβαδού λεκανών είναι 17,63 % και 16,36 % αντίστοιχα. Επιπλέον, 7 κλάδοι (το 11,48 %) με μήκος κοιτών και εμβαδό λεκανών που αντιστοιχεί στο 12,28 % και 11,54 % αντίστοιχα απορρέουν άμεσα στους δύο κλάδους 5ης τάξης. Γεωγραφικά, οι συμβολές αυτές εντοπίζονται κατά μήκος της κοίτης του Συκορέματος και, κυρίως, κατά μήκος της κεντρικής κοίτης του ρέματος Γιαννούλας, με το οποίο συμβάλλουν οκτώ κλάδοι σε σχετικά μικρές μεταξύ τους αποστάσεις (χάρτης 12).



Χάρτης 12 : Χάρτης στον οποίο απεικονίζονται οι κλάδοι 2ης τάξης και οι αντίστοιχες λεκάνες απορροής τους που απορρέουν άμεσα σε κλάδους τάξεων μεγαλύτερων της 3ης (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).

Για την 3η τάξη οι ανωμαλίες στη διαδοχική κατά τάξη απορροή εντοπίζονται σε 2 κλάδους (ποσοστό 14,29% του πλήθους της τάξης) που απορρέουν άμεσα σε 5ης τάξης ρέματα. Πρόκειται για τους κλάδους ΙΙΙ8 και ΙΙΙ14 που συμβάλλουν με την κεντρική κοίτη του ρέματος Γιαννούλας 5,58 και 3,67 km ανάντη της εξόδου του ρέματος από τους ορεινούς όγκους και της εισόδου του στην πεδινή περιοχή του Θριάσιου. Πέραν αυτών που καταλήγουν στους 5ης, ο κλάδος ΙΙΙ1 απορρέει άμεσα στην κεντρική κοίτη του ρ. Γιαννούλας σχεδόν στην είσοδό του στο Θριάσιο (μόλις 265 m ανάντη της εξόδου από τη λεκάνη απορροής) (Χάρτης 13). Αυτό σημαίνει ότι, σε περίπτωση έντονων βροχοπτώσεων στον ορεινό όγκο της Πάρνηθας, ποσότητα νερού που προέρχεται από την επιφανειακή απορροή μια έκτασης 5,31 km^2 καταλήγει άμεσα στην κεντρική κοίτη του ρέματος, ενισχύοντας την ήδη αυξημένη παροχή της κοίτης σε μια περιοχή όπου οι ανθρωπογενείς επεμβάσεις είναι ιδιαίτερα έντονες, με αποτέλεσμα την καταγραφή ιδιαίτερα αυξημένων πλημμυρικών απορροών.



Χάρτης 13: Χάρτης στον οποίο απεικονίζονται οι κλάδοι 3ης τάξης και οι αντίστοιχες λεκάνες απορροής τους που απορρέουν άμεσα σε κλάδους τάξεων μεγαλύτερων της 4ης (πηγή: Καρύμπαλης, 2011).

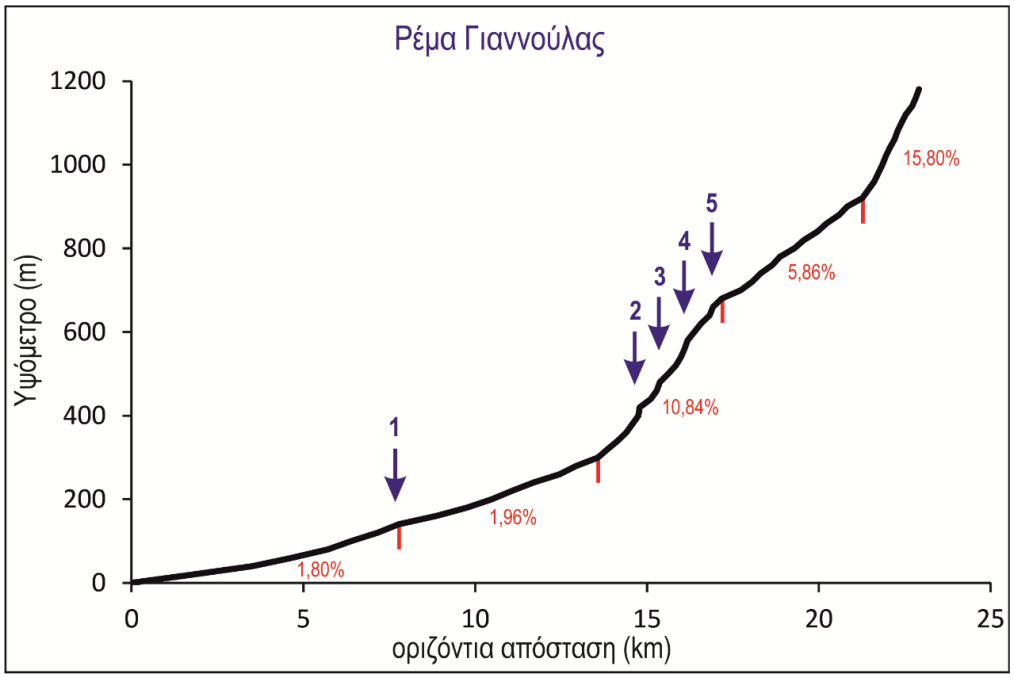
7.4 Επιμήκης τομή της κεντρικής κοίτης του υδρογραφικού δικτύου του ρέματος Γιαννούλας

Η διερεύνηση των φυσικών αιτιών εκδήλωσης πλημμυρών στον κάτω ρου της κεντρικής κοίτης του ρέματος Γιαννούλας περιλαμβάνει και τη σχεδίαση και ανάλυση της επιμήκης τομής της κεντρικής κοίτης του ρέματος. Η διαδρομή που ακολουθήθηκε για τη σχεδίαση της επιμήκης τομής φαίνεται στο παραπάνω χάρτη. Το επίμηκες προφίλ των ποταμών είναι η απεικόνιση του υψομετρου της κοίτης σε σχέση με την απόσταση από την εκβολή ή τη συμβολή του ποταμού με κάποιο μεγαλύτερο ποτάμι και είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την ποτάμια γεωμορφολογία. Η μορφή του προφίλ αποτελεί ένδειξη της «ωριμότητας» ή «νεότητας» του ποταμού καθώς και των παραγόντων που έχουν επιδράσει στην περιοχή. Οι παράγοντες που θεωρούνται σημαντικοί για τη διαμόρφωση του προφίλ είναι το κλίμα, που είναι προφανές ότι επηρεάζει την παροχή του ποταμού, η λιθολογία των σχηματισμών που διαρρέει το ποτάμι και, κυρίως, το κατά πόσο ευδιάβρωτοι ή δυσδιάβρωτοι είναι στο νερό της βροχής καθώς και ο τεκτονισμός. Ο τεκτονισμός αποτελεί έναν ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα για την περιοχή της Ελλάδας, καθώς προκαλεί την ανύψωση κάποιων περιοχών ή τη βύθιση κάποιων άλλων με σχετικά μεγάλους ρυθμούς (Maroukian et al., 2008). Οι κινήσεις αυτές επηρεάζουν τη διαδρομή των κεντρικών κοιτών των ποταμών και αντικατοπτρίζονται με πολύ εμφανή τρόπο σε περιπτώσεις που η παροχή δεν είναι ικανή να αντισταθμίσει τις κινήσεις αυτές, διαβρώνοντας τους γεωλογικούς σχηματισμούς από τους οποίους διέρχεται (Γάκη-Παπαναστασίου κ.α., 2006). Επιπλέον, σε αρκετές περιπτώσεις σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η κάλυψη γης καθώς και οι ανθρωπογενείς επεμβάσεις όπως οι αμμοληψίες, η κατασκευή φραγμάτων κλπ.

Η κεντρική κοίτη του ρέματος έχει συνολικό μήκος 22,9 km περίπου, ξεκινώντας από απόλυτο υψόμετρο 1180 m και καταλήγοντας στον κόλπο της Ελευσίνας. Το κατώτερο τμήμα της διαδρομής της κεντρικής κοίτης εκτείνεται από τις εκβολές έως το υψόμετρο των 140 m που το ρέμα εγκαταλείπει τον ορεινό όγκο της λεκάνης απορροής και εισέρχεται στην πεδινή περιοχή του Θριάσιου, όπου έχει διαμορφώσει με την απόθεση των φερτών υλών του ένα αλλουβιακό ριπίδιο. Στο μήκους 7,8 km τμήμα αυτό της διαδρομής του η μέση κλίση της κοίτης είναι 1,80% και, όπως φαίνεται από το γεωλογικό χάρτη της περιοχής, διαρρέει τις ίδιες του τις αποθέσεις στο κατώτερο τμήμα και παλαιές ποταμοχειμάρριες αποθέσεις Πλειστοκαινικής ηλικίας, που έχουν τη μορφή μερικώς συνεκτικοποιημένων

κροκαλοπαγών. Κατά την έρευνα πεδίου διαπιστώθηκε ότι, στο ανώτερο κομμάτι αυτού του τμήματος, το ποτάμι διαβρώνει σε βάθος τις αποθέσεις αυτές, γεγονός που αποδεικνύει τη μεγάλη του δυναμική. Δεδομένου ότι το ρέμα είναι περιοδικής ροής, η δυναμική αυτή περιορίζεται σε συγκεκριμένα επεισόδια αυξημένης παροχής, λόγω έντονης βροχόπτωσης στο ορεινό τμήμα της λεκάνης.

Το επόμενο τμήμα της επιμήκους τομής της κοίτης έχει μήκος 6,1 km και μέση μορφολογική κλίση 1,96 % ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή του κατώτερου τμήματος. Το όριο μεταξύ των δύο αυτών τμημάτων αντιστοιχεί σε ένα σημείο καμπής, το οποίο οφείλεται σε λιθολογικά αίτια, καθώς στο ανώτερο τμήμα η κοίτη διαβρώνει ασβεστόλιθους και δολομίτες μεγάλης αντοχής στη διάβρωση, ενώ στο κατώτερο τμήμα διαβρώνει μικρότερης ανθεκτικότητας στη διάβρωση Πλειστοκαινικές ποταμοχειμάρριες αποθέσεις. Το τμήμα αυτό αντιστοιχεί στη διαδρομή του ρέματος στο κατώτερο τμήμα της λεκάνης απορροής πριν την έξοδο στο αλλουβιακό ριπίδιο. Ρέει ως επί το πλείστον σε ασβεστόλιθους και το ανώτερο όριο αυτού του τμήματος φθάνει σε υψόμετρο 320 m.



Σχήμα 17: Επίμηκες προφίλ (τομή) της κεντρικής κοίτης του ρέματος Γιαννούλας. Η κοίτη έχει διαιρεθεί σε πέντε επιμέρους τμήματα διαφορετικής μορφολογικής κλίσης. Με τα βέλη μπλε χρώματος σημειώνονται τα σημεία κάμψης που αντιστοιχούν σε απότομες αλλαγές της κλίσης κατά μήκος της κοίτης.(πηγή: Καρύμπαλης, 2011)

Κατά μήκος του τρίτου τμήματος της διαδρομής του ο χείμαρρος έχει τη μεγαλύτερη μορφολογική κλίση που φθάνει το 10,84%. Ρέει σε ασβεστόλιθους και δολομίτες και έχει διαμορφώσει ένα εντυπωσιακό φαράγγι ύψους περίπου 250 m εξαιτίας της κατά βάθους διάβρωσης. Στο τμήμα αυτό του χειμάρρου η επιμήκης τομή έδειξε την παρουσία τεσσάρων σημείων καμπής, που πιθανά οφείλονται σε τεκτονικά αίτια (παρουσία κάποιων μικρών ρηγμάτων) ή σε σημεία που η λιθολογία των ασβεστόλιθων είναι περισσότερο ανθεκτική, οπότε η διαφορική διάβρωση δίνει αυτή τη χαρακτηριστική μορφή σκαλοπατιού.

Τα δύο ανώτερα (ορεινά) τμήματα της κεντρικής κοίτης του ρέματος έχουν μήκη 4,1 και 1,6 km αντίστοιχα και η μέση κλίση κοίτης φθάνει το 5,86% και 15,80%. Η μικρότερη κλίση του τέταρτου τμήματος οφείλεται στο ότι η κοίτη ακολουθεί τεκτονική επαφή (εφίππευση) που φέρνει σε επαφή σχετικά ευδιάβρωτους σχιστόλιθους με ασβεστόλιθους και δολομίτες. Αντίθετα, στο ανώτερο τμήμα η κοίτη ρέει σε δυσδιάβρωτους ασβεστόλιθους.

Η γενική μορφή της επιμήκους τομής δεν αντιστοιχεί σε έναν εξισορροπημένο ποταμό, έναν δηλαδή ποταμό που έχει έρθει σε ισορροπία με τις συνθήκες στις οποίες αναπτύσσεται και έχει αποκτήσει κλίση ικανή να μεταφέρει όλες τις φερτές του ύλες με τη διαθέσιμη παροχή του, αλλά αντίθετα δείχνει ένα ποτάμι που η κοίτη του αντικατοπτρίζει την επίδραση της λιθολογίας των πετρωμάτων της λεκάνης απορροής και του τεκτονισμού.

Σε ό,τι αφορά τον πλημμυρικό κίνδυνο, γίνεται φανερό ότι η επιμήκης τομή του κεντρικού κλάδου χωρίζεται στα ανάντη τμήματα που χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλές τιμές μορφολογικής κλίσης, όπου δηλαδή η κοίτη είναι απόκρημνη, και τα κατάντη (κυρίως τη διαδρομή στο Θριάσιο πεδίο), όπου η κλίση της κοίτης είναι ήπια. Αυτό σημαίνει ότι σε περιπτώσεις έντονης βροχόπτωσης, στα ανάντη η επιφανειακή απορροή που προκαλείται από την αποστράγγιση του ορεινού τμήματος της λεκάνης θα συγκεντρωθεί στην κεντρική κοίτη σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, καθώς η κλίση της κοίτης είναι μεγάλη και άρα η ταχύτητα ροής επίσης μεγάλη. Η συγκέντρωση της αυξημένης ροής στον μικρής κλίσης κάτω ρου του χειμάρρου, οδηγεί σε συσσώρευση των νερών της βροχής ενισχύοντας τα πλημμυρικά φαινόμενα. Ιδιαίτερα αρνητικό είναι, ότι το τμήμα μικρής κλίσης είναι αυτό που έχει υποστεί τις μεγαλύτερες ανθρωπογενείς επεμβάσεις, με κυριότερες τον περιορισμό της φυσικής κοίτης και την παντελή κάλυψη αυτής πριν την φυσική της εκβολή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Ανάπτυξη του υδρολογικού μοντέλου

8.1 Γενικά

Βασικός παράγοντας για την υδρολογική ανάλυση είναι το υδατικό ισοζύγιο: όρος που αναφέρεται στην είσοδο (επιφανειακή και υπόγεια εισροή, ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και προσαγόμενο νερό), και στην έξοδο του νερού σε μια περιοχή (επιφανειακή και υπόγεια εκροή, εξάτμιση ελεύθερης επιφάνειας νερού, εξατμισοδιαπνοή κ.ά.), καθώς και στις μεταβολές στην αποθήκευση του επιφανειακού και του υπόγειου νερού (ελάττωση και αύξηση επιφανειακής αποθήκευσης, ελάττωση και αύξηση υπόγειας αποθήκευσης).

Ποσοτικά ο ορισμός αυτός υπολογίζεται με τον εξής τύπο:

$$P=E+I+R\ ,$$

όπου P: τα κατακρημνίσματα, E: η εξατμισοδιαπνοή, I: η κατείσδηση και R: η απορροή.

Γενικότερα, τα ποτάμια πλημμυρικά φαινόμενα προξενούνται, όταν αφενός μεν, το ύψος βροχόπτωσης παρουσιάζει τέτοιες τιμές οι οποίες υπερβαίνουν την ικανότητα του εδάφους να απορροφήσει το νερό και αφετέρου, όταν δεν επιτρέπουν στο υδρογραφικό δίκτυο να αποστραγγίσει το νερό που συγκεντρώνεται ως επιφανειακή απορροή. Μετά από την έναρξη μιας ακραίας βροχόπτωσης, παρατηρείται μείωση της μεταφορικής ικανότητας του υδρογραφικού δικτύου με αποτέλεσμα το πλεόνασμα νερού να υπερχειλίζει την κοίτη του ποταμού, προξενώντας ακραίες πλημμυρικές παροχές αιχμής. Είναι συχνό φαινόμενο τέτοιες πλημμυρικές παροχές να δημιουργούν δυσμενείς κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπως ανθρώπινες απώλειες, φθορές σε κτίρια, υποδομές και γεωργικές εκτάσεις καθώς και την υποβάθμιση περιβαλλοντικά σημαντικών εκτάσεων (Καρύμπαλης, κ.α. 2014).

Στα πλαίσια της μελέτης αυτής, σημασία θα δώσουμε στην επιφανειακή απορροή και θα μελετήσουμε την διεύθυνση, την συσσώρευση και το μήκος της ροής, με την αξιοποίηση αυτοποιημένων και ημιαυτοποιημένων διαδικασιών στο Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών ArcGIS. Πραγματοποιείται μια προσπάθεια για την μοντελοποίηση-προσομοίωση της επιφανειακής απορροής σε υπολεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας, η οποία είναι άμεσα συσχετιζόμενη με καταστροφικά πλημμυρικά επεισόδια. Για τον σκοπό αυτό, αξιοποιούμε ένα χωρικά κατανεμημένο

μοντέλο βροχής-απορροής, το οποίο αναπτύχθηκε από τον Maidment (1993) και σχετίζεται με την υδρολογική ανάλυση μιας λεκάνης απορροής σε περιβάλλον ArcGIS 9.3, με τη χρήση ψηφιδωτών δεδομένων (raster grid). Ο κύριος στόχος μας είναι η κατασκευή ενός άμεσου συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος για μια ακραία βροχόπτωση, εκτιμώντας την απόκριση της ροής του ρέματος στην έξοδο της λεκάνης, αλλά και σε άλλα σημαντικά σημεία του ρέματος Γιαννούλας.

Με τη χρήση βασικών εργαλείων υδρολογικής ανάλυσης αλλά και ανάλυσης επιφάνειας, τα οποία παρέχονται από το λογισμικό ArcGIS, προέκυψαν επίπεδα πληροφορίας τα οποία θα περιγραφούν στη συνέχεια. Η δημιουργία ενός DEM (Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους), υψηλής ανάλυσης, θεωρείται υψίστης σημασίας για την επιτέλεση των προαναφερθέντων λειτουργιών και την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος. Το τελικό στάδιο της μεθοδολογίας ανάπτυξης του μοντέλου, αποτελεί η εξαγωγή ενός επιπέδου, το οποίο αποτυπώνει τον χρόνο συρροής του νερού. Με την επαναταξινόμηση του επιπέδου αυτού σε διακριτά διαστήματα (π.χ μιας ώρας), οδηγούμαστε στην σύνθεση των ισόχρονων καμπυλών, από τις οποίες είμαστε σε θέση να παράγουμε ένα διάγραμμα χρόνου επιφάνειας για την κίνηση του νερού στην λεκάνη για ένα συγκεκριμένο πλημμυρικό επεισόδιο, καθώς και το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα γι' αυτό (Kalogeropoulos et al 2012, Gioti et al 2013).

8.2 Δεδομένα:

Για την μοντελοποίηση της επιφανειακής απορροής, η οποία είναι άμεσα συνδεδεμένη με πλημμυρικά καταστροφικά φαινόμενα, απαιτούνται συγκεκριμένα δεδομένα τα οποία διακρίνονται στα εξής:

- Δεδομένα υποβάθρου: Τοπογραφικά δεδομένα (ψηφιοποίηση ισοϋψών καμπυλών με ισοδιάσταση 20 m στον χάρτη της ΓΥΣ κλίμακας 1:50.000 που αναφέρονται στην υπολεκάνη της περιοχής μελέτης)
- Χωρικά δεδομένα-δευτερογενή θεματικά επίπεδα: α) Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM) της λεκάνης απορροής του παραπόταμου του ρέματος Γιαννούλας, β) Επίπεδο συντελεστή τραχύτητας κατά Manning της περιοχής μελέτης.

- Βροχομετρικά δεδομένα: Προκειμένου να επιτευχθεί η υλοποίηση και ανάπτυξη του υδρολογικού μοντέλου, μελετήθηκε στην περιοχή μελέτης μας το πλημμυρικό επεισόδιο που έλαβε χώρα στην λεκάνη απορροής του ποταμού Γιαννούλας, το Νοέμβριο του 1977.

8.3 Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (ΨΜΕ-DEM)

Τα Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (ΨΜΕ) αποτελούν μαθηματικά μοντέλα, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεταβλητές, τιμές, εξισώσεις, διαδικασίες κλπ, ενώ υλοποιούνται με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστικών συστημάτων. Σύμφωνα με τους Miller και Laflamme του MIT το 1958, ως ΨΜΕ ορίζεται «μια στατιστική αναπαράσταση της συνέχειας της επιφάνειας του εδάφους από ένα μεγάλο αριθμό από επιλεγμένα σημεία με γνωστές τις X,Y,Z συντεταγμένες τους σε ένα επίπεδο συντεταγμένων» (Miller and Laflamme 1958, Weibel and Heller 1991).

Επομένως, ως ΨΜΕ μπορεί να λογίζεται, κάθε «ψηφιακή αναπαράσταση της συνεχούς μεταβολής του αναγλύφου στο χώρου». Ο όρος DEM, θεωρείται πιο ειδικός καθότι αφορά μόνο στην ψηφιακή αναπαράσταση του αναγλύφου, ενώ ο όρος DTM θεωρείται γενικότερος και χρησιμοποιείται επίσης και για οποιαδήποτε άλλη αναπαράσταση ενός χαρακτηριστικού συνεχούς μεταβολής στο χώρο (Χαλκιάς, 2007).

Κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί ότι, σε ένα ΨΜΕ ενδέχεται να εμπεριέχονται τέσσερις ομάδες πληροφορίας:

Α) Πληροφορία που αποτυπώνει το ανάγλυφο όπως υψόμετρο, κλίση και γεωμορφολογικές οντότητες.

Β) Στοιχεία αναγλύφου όπως υδρογραφικό δίκτυο, ρήγματα, όρια λιμνών, ακτογραμμή, δίκτυα μετακινήσεων (οδικό δίκτυο, σιδηροδρομικό δίκτυο, σύνορα κρατών κλπ).

Γ) Φυσικές πηγές και περιβάλλοντα, όπως έδαφος, βλάστηση, γεωλογία, κλίμα κλπ.

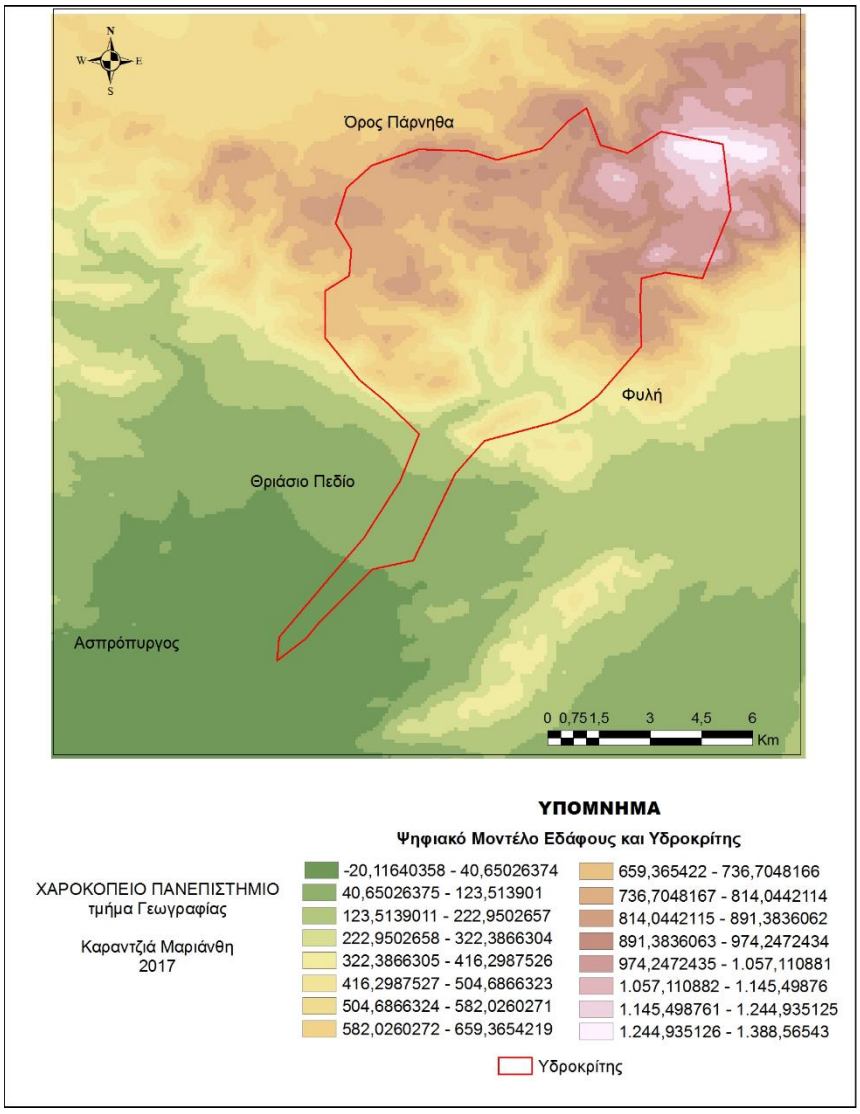
Δ) Κοινωνικοοικονομικά δεδομένα (Καραβίτης, 2011).

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, είναι ένα ψηφιδωτό επίπεδο (raster grid), όπου το κεντρικό σημείο κάθε κελιού (cell), περιλαμβάνει κάποια μέτρηση ύψους. Το ΨΜΕ αποτυπώνει την λεκάνη απορροής του υπό μελέτη ρέματος Γιαννούλας και αποτελεί τα βασικά επίπεδα ως προς τα οποία υλοποιείται η επεξεργασία και ανάλυση κατά την εκτέλεση του μοντέλου βροχής-απορροής.

Αναλυτικότερα, για την κατασκευή του DEM, ψηφιοποιήθηκε ηλεκτρονικά με scanner το φύλλο χάρτου Αθήνα-Έλευσις του χάρτη της ΓΥΣ που αποτυπώνει όλη την έκταση της λεκάνης απορροής του ρέματος Γιαννούλας, σε κλίμακα 1:50.000. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε η εισχώρηση του στο λογισμικό ArcGIS 9.3, ώστε να λάβει χώρα η γεωαναφορά του στο σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ 87.

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την ψηφιοποίηση επιπέδων όπως οι ισουψείς καμπύλες των 20 μέτρων στον χάρτη της ΓΥΣ κλίμακας 1:50.000, το υδρογραφικό δίκτυο, καθώς και τα σημεία γνωστού υψομέτρου (κορυφές).

Μετά το πέρας της παραγωγής των δεδομένων υποβάθρου, επιτελέστηκε η λειτουργία δημιουργίας του DEM, με τη βοήθεια της εντολής topo to raster (Raster interpolation του 3d Analyst), η οποία βασίζεται στον αλγόριθμο ANUDEM του Hutchinson.



Χάρτης 14: Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

Βάση των όσων προαναφέρθηκαν συμπεραίνουμε ότι, το ΨΜΕ συνιστά ένα επίπεδο πληροφορίας, υψίστης σημασίας, για την προσομοίωση ενός πλημμυρικού φαινομένου. Η ανάλυση του επιπέδου αυτού απέδωσε δευτερογενή επίπεδα πληροφορίας τα οποία διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο τόσο στην προσομοίωση της επιφανειακής απορροής με τη χρήση των ΣΓΠ όσο και στην ποσοτική μορφομετρική ανάλυση. Με τη χρήση βασικών εργαλείων υδρολογικής ανάλυσης αλλά και ανάλυσης επιφάνειας, τα οποία παρέχονται από το λογισμικό ArcGIS, προέκυψαν επίπεδα πληροφορίας όπως η κλίση, η κατεύθυνση ροής, η συσσώρευση ροής, το μήκος ροής κτλ.

8.4 Συντελεστής Τραχύτητας κατά Manning

Στο παρόν μοντέλο βροχής-απορροής, πραγματοποιείται μια απλοποιημένη προσέγγιση, κατά την οποία η παράμετρος που εξετάζεται και λαμβάνεται υπόψη είναι η τραχύτητα από την κάλυψη γης. Μια σειρά άλλων παραγόντων που θα μπορούσαν να συνεκτιμηθούν όπως τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά, η τραχύτητα εντός τοπογραφικού δικτύου ή η ενεργός βροχόπτωση, δεν λαμβάνονται υπόψη στο παρόν μοντέλο. Καθώς, δεν υφίστανται εδαφολογικοί χάρτες υψηλής λεπτομέρειας για τη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής και δεν υπάρχουν πραγματικές μετρήσεις και δεδομένα βροχής-απορροής για την υδρολογική λεκάνη.

Παρ΄όλα αυτά θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μια συγκριτική εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου με την εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου στο οποίο θα υπεισέρχονταν οι παράγοντες που προαναφέρθηκαν, έτσι ώστε να εντοπιστούν και να επισημανθούν οι όποιες ανακρίβειες και άλλα προβλήματα. Γενικά το μοντέλο αυτό, αποτελεί τη βάση ανάπτυξης ιδιαίτερα εξελιγμένων μοντέλων προσομοίωσης επιφανειακής απορροής με την αξιοποίηση των GIS (Καρύμπαλης Κατσαφάδος, Καλογερόπουλος, Καραλής, Χαλκιάς, 2014, Ψυχογιός 2013).

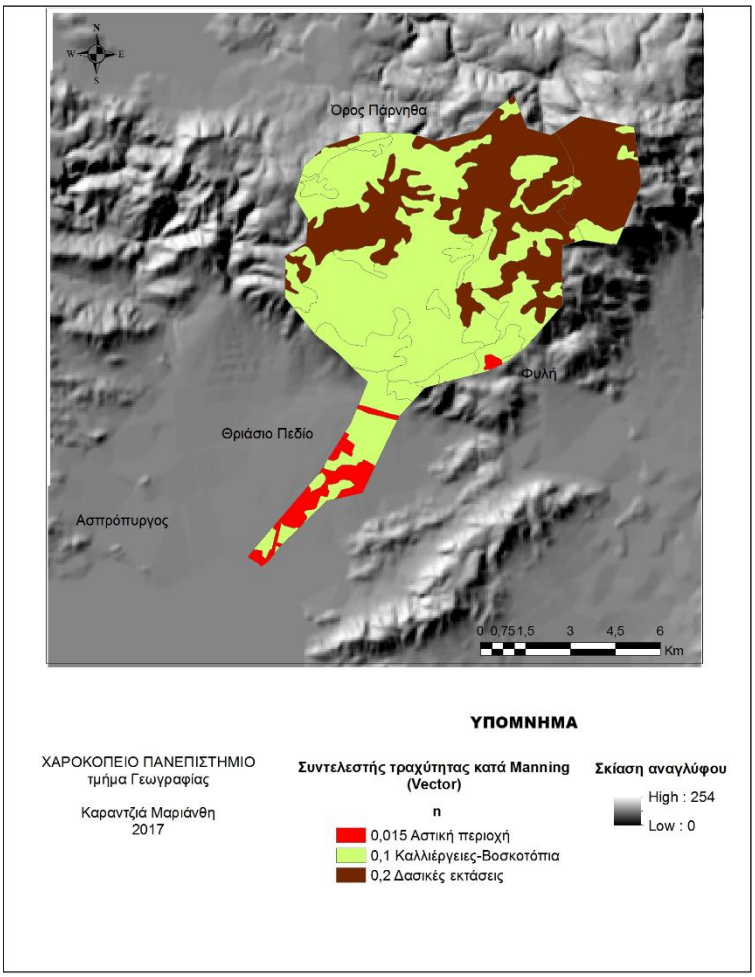
Όσο αφορά την κατασκευή του επιπέδου του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning, για τις ανάγκες της προσομοίωσης, αυτή επιτελέστηκε από χάρτη κάλυψης γης ο οποίος προέκυψε από τα δεδομένα του προγράμματος Ilot του Υπουργείου Γεωργίας (1998). Τα δεδομένα αυτά σχετίζονται με την κατηγοριοποίηση της κάλυψης γης σε κλίμακα 1:5.000, η οποία θεωρείται κατάλληλη για τη δημιουργία ενός επιπέδου που βασίζεται στον συντελεστή τραχύτητας του Manning για κάθε κατηγορία κάλυψης γης.

Η κατηγοριοποίηση της κάλυψης γης και η αντιστοιχία κάθε κατηγορίας με τον συντελεστή τραχύτητας κατά Manning παρουσιάζεται στον πίνακα 11.

Κωδικός	Περιγραφή	Συντελεστής τραχύτητας Manning
10	Δασικές εκτάσεις	0,2
20	Αστική περιοχή	0,015
30	Λειβάδια - Βοσκοτόπια	0,1
40	Αρώσιμες καλλιέργειες	0,1
50	Μόνιμες καλλιέργειες	0,1
60	Ελαιώνας	0,15
70	Αμπελώνας	0,05
11	Δασικές μεικτές εκτάσεις	0,2
21	Αστικές μεικτές περιοχές	0,015
31	Λειβάδια-Βοσκοτόπια μεικτά	0,1
41	Αρώσιμες μεικτές	0,1
51	Μόνιμες μεικτές	0,1
61	Ελαιώνας μικτός	0,15
71	Αμπελώνας μικτός	0,05

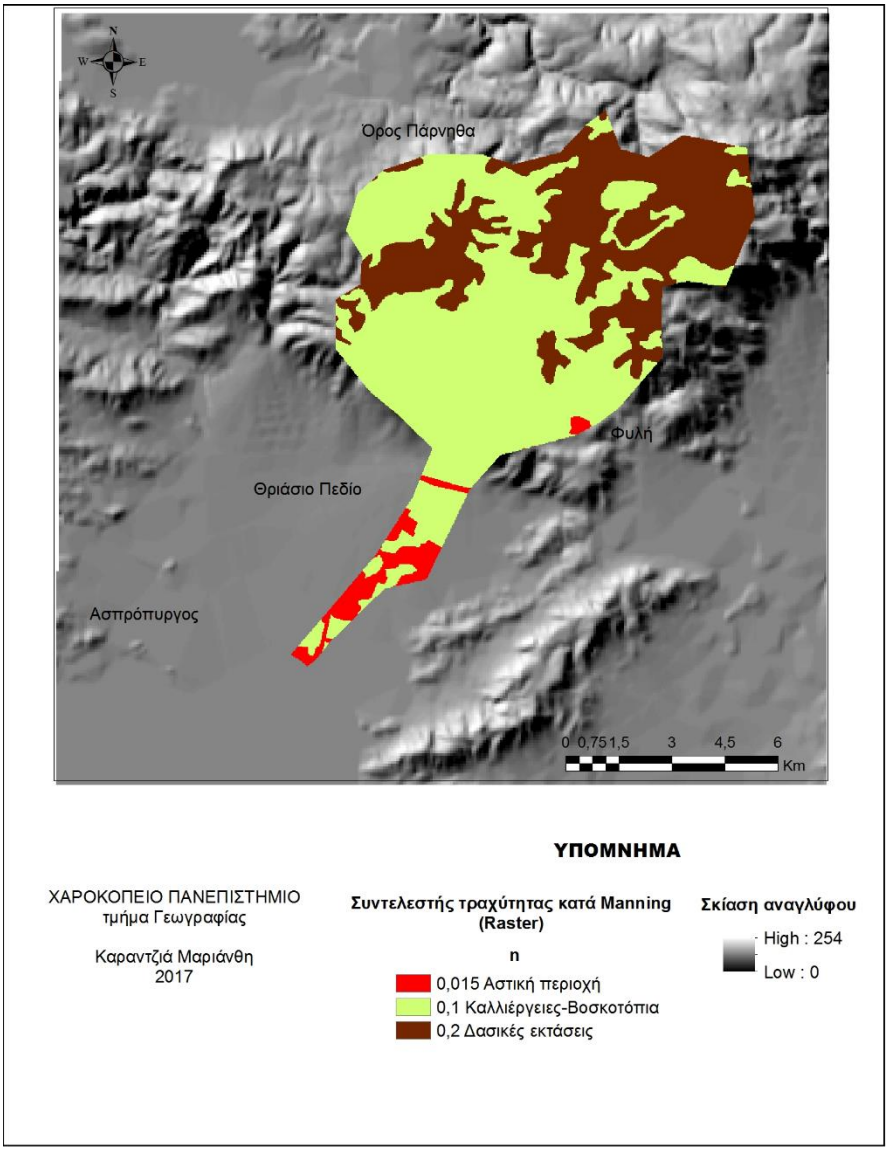
Πίνακας 11: Πίνακας συντελεστών τραχύτητας κατά Manning (Καρύμπαλης κ.α 2014)

Χάρτης 15: Τραχύτητα κατά Manning (Vector)



Καραντζιά Μ. (Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, 2017)

Για να εκτελεστεί το μοντέλο βροχης-απορροής, χρειάζονται ψηφιδωτά δεδομένα. Για τον λόγο αυτό το διανυσματικό επίπεδο των χρήσεων γης μετατρέπεται σε ψηφιδωτό ως προς τον συντελεστή τραχύτητας (convert vector to raster). Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας απεικονίζεται στον χάρτη που ακολουθεί.



Χάρτης 16: Τραχύτητα κατά Manning (Raster)

8.5 Βροχομετρικά δεδομένα

Το γεγονός που επιλέχθηκε για την μελέτη περίπτωση είναι η πλημμύρα που έλαβε χώρα στις 2-3 Νοεμβρίου 1977, ήταν η πλέον καταστροφική αφού προκάλεσε το θάνατο 20 ανθρώπων. Για το 48ωρο αυτό το βροχόμετρο του μετεωρολογικού σταθμού της Ελευσίνας κατέγραψε 101,5 mm βροχής, ύψος που αντιστοιχεί σχεδόν στο διπλάσιο της μέσης βροχής του Νοεμβρίου και στο ένα τέταρτο της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης.

Επίσης κρίνεται αναγκαίο να τονιστεί πως θεωρείται ότι η βροχοπτώση ήταν ομοιόμορφη σε όλη την έκταση της περιοχής, με αποτέλεσμα αυτή να εξετάζεται χρονικά και όχι χωρικά (Μπαλούτσος κ.α 1997).

Ημερομηνία	Ύψος υετού (mm)	Διάρκεια βροχόπτωσης (min)	Ύψος υετού ανά ώρα (mm/h)	Παρατηρήσεις
7/11/1961				40 θύματα σε περιοχές της Αττικής μεταξύ των οποίων και στο Θριάσιο πεδίο
19/11/1963	25.00	345	4.35	1 θύμα στην περιοχή Μπλόκου - Πυρκάλ.
29/11/1963	56.90	295	11.57	
2/11/1977	90.50	725	7.49	20 θύματα στην περιοχή του Ασπρόπυργου
3/11/1977	11.00	180	3.67	Εκτεταμένη πλημμύρα στην περιοχή του Ασπρόπυργου
11/12/1977	27.00	590	2.75	16 θύματα
17/12/1977	16.50	1055	0.94	
18/12/1977	13.80	1005	0.82	
5/2/1978	2.70	325	0.50	
6/2/1978	26.40	540	2.93	2 θύματα
7/12/1978	0.00	30	0.00	
27/1/1996	17.30	650	1.60	2 θύματα στην περιοχή Ελευσίνας, Μάνδρας, Μαγούλας.
29/1/1996	0.90	100	0.54	Εκτεταμένη πλημμύρα στην περιοχή Ελευσίνας, Μάνδρας, Μαγούλας
8/7/2002	4.50	90	3.00	
17/6/2003	39.00	125	18.72	
4/11/2003	31.00	950	1.96	
24/12/2003	35.90	885	2.43	

Πίνακας 12: Πλημμύρες που έπληξαν την ευρύτερη περιοχή του Θριάσιου πεδίου τα τελευταία 50 χρόνια. Τα δεδομένα βροχόπτωσης είναι από τον μετεωρολογικό σταθμό της ΕΜΥ στην Ελευσίνα.

8.6 Προσομοίωση απορροής με χρήση ΣΓΠ

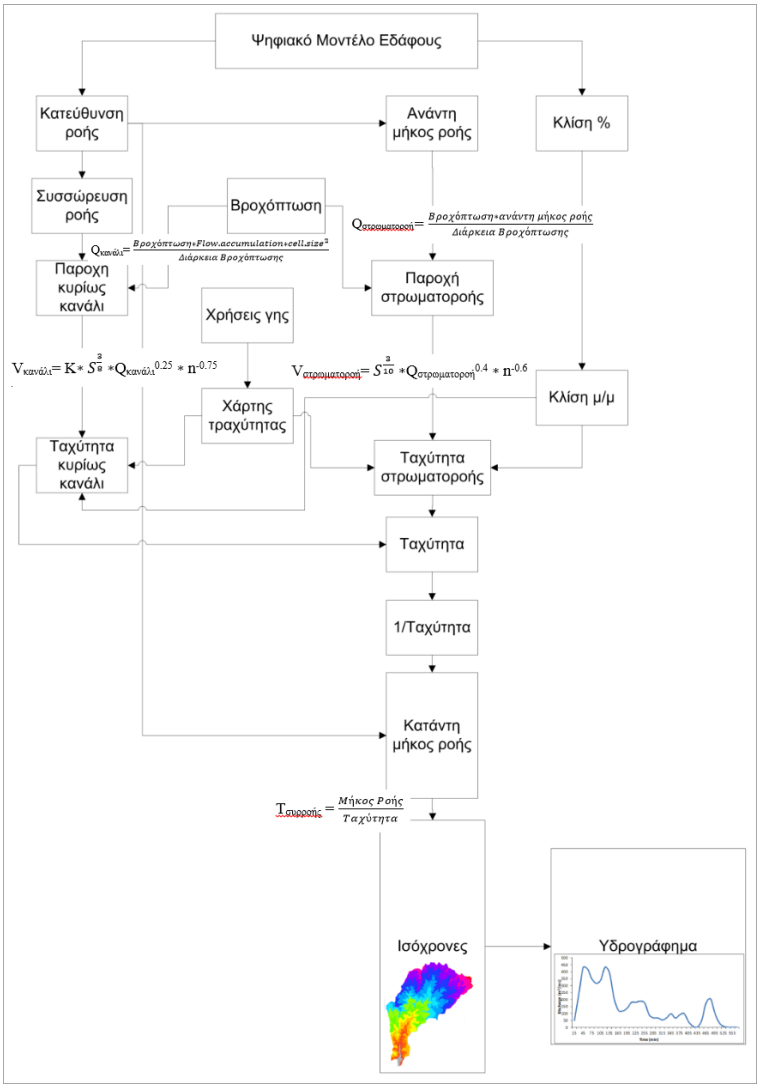
Η παρούσα εργασία έχει ως βασικό αντικείμενο την ανάπτυξη ενός συστήματος, βάσει της τεχνολογίας των ΣΓΠ, για την μοντελοποίηση της επιφανειακής απορροής η οποία συνδέεται άρρηκτα με πλημμυρικά καταστροφικά φαινόμενα. Στόχος της είναι είναι η εκτίμηση της αιχμής της πλημμυρικής παροχής και του κρίσιμου χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ της έναρξης του πλημμυρικού γεγονότος και

της ανωτέρο αιχμής. Με τη διαδικασία αυτή σχεδιάζεται η καμπύλη επιφανείας-χρόνου από την έναρξη της βροχόπτωσης και στη συνέχεια προκύπτει το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα για το συμβάν της συγκεκριμένης ημερομηνίας. Η καμπύλη (ή ιστόγραμμα) επιφανείας-χρόνου παρουσιάζει τη χωρική και χρονική κατανομή της επιφανειακής απορροής εντός της λεκάνης του χειμάρρου. Η επιφάνεια αυτή μπορεί να εκφραστεί με μια επαναταξινόμηση του χρόνου απορροής σε συγκεκριμένα διαστήματα. Τα χρονικά αυτά διαστήματα ονομάζονται ισόχρονες καμπύλες και αποτελούν τον γεωμετρικό τόπο των σημείων όπου οι σταγόνες της βροχής ισαπέχουν χρονικά από την έξοδο μιας λεκάνης ή υπολεκάνης. (Καρύμπαλης κ.α 2014).

Σύμφωνα με τη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος, η διάρκεια της πλημμύρας είναι ίδια για οποιαδήποτε ποσότητα ενεργού βροχής δεδομένης διάρκειας, ενώ οι τετμημένες του υδρογραφήματος της απορροής πάνω στην κοινή αυτή διάρκεια (χρόνος βάσης της πλημμύρας) είναι ευθέως ανάλογες με την ποσότητα της βροχής (Chow et al., 1988). Η απορροή στην έξοδο της λεκάνης προκύπτει από την επαλληλία (πρόθεση) των στιγμιαίων μοναδιαίων υδρογραφημάτων που παράγονται από την ενεργή βροχή σε κάθε χρονικό βήμα. Τα μοναδιαία υδρογραφήματα στην υδρολογική πρακτική εξάγονται με αριθμητικές τεχνικές από παρατηρημένα υδρογραφήματα. Ένα τέτοιο μοντέλο θεωρεί τη λεκάνη απορροής ως «μετατροπέα» του οποίου η πλημμυρική απόκριση είναι ίδια για κάθε μονάδα ενεργής βροχής και ανεξάρτητη του χρόνου διάρκειας της βροχόπτωσης. Η μορφή του μοναδιαίου υδρογραφήματος σε αρκετές περιπτώσεις αντανακλά τις ιδιόμορφίες της λεκάνης όπως για παράδειγμα τη μορφολογική της κλίση, τη γεωμετρία (σχήμα), την υφή των επιφανειακών της γεωλογικών σχηματισμών (πετρώματα και εδάφη) κ.α. (Kalogeropoulos et al., 2012).

Για μετρήσιμες βροχοπτώσεις με συγκεκριμένη ένταση και διάρκεια, κάθε λεκάνη έχει το δικό της υδρογράφημα. Επομένως διαπιστώνεται πως προκειμένου να τεθεί σε εφαρμογή αυτή η μέθοδος, κρίνεται προαπαιτούμενη η χρήση ενός παρατηρημένου υδρογραφήματος της λεκάνης απορροής. Αυτού του είδους τα υδρογραφήματα προέρχονται από μετρήσεις βροχόπτωσης και παροχής κατά τη διάρκεια πραγματικών γεγονότων. Από την άλλη πλευρά, για την κατασκευή συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων απαιτούνται επίσης, δεδομένα και μετρήσεις από πραγματικά γεγονότα σε γειτονικές λεκάνες ή λεκάνες με παρεμφερή χαρακτηριστικά, ωστόσο ενδέχεται να τίθενται ζητήματα αμφιβολιών και ενδοιασμών ως προς την προβλεπτική αξία του μοντέλου (Καρύμπαλης κ.α 2014).

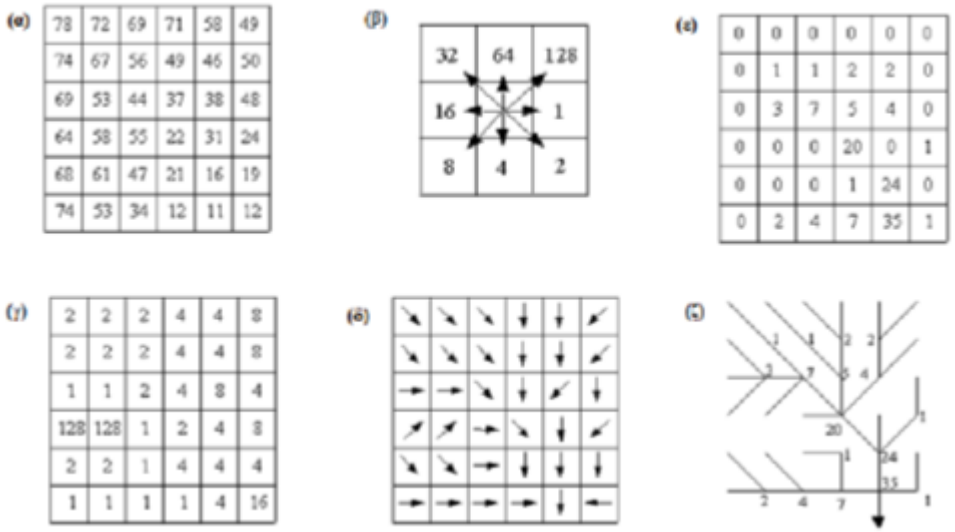
Μετά την αναφορά και την προετοιμασία των δεδομένων προς επεξεργασία, επικεντρωνόμαστε στην περιγραφή του υδρολογικού μοντέλου διόδευσης το οποίο σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε, σε περιβάλλον ArcGIS 9.3, για την εκτίμηση της πλημμυρικής απορροής στην περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας. Η εννοιολογική αναπαράσταση και η ροή δεδομένων για το υδρολογικού μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 18: Εννοιολογικό διάγραμμα μοντέλου της προτεινόμενης μεθοδολογίας (Πηγή: Καλογερόπουλους κ.α 2014)

Αναλυτικότερα, στην ψηφιδωτή μορφή αναπαράστασης του αναγλύφου (ΨΜΕ), μέσω δηλαδή ενός μωσαϊκού κελιών με υψόμετρα και με την χρήση ενσωματωμένων αλγόριθμων, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της πορείας του νερού της βροχής από καθένα κελί προς κάποιο από τα οχτώ διπλανά του, που είναι αυτό με το οποίο έχει τη μεγαλύτερη υψομετρική διαφορά. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται

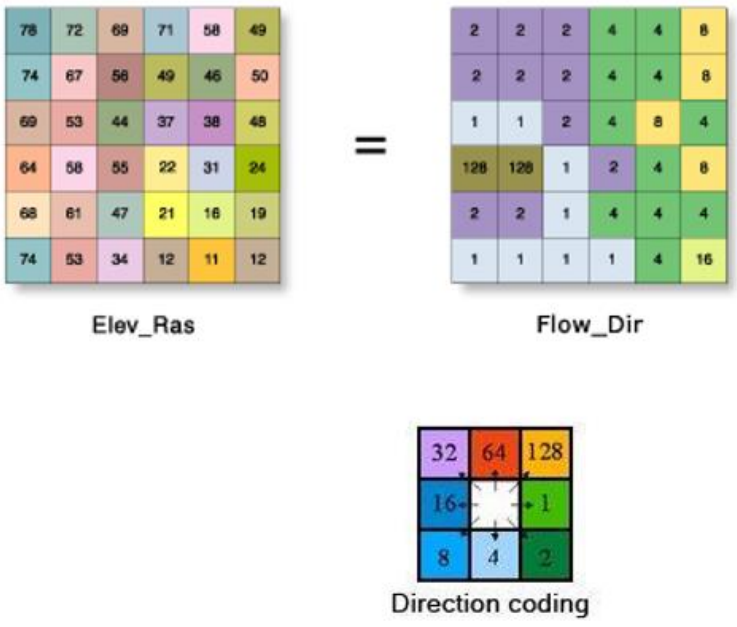
ένα μωσαϊκό διευθύνσεων ροής και αποτυπώνεται η διαδρομή του νερού της βροχής από κάθε κελί του μωσϊκού προς την έξοδο της λεκάνης. Επιπλέον, μέσω αυτού του μωσαϊκού διευθύνσεων, μπορεί να υπολογιστεί το μωσαϊκό συσσώρευσης της ροής με την εκτίμηση του αριθμού των ανάντη κελιών το νερό των οποίων καταλήγει σε καθένα κελί. Τα κελιά που συγκεντρώνουν τη μεγαλύτερη απορροή συγκροτούν το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης το οποίο μπορεί να χαραχτεί εάν δοθεί ένα κατώφλι συσσώρευσης μια ελάχιστη εώς μηδαμινή επιφάνεια απορροής.



Σχήμα 19: Σχηματική απεικόνιση υδρολογικής ανάλυσης (α. ΨΜΕ, β. κατεύθυνση ροής, γ. επίπεδο κατεύθυνσης ροής, δ. σχηματική κατεύθυνση ροής, ε. επίπεδο συσσώρευσης ροής, ζ. κλάδοι υδρογραφικού δικτύου) πηγή: ArcGIS Manual

Ο Maidment (1993) πρότεινε μια ΣΓΠ μεθοδολογία βασισμένη στην ψηφιδωτή μορφή των raster δεδομένων για την εξαγωγή ενός χωρικά κατανεμειμένου μοναδικού υδρογραφήματος με υπολογισμό των ταχυτήτων ροής για κάθε κελί. Με αυτό το πεδίο ταχυτήτων υπολογίζεται ο χρόνος συρροής του νερού από το κάθε κελί στο στόμιο της λεκάνης διαιρώντας το μήκος της διαδρομής της ροής με μία ταχύτητα. Στη συνέχεια κατασκευάζονται οι ισόχρονες καμπύλες (ίσου χρόνου συρροής) και μαζί το διάγραμμα χρόνου-επιφανείας απορροής που αποτυπώνει την ολοένα και αυξανόμενη έκταση της λεκάνης που συνεισφέρει στην απορροή με την πάροδο του χρόνου. Το μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης προκύπτει από την κλίση της καμπύλης της αθροιστικής επιφάνειας απορροής. Το πεδίο ταχυτήτων είναι μόνιμο, δηλαδή σταθερό στον χρόνο καθόλη τη διάρκεια της βροχόπτωσης.

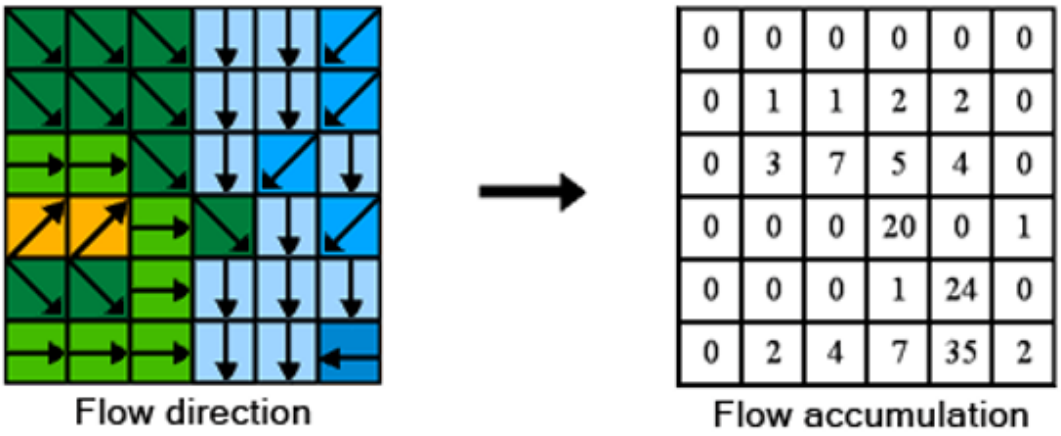
Πριν αξιοποιήσουμε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, πρέπει να ελέγξουμε για τυχών αστοχίες. Παράδειγμα τέτοιων αστοχιών είναι οι περιοχές ταπείνωσης, πρακτικά οι περιοχές αυτές είναι ψηφίδες που περιβάλλονται από ψηφίδες μεγαλύτερου υψομέτρου. Για να διορθώσουμε τέτοιου είδους λάθη χρησιμοποιούμε στο Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών ArcMap τον αλγόριθμο Fill_dem. Το επίπεδο που δημιουργείται είναι παρόμοιο με το αρχικό μοντέλο εδάφους μόνο που δεν περιέχει μεμονωμένα σημεία ταπείνωσης του αναγλύφου. Το επόμενο στάδιο, περιλαμβάνει την δημιουργία των επιπέδων διεύθυνσης ροής και συσσώρευσης ροής, με την βοήθεια της ενημερωμένης εργαλειοθήκης του ArcGIS, ArcToolbox. Με τη σύνθεση του πρώτου επιπέδου, δηλαδή ενός μωσαϊκού διευθύνσεων ροής, καθίσταται δυνατή, η αποτύπωση της διαδρομής του νερού της βροχής από κάθε κελί μέχρι την έξοδο της λεκάνης. Πιο συγκεκριμένα, μέσω διαθέσιμων αλγορίθμων, υπολογίζεται η πορεία του νερού της βροχής από το κάθε κελί προς κάποιο από τα 8 γειτονικά του, τουτέστιν εκείνο με το οποίο σημειώνει τη μεγαλύτερη διαφορά υψομέτρου. Επομένως, με την εκτέλεση αυτών των αλγορίθμων, αποδίδεται ένα επίπεδο όπου σε κάθε κελί, απεικονίζεται η κατεύθυνση προς την οποία θα κινηθεί το νερό της βροχής.



Εικόνα 3: Διαδικασία διεύθυνσης ροής (Πηγή: http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=flow_direction)

Χρησιμοποιώντας το επίπεδο της διεύθυνσης ροής μπορούμε να αποδώσουμε το επίπεδο της συσσώρευσης ροής (flow accumulation). Αυτό πραγματοποιείται με την βοήθεια ενός αλγορίθμου, ο οποίος χρησιμοποιεί το επίπεδο της διεύθυνσης ροής και

εκτιμά τον αριθμό των ανάντη κελιών το νερό των οποίων καταλήγει σε κάθε κελί. Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης, συνίσταται από εκείνα τα κελιά που συγκεντρώνουν την μεγαλύτερη απορροή (Καρύμπαλης κ.α 2014).



Εικόνα 4: Διαδικασία συσσώρευσης ροής (http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=flow_accumulation)

Το γεγονός ότι η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την προσομοίωση βασίζεται στον χρόνο συρροής, έγιναν υπολογισμοί του χρόνου διαδρομής του νερού διαμέσου της λεκάνης του υπό μελέτη παραπόταμου, τόσο για την ροή εντός του καναλιού (κυρίως υδρογραφικό δίκτυο) έως την έξοδο της λεκάνης, όσο και για την στρωματοροή (υπόλοιπη λεκάνη). Για τον διαχωρισμό μεταξύ αυτών των δύο τύπων ροής, καθορίστηκε ένα κατώφλι συμβαλλόντων κελιών (συσσώρευσης ροής). Κατ' αυτόν τον τρόπο εκτός του ότι διαχωρίστηκαν οι δύο προαναφερθέντες τύποι ροής, ταυτόχρονα καθορίστηκε το υδρογραφικό δίκτυο (Kalogeropoulos et. al 2012).

Έχοντας ως δεδομένα, το εξαγόμενο επίπεδο της συσσώρευσης ροής και τη βροχόπτωση εκφρασμένη σε μέτρα, μπορούμε να υπολογίσουμε το επίπεδο παροχής του καναλιού (επιφανειακή απορροή), με τη βοήθεια της εντολής Raster Calculator (Map Algebra). Η εξίσωση για τον υπολογισμό της παροχής στους κλάδους του δικτύου (Qκανάλι σε m3/s), υπολογίστηκε από τον ακόλουθο τύπο:

$$Q_{\text{κανάλι}} = \frac{Βροχόπτωση * Flow.accumulation * cell.size^2}{Διάρκεια\ Βροχόπτωσης} \quad (1)$$

Όπου:

flow.accumulation = η συσσώρευση ροής και

cell.size = το μέγεθος του κελιού (σε m).

Έπειτα, προκειμένου να υπολογιστεί το επίπεδο της παροχής της στρωματοροής (Qστρωματοροή σε m3/s), σημειώθηκαν οι εξής ενέργειες. Αρχικά, από το επίπεδο κατεύθυνσης της ροής προήλθε το επίπεδο του ανάντη μήκους ροής (δηλαδή του μήκους της ροής του νερού από το κάθε κελί έως τον υδροκρίτη) εκφρασμένο σε μέτρα και στη συνέχεια εφαρμόστηκε η εξής σχέση, η οποία εισχωρήθηκε στο Raster Calculator:

$$Q_{\text{στρωματοροή}} = \frac{Βροχόπτωση * ανάντη\ μήκος\ ροής}{Διάρκεια\ Βροχόπτωσης} \quad (2)$$

Για να υπολογίσουμε και να εξάγουμε το επίπεδο του χρόνου συρροής, θεωρείται προαπαιτούμενη η γνώση της ταχύτητας ροής στο κυρίως κανάλι αλλά και της ταχύτητας στρωματοροής. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η ταχύτητα ροής στο κυρίως κανάλι του υδρογραφικού δικτύου (Vκανάλι σε m/s) δύναται να εκτιμηθεί, με τη βοήθεια του Raster Calculator, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_{\text{κανάλι}} = K * S^{\frac{3}{8}} * Q_{\text{κανάλι}}^{0.25} * n^{-0.75} \quad (3)$$

Όπου:

K είναι ο συντελεστής διόρθωσης των σφαλμάτων της προσομοίωσης για το επίπεδο συντελεστή τραχύτητας και το επίπεδο των κλίσεων και ισούται με 1,

S είναι η κλίση εκφρασμένη (σε m/m) και

Q είναι η παροχή στο κυρίως κανάλι (σε m^3/s) που εκτιμήθηκε εφαρμόζοντας τον τύπο (1) και

n είναι ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning (σε s/m1/3).

Παράλληλα, η ταχύτητα στρωματοροής (Vστρωματοροή σε m/s) δύναται να εκτιμηθεί, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση και με την βοήθεια του Raster Calculator (Du κ.ά. 2009).

$$V_{\text{στρωματοροή}} = S^{\frac{3}{10}} * Q_{\text{στρωματοροή}}^{0.4} * n^{-0.6} \quad (4)$$

Όπου:

Q (σε m3/s) είναι η παροχή της στρωματοροής που εκτιμήθηκε από τον τύπο (2),

S είναι η κλίση εκφρασμένη σε (m/m) και

n είναι ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning (σε s/m1/3).

Μετά τον υπολογισμό των ταχυτήτων ροής, τόσο στο κυρίως υδρογραφικό δίκτυο όσο και στην υπόλοιπη λεκάνη, συνεχίζουμε με την συνένωση αυτών των δύο επιπέδων, η οποία μας παρέχει την τελική ταχύτητα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, υπολογίζεται η τελική ταχύτητα ροής για κάθε κελί της λεκάνης απορροής, με τη βοήθεια της εντολής Con από το Spatial Analyst Tools.

Δεδομένου, ότι έχει υπολογιστεί η τελική ταχύτητα ροής για κάθε κελί της λεκάνης, ο ζητούμενος χρόνος απορροής σε κάθε κελί, αποτιμάται βάσει της ταχύτητας και του μήκους ροής, το οποίο είναι σταθμισμένο με το επίπεδο 1/V (όπου V ταχύτητα ροής). Η εξίσωση με την οποία αποδίδεται ο χρόνος συρροής παρατίθεται ως εξής:

$$T_{\text{συρροής}} = \frac{Μήκος\ Ροής}{Ταχύτητα} \qquad (5)$$

Με αυτό το επίπεδο παρουσιάζεται ο χρόνος που χρειάζεται μία σταγόνα νερού να κυλήσει προς την έξοδο της λεκάνης απορροής (Kalogeropoulos et al., Gioti et al. 2013, Καρύμπαλης κ.α 2014).

Το τελικό στάδιο κατά την εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου, περιλαμβάνει τον σχεδιασμό του επιπέδου των ισόχρονων καμπυλών, δηλαδή –όπως έχει προαναφερθεί- εκείνων των καμπυλών που συνδέουν τις περιοχές της λεκάνης, όπου η απορροή χρειάζεται τον ίδιο χρόνο για να φθάσει στην έξοδο της λεκάνης. Η κατασκευή του επιπέδου των ισόχρονων, επιτυγχάνεται με την επαναταξινόμηση των τιμών του επιπέδου του χρόνου απορροής. Έτσι, μπορεί να εξαχθεί το διάγραμμα χρόνου-επιφάνειας, ενώ μελετώντας τους παλμούς του νερού που πέφτει στη μονάδα του χρόνου (που έχει οριστεί στις ισόχρονες καμπύλες), μπορούμε να δημιουργήσουμε το σύνθετο μοναδιαίο υδρογράφημα για το υπό μελέτη πλημμυρικό φαινόμενο (Kalogeropoulos et al., 2012).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 : Αποτελέσματα εφαρμογής υδρολογικού μοντέλου

Όπως προαναφέρθηκε τα δεδομένα της άσκησης είναι ψηφιακής μορφής και πραγματοποιήθηκαν σε αυτά λειτουργίες τοπικές, κεντρικές, καθολικές και λειτουργίες ζώνης στα πλαίσια του Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών ArcMap 9.3, με σκοπό την αποτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου στο ρέμα Γιαννούλας.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, περιγράφηκε και παρουσιάστηκε η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου. Το πλήθος των ενεργειών που ακολουθήθηκαν, οδήγησε στην επίτευξη της αποτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου, στον οποίο περιέρχεται η έξοδος της δεδομένης λεκάνης απορροής, στην περίπτωση πρόκλησης ενός συναφούς πλημμυρικού επεισοδίου. Αποτέλεσμα αυτών είναι η δημιουργία θεματικών και συνεχών χαρτών.

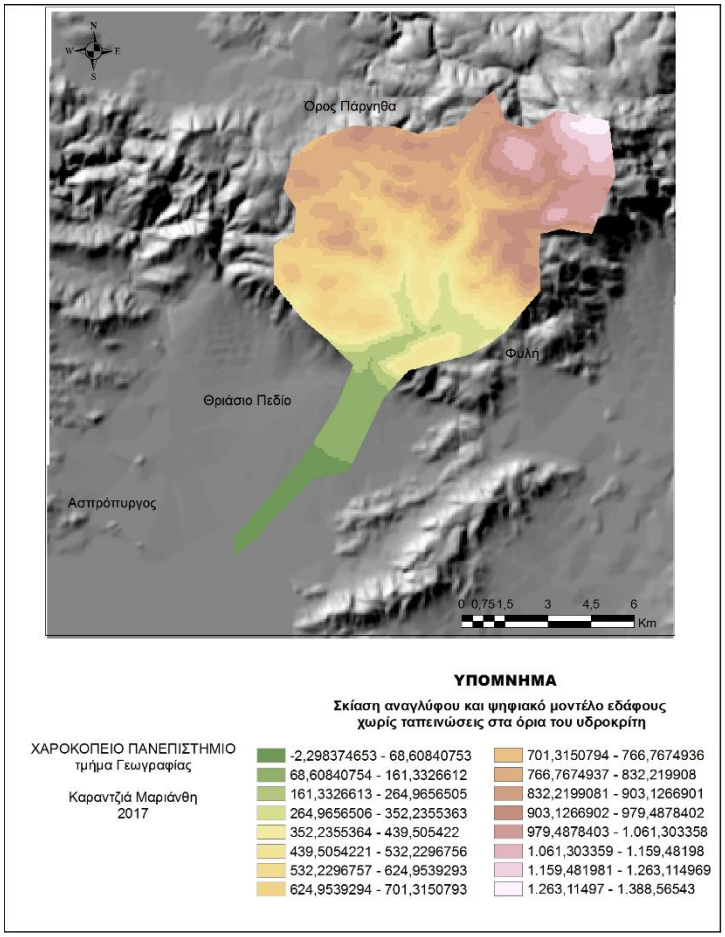
Αναλυτικά οι χάρτες που προέκυψαν απεικονίζουν τα εξής:

- Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους χωρίς ταπεινώσεις
- Το επίπεδο διεύθυνσης ροής
- Το επίπεδο συσσωρευτικής ροής
- Τη δημιουργία των υδρολογικών λεκανών
- Την οριοθέτηση υπολεκανών της υδρολογικής λεκάνης
- Το επίπεδο του μήκους ροής
- Την παροχή
- Τη στρωμματοροή και το χρόνο της
- Τη ταχύτητα ροής και το χρόνο της

Οι χάρτες που υλοποιήθηκαν εξαρτώνται από την ποιότητα του Ψηφιακού μοντέλου υψομέτρου, καθώς και από το μέγεθος του κελιού καθώς αναφερόμαστε σε ψηφιακά δεδομένα.

Σε αυτή την ενότητα θα αναλύσουμε τους χάρτες που προέκυψαν από την επεξεργασία του διορθωμένου χωρίς ταπεινώσεις ψηφιακού μοντέλου υψομέτρου και θα σχολιάσουμε τα αποτελέσματα των απεικονίσεων.

9.1 Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους χωρίς ταπεινώσεις

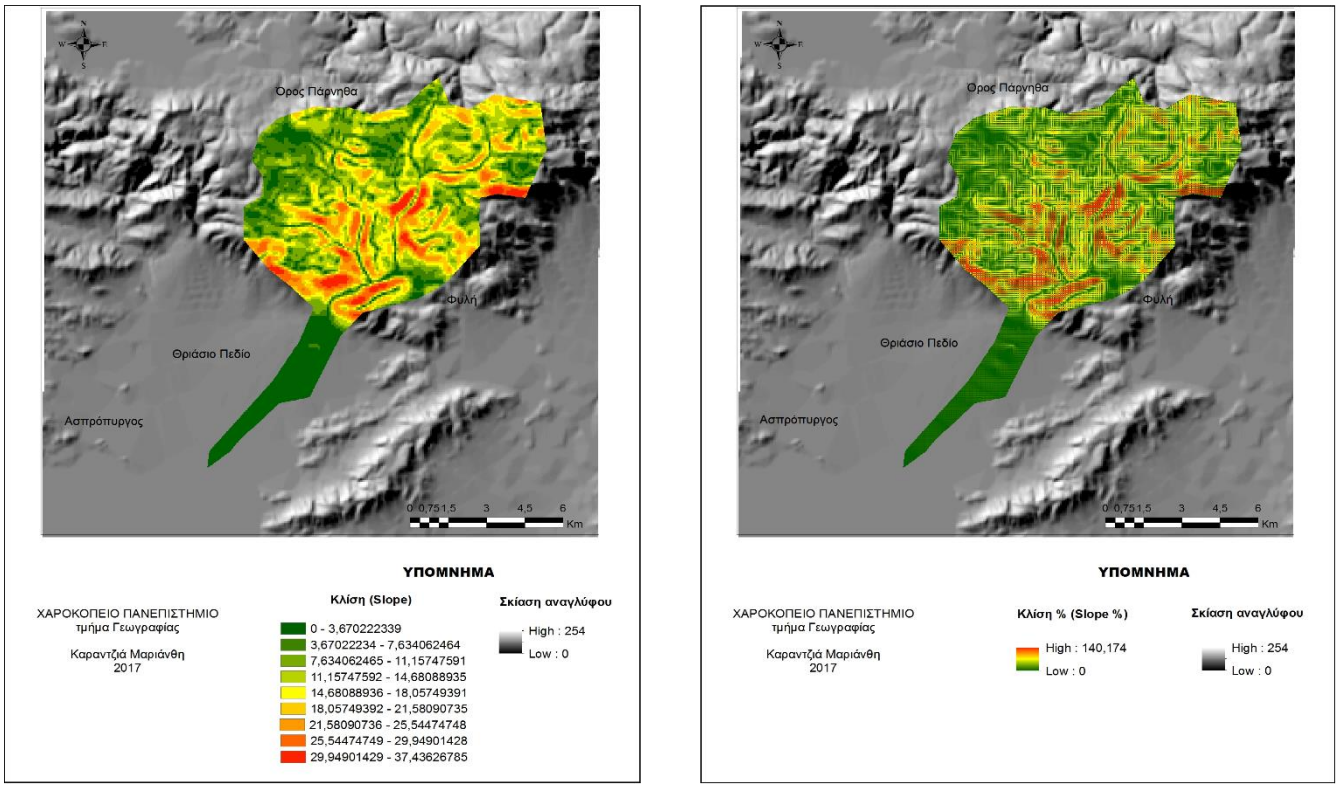


Χάρτης 17: Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους χωρίς ταπεινώσεις

Ο παραπάνω χάρτης είναι αποτέλεσμα της διόρθωσης του αρχικού ψηφιακού μοντέλου υψομέτρου. Η διόρθωση που πραγματοποιήσαμε έγινε για να εξομαλυνθούν τυχών τοπικές ταπεινώσεις ή ανειψώσεις αντίστοιχα του δεδομένου ψηφιακού μοντέλου υψομέτρου που δεν οφείλονται συνήθως σε φυσικά αίτια. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται sinks και διορθώνονται από τον αλγόριθμο fill στο περιβάλλον του Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών ArcMap 9.3. (ArcToolbox)

Από τον πρώτο χάρτη παρατηρούμε, ότι η περιοχή που περικλείεται στο φύλο χάρτη Αθήνα-Έλευσις έχει υψόμετρο -έπειτα από επεξεργασία- που κυμαίνεται από -20 εώς 1388 μέτρα με βάση τη στάθμη της θάλασσας. Ενώ στον δεύτερο χάρτη παρατηρούμε ότι στα όρια του υδροκρίτη του ρέματος Γιαννούλας οι τιμές του υψομέτρου κυμαίνονται από -2 εώς 1388 μέτρα με βάση την μέση στάθμη της θάλασσας.

9.2 Χάρτης Κλίσεων (Slope)



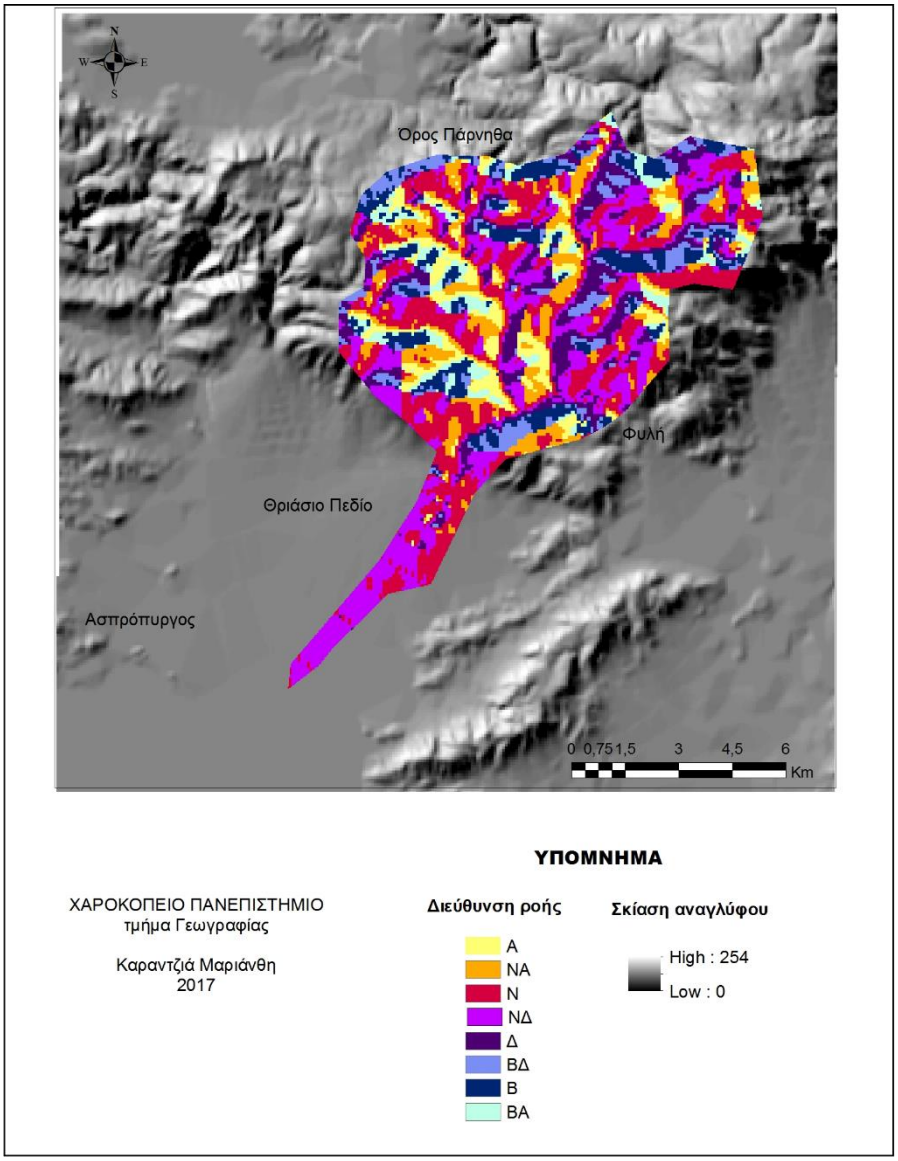
Χάρτες 18: Κλίσεων (Slope)

9.3 Χάρτης Διεύθυνσης ροής (Flow Direction)

Στη συνέχεια, κατά την διεκπεραίωση της υδρολογικής ανάλυσης, από το ΨΜΕ παρήχθησαν τα θεματικά επίπεδα της κατεύθυνσης ροής (Flow Direction) και της συσσώρευσης ροής (Flow Accumulation). Το επίπεδο διεύθυνσης ροής προέκυψε από επεξεργασία του καννάβου υψομέτρου και υπολογίζει για κάθε ψηφίδα του Grid προς τα που θα κατευθυνθεί η ροή. Αφού έχει υπολογιστεί η μέγιστη κλίση προς τις οχτώ γειτονικές ψηφίδες, καθώς η ροή του νερού λόγω βαρύτητας κατευθύνεται προς τα κατάντι, τουτέστιν τη κατεύθυνση προς την οποία θα κινηθεί το νερό της βροχής. Όπως προαναφέρθηκε οι αριθμοί 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 αντιστοιχούν σε κωδικούς διεύθυνσης ροής. Στον παρακάτω πίνακα 13 απεικονίζονται οι τιμές αυτές:

32(ΒΔ)	64(Β)	128(ΒΑ)
16(Δ)	___	1(Α)
8(ΝΔ)	4(Ν)	2(ΝΑ)

Πίνακας 13: Κωδικοί διεύθυνσης ροής



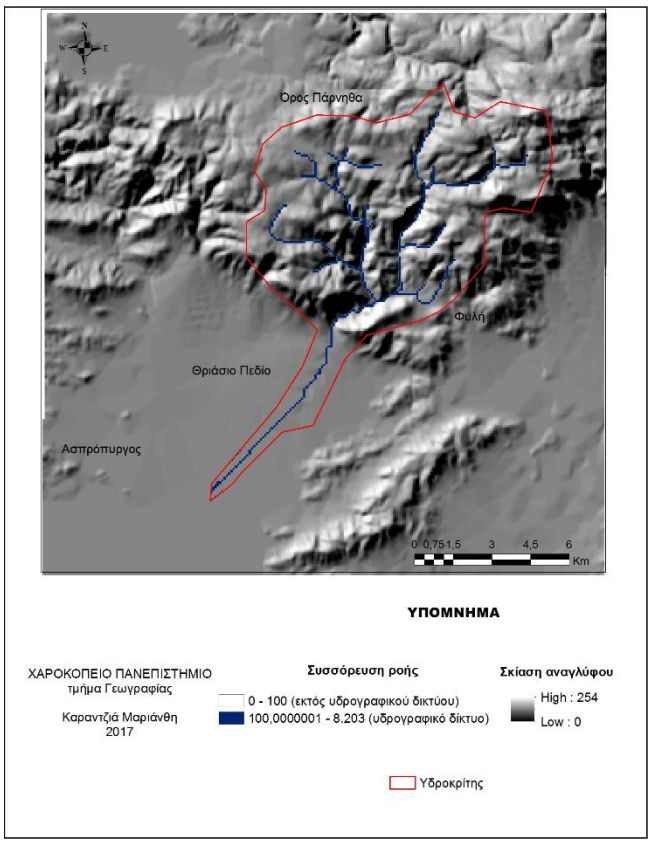
Χάρτης 19: Διεύθυνσης ροής (Flow Direction)

Αναλυτικότερα στον παραπάνω χάρτη παρουσιάζεται η διαδρομή που θα ακολουθήσει το νερό από κάθε κελί μέχρι την έξοδο της λεκάνης, λιλά είναι οι περιοχές όπου οι ροή θα κατευθυνθεί ανατολικά, πράσινες οι περιοχές που θα κατευθυνθεί νοτιοανατολικά, πορτοκαλί οι περιοχές που θα κατευθυνθεί νότια, γαλάζιες οι περιοχές που θα κατευθυνθεί νοτιοδυτικά, πράσινο σκούρο οι περιοχές που θα κατευθυνθεί δυτικά, καφέ οι περιοχές που θα κατευθυνθεί βορειοδυτικά, μοβ οι περιοχές που θα κατευθυνθεί βόρεια και κυανό οι περιοχές που θα κατευθυνθεί βορειοανατολικά.

9.4 Χάρτης Συσσώρευσης ροής (Flow Accumulation)

Αξιοποιώντας το επίπεδο της διεύθυνσης ροής, μπορούμε να συνθέσουμε το θεματικό επίπεδο της συσσώρευσης ροής (Flow Accumulation raster). Πρόκειται για ένα νέο raster, όπου στο κάθε κελί εμπεριέχεται ως τιμή ο αριθμός των κελιών που εισρέουν συγκεντρωτικά σε αυτό. Από τις τιμές των κελιών εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα ως προς το μέγεθος της συσσώρευσης της λεκάνης απορροής. Τα κελιά στα οποία σημειώνονται υψηλές τιμές, συνιστούν περιοχές μεγάλης συσσώρευσης, δηλαδή αντιπροσωπεύουν τα διερχόμενα υδατορέματα. Επομένως, το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης, συνίσταται από εκείνα τα κελιά που συγκεντρώνουν την μεγαλύτερη απορροή. Στον αντίποδα, τα κελιά στα οποία σημειώνονται χαμηλές τιμές, αντιπροσωπεύουν περιοχές μικρής συσσώρευσης. Κρίνεται αναγκαίο να αναφερθεί, ότι τα κελιά με μηδενικές τιμές αποτυπώνουν τα σημεία του υδροκρίτη όπου η συσσώρευση ροής είναι μηδενική, ενώ τα κελιά με την μέγιστη τιμή, συνιστούν το σημείο εξόδου όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη συσσώρευση ροής. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, πως η ολοένα και μεγαλύτερη μείωση των τιμών, μεταφράζεται ως προσέγγιση του υδροκρίτη, ενώ αντίθετα η ολοένα και μεγαλύτερη αύξηση των τιμών σημαίνει προσέγγιση των κοιτών των υδατορεμάτων.

Τέλος θα μπορούσαμε να αναφέρουμε, ότι από το επίπεδο της συσσωρευτικής ροής, αν πολλαπλασιάσουμε τις ψηφίδες που τροφοδοτούν μια ψηφίδα με το μέγεθος του κελιού προκύπτει το εμβαδόν της περιοχής που τροφοδοτεί την συγκεκριμένη ψηφίδα.

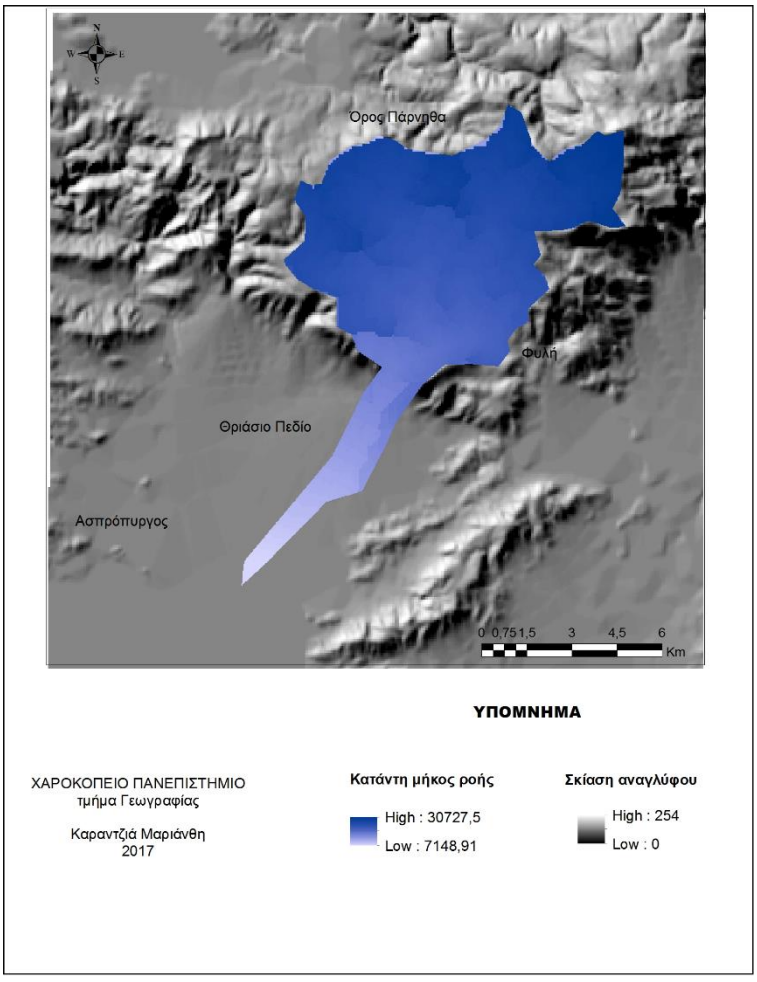


Χάρτης 20: Συσσόρευσης ροής (Flow Accumulation)

9.5 Χάρτης της κατάντη μήκους ροής (Flow length)

Το μήκος ροής εφαρμόζεται στο επίπεδο διεύθυνσης ροής και υπολογίζει το μήκος της ροής κάθε κυττάρου μέχρι την έξοδο της λεκάνης. Δηλαδή είναι η απόσταση που διανύει μια βροχοσταγόνα μέχρι να φτάσει στο σημείο εξόδου-αποφόρτισης του υδρογραφικού δικτύου.

Πρωταρχικός σκοπός του εργαλείου Flow Length, αποτελεί η εύρεση του μέγιστου μήκους ροής, δηλαδή εκείνης της απόστασης που διανύει η πιο απομακρυσμένη σταγόνα βροχής μέχρι το σημείου εξόδου της λεκάνης απορροής. Συχνά, το επίπεδο του μήκους ροής (στα κατάντη) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης. Με την αυτοματοποιημένη διαδικασία του λογισμικού ArcMap από την εργαλειοθήκη ArcToolbox, flow length προκύπτει ο εξής συνεχής χάρτης για την περιοχή μελέτης



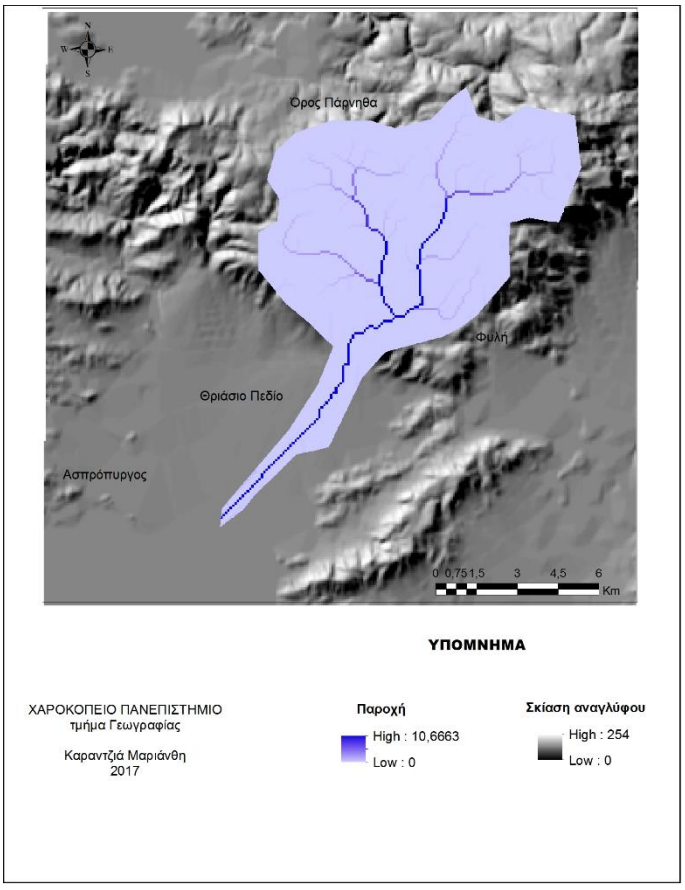
Χάρτης 21: Κατά μήκους ροής (Flow Length)

Σύμφωνα με τον παραπάνω χάρτη, γίνεται αντιληπτό πως η απόσταση μεταξύ του πιο απέχοντος σημείου (επί του υδροκρίτη) της λεκάνης και της εξόδου αυτής αποτιμάται κατά προσέγγιση στα 23 χιλιόμετρα.

9.6 Χάρτης παροχής

Προηγουμένως, ορίσαμε ως παροχή την ποσότητα του νερού που διέρχεται από τη διατομή της κοίτης ενός ποταμού στη μονάδα του χρόνου. Γίνεται αντιληπτό, ότι η παροχή στο υδρογραφικό δίκτυο μιας λεκάνης απορροής εμφανίζει μεταβολές τόσο στο χώρο όσο και στον χρόνο, γεγονός που οφείλεται σε γεωλογικούς, μορφολογικούς, καθώς και κλιματικούς παράγοντες. Η παροχή στους κλάδους του δικτύου (Qκαναλιού σε m3/s) υπολογίστηκε βάσει του επιπέδου της συσσώρευσης ροής, για δεδομένο ύψος και διάρκεια βροχόπτωσης. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι η βροχόπτωση θεωρείται ομοιόμορφη σε όλη την έκταση της λεκάνης.

Σύμφωνα με την κατάλληλη βιβλιογραφία, συνειδητοποιήσαμε πως καθώς η ροή προχωρά από τις πηγές ενός ρεύματος προς τα κατάντη, αυξάνεται η παροχή, ενώ η εγκάρσια διατομή μετατοπίζεται προς τα πάνω. Το βασικό αίτιο της αύξησης αυτής, πηγάζει από το γεγονός ότι κάθε παραπόταμος και η εκφόρτιση υπόγειων υδροφορέων «προσθέτουν» μεγαλύτερες ποσότητες νερού. Επομένως, όταν η παροχή υπερβαίνει τη δυνατότητα της κοίτης ενός ρέματος, προξενεί την υπερχείλιση των οχθών, με επακόλουθο την εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων.

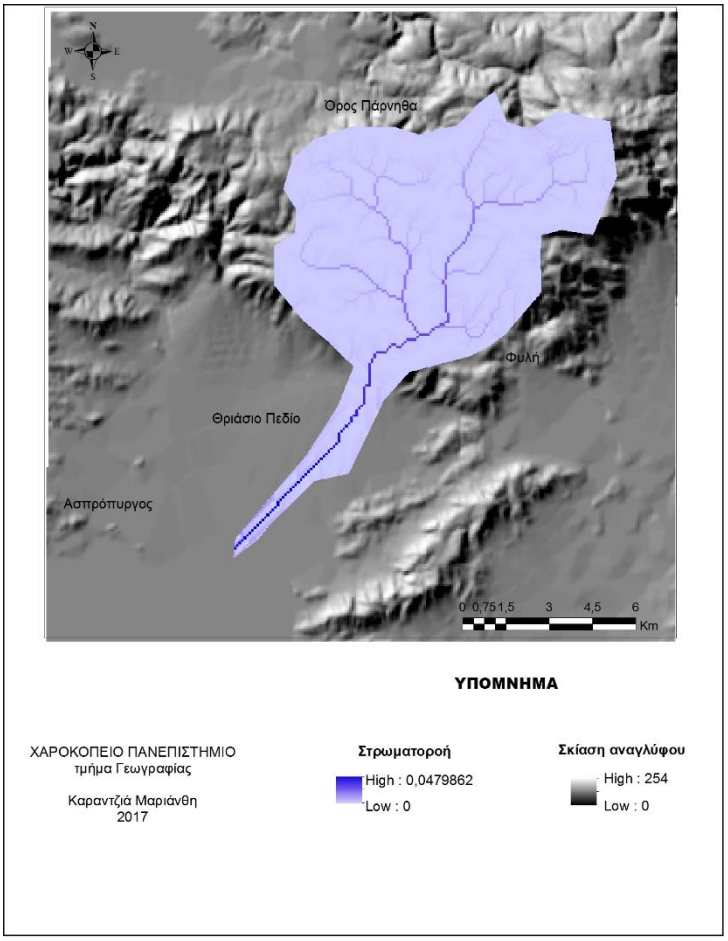


Χάρτης 22: Παροχής

Η βασική πληροφορία που εξάγεται από τον χάρτη, αφορά τις τιμές της μέσης παροχής εντός του υδρογραφικού δικτύου για την λεκάνη απορροής της περιοχής μελέτης, οι οποίες κυμαίνονται από 0 έως 10 m^3/s.

9.7 Χάρτης παροχής στρωματοροής

Βάσει του επίπεδου του ανάντη μήκους ροής, καθώς και για μία δεδομένου ύψους και διάρκειας κατακρήμνιση, η οποία είναι ομοιόμορφη για όλη την επιφάνεια της λεκάνης, δυνάμε να υπολογίσουμε την παροχής στρωματοροής (Qστρωματοροής σε m3/s).



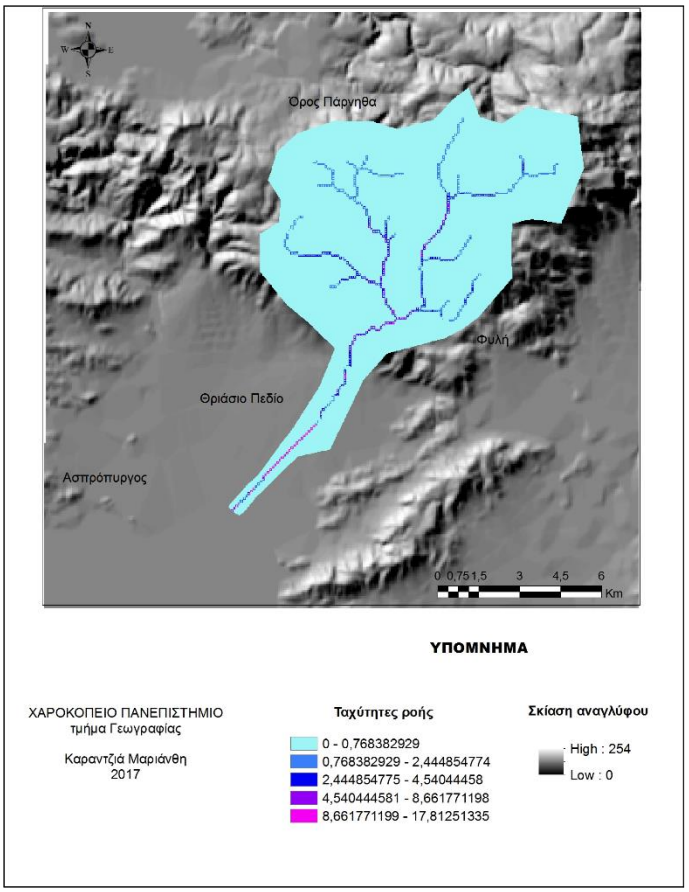
Χάρτης 23: Παροχής στρωματοροής

Σύμφωνα με τον χάρτη για την παροχή στρωματοροής, οι τιμές κυμαίνονται από 0 έως 0, 047 m3/s. Το αποτέλεσμα που προέκυψε θεωρείται αναμενόμενο, καθώς αν το συγκρίνουμε με τις τιμές της παροχής στους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου, θα διαπιστώσουμε ότι είναι κατά πολύ μικρότερες. Παρατηρείται επίσης, πως οι μεγαλύτερες εκ των τιμών της, εντοπίζονται πλησίον των υδατορεμάτων.

Στη συνέχεια, αξιοποιώντας τα εξαγόμενα επίπεδα της παροχής στους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου και της στρωματοροής, αλλά και εκείνα των κλίσεων και του συντελεστή τραχύτητας μπορούμε να εκτιμήσουμε τις μέσες ταχύτητες του καναλιού και της στρωματοροής αντίστοιχα.

9.8 Χάρτης ταχύτητας ροής

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις και την βιβλιογραφική ανασκόπηση που έλαβε χώρα, διαπιστώνεται πως καθώς η ροή προελαύνει από τις πηγές ενός ρεύματος προς τα κατάντη, αυξάνεται ελαφρώς η ταχύτητα. Με την αύξηση της ταχύτητας, η κοίτη που έχει διευρυνθεί, δύναται να υποστηρίξει μεγαλύτερη παροχή και έτσι να μεταφέρει μεγαλύτερο φορτίο.

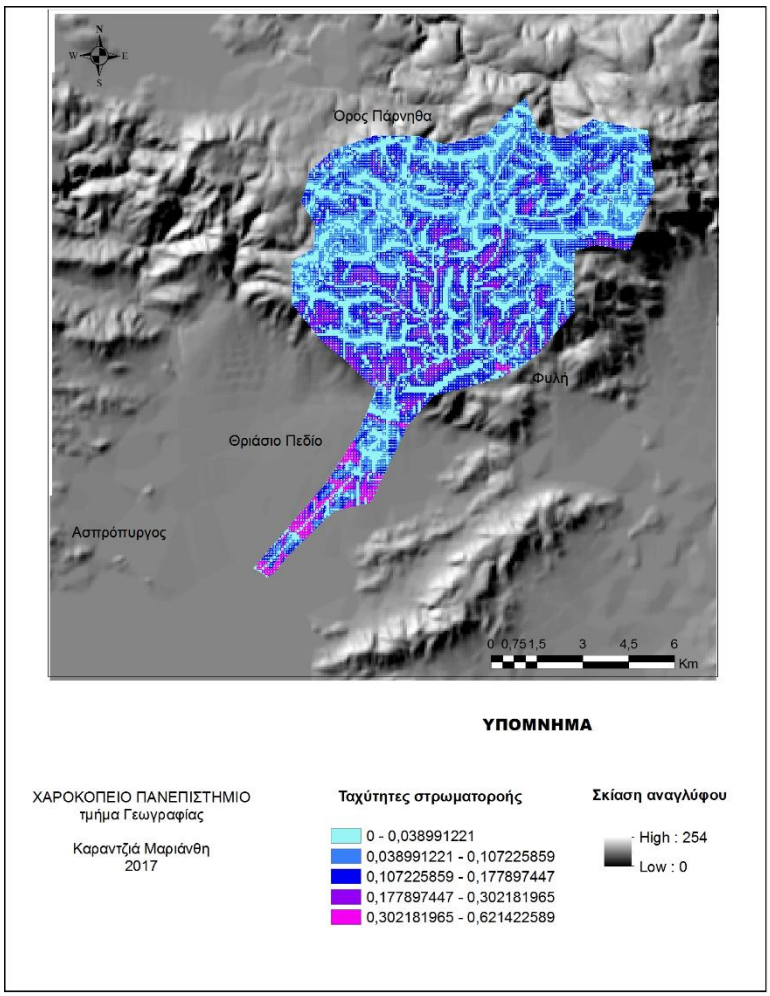


Χάρτης 24: Ταχύτητας ροής

Από το αρχικό εξαγόμενο επίπεδο της ταχύτητας του νερού στο υδρογραφικό δίκτυο, προέκυψε πως οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0 και 17,8 m/s.

Το υδρογραφικό δίκτυο αναπτύσσει κατά κύριο λόγο ταχύτητες που κυμαίνονται από 2 - 4,5 m/s και τοποθετούνται στην ορεινή περιοχή της λεκάνης απορροής, ενώ σε ορισμένα τμήματα του η ταχύτητα κυμαίνεται μέχρι 8 - 17 m/s. Οι μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας παρατηρούνται, όταν το υδατόρεμα προσεγγίζει το σημείο εξόδου, σημειώνοντας τιμές που υπερβαίνουν τα 10 m/s. Ωστόσο, παρατηρούνται αυξομειώσεις των τιμών της ταχύτητας, πλησίον του σημείου εξόδου της λεκάνης.

9.9 Χάρτης ταχύτητας στρωματοροής



Χάρτης 25: Ταχύτητας στρωματοροής

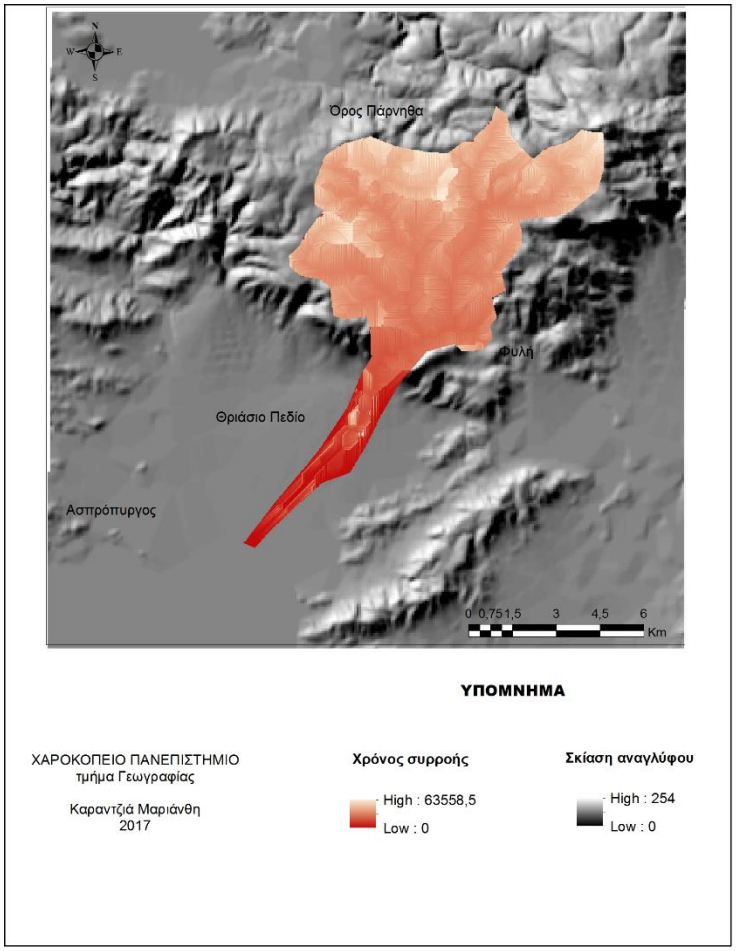
Από το αρχικό εξαγόμενο επίπεδο της ταχύτητας στη στρωματοροή, προέκυψε πως οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0 και 0,62 m/s. Για τη δημιουργία του παραπάνω χάρτη, ‘’απομονώσαμε’’ το υδρογραφικό δίκτυο, με τη βοήθεια του επαναταξινομημένου επιπέδου της συσσώρευσης ροής, με σκοπό να υπολογιστούν οι ταχύτητες που αναπτύσσονται στη στρωματοροή. Στη συνέχεια διαχωρίστηκαν οι τιμές της ταχύτητας σε 5 κλάσεις, όπως αποδίδεται στο υπόμνημα. Διαπιστώνεται, πως στη στρωματοροή αναπτύσσονται, κατά κύριο λόγο, ταχύτητες που κυμαίνονται από 0,10 έως 0,17 m/s, ενώ ακολουθούν τα τμήματα στα οποία η ταχύτητα κυμαίνεται από 0 έως 0,10 m/s. Στα τμήματα πλησίον του σημείου εξόδου, αναπτύσσονται ταχύτητες από 0,30 έως 0,62 m/s.

Έπειτα από την σύνθεση των ταχυτήτων ροής, για το κυρίως υδρογραφικό δίκτυο και στην στρωματοροή, ακολουθεί η συνένωση αυτών των δύο επιπέδων, μέσω της οποίας υπολογίζεται το τελικό επίπεδο της ταχύτητας για κάθε κελί της λεκάνης

απορροής. Η τελική ταχύτητα, περιλαμβάνει σαν εύρος τιμών, εκείνες της ταχύτητας στο υδρογραφικό δίκτυο, αλλά ταυτόχρονα διαθέτει και τις ταχύτητες στη στρωματοροή.

9.10 Χάρτης χρόνου απορροής της περιοχής

Δεδομένου, ότι έχει υπολογιστεί η τελική ταχύτητα ροής για κάθε κελί της λεκάνης, καταλήγουμε στο τρίτο στάδιο της προσομοίωσης που αφορά στον υπολογισμό του ζητούμενου χρόνου απορροής. Ο ζητούμενος χρόνος απορροής σε κάθε κελί, δύναται να εκτιμηθεί βάσει της ταχύτητας και του μήκους ροής, χρησιμοποιώντας το επίπεδο βαρύτητας 1/V (όπου V ταχύτητα ροής). Ο χρόνος απορροής, ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που απαιτείται έτσι ώστε νερό που καταλήγει με τη μορφή βροχόπτωσης σε οποιοδήποτε σημείο της λεκάνης απορροής να φθάσει στην έξοδο της λεκάνης.

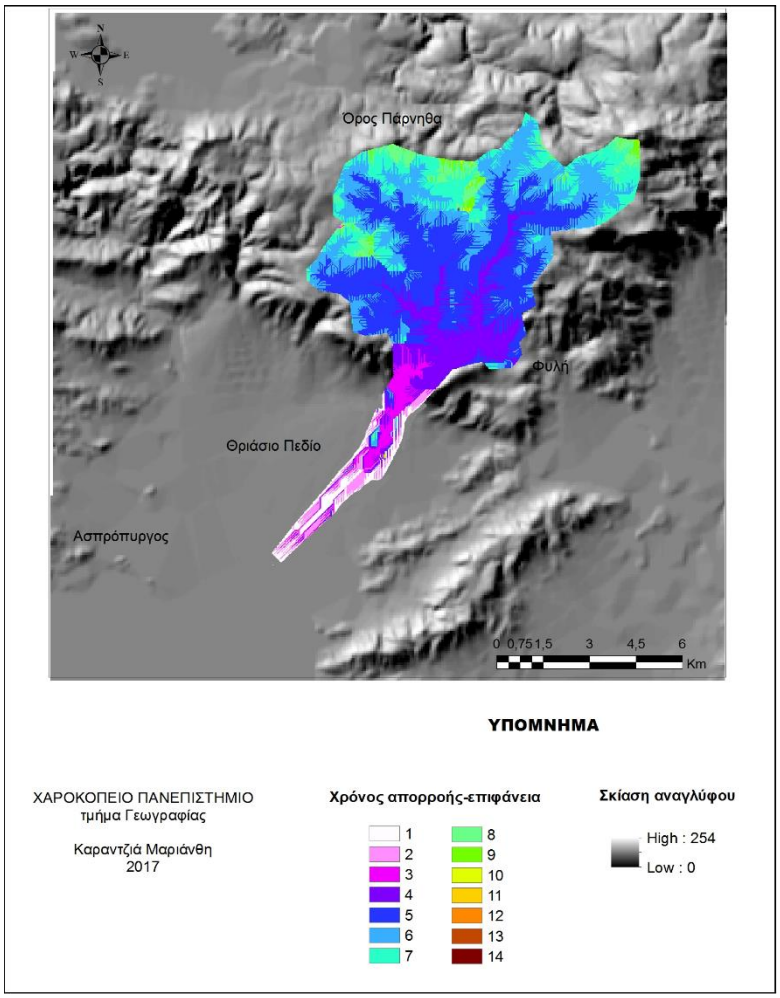


Χάρτης 26: Χρόνου απορροής της περιοχής

Από τον παραπάνω χάρτη διαπιστώνεται, ότι ο μέγιστος χρόνος απορροής ή χρονος συρροής του νερού στην έξοδο της λεκάνης ισοδυναμεί με 63558 δευτερόλεπτα (κατά προσέγγιση 17,6 ώρες). Το επίπεδο του χρόνου απορροής υποδεικνύει ότι το νερό που βρίσκεται πλησιέστερα στην έξοδο της λεκάνης, χρειάζεται λιγότερο χρόνο για απορροή. Στον αντίποδα, το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης χρειάζεται 63558 δευτερόλεπτα, για να φθάσει στην έξοδο.

9.11 Χάρτης ισόχρονων καμπυλών

Τέλος, το τέταρτο στάδιο της μεθοδολογίας της προσομοίωσης, σχετίζεται με τον σχεδιασμό και τη σύνθεση των ισόχρονων καμπυλών. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, πραγματοποιείται επαναταξινόμηση στο επίπεδο του χρόνου απορροής που εξήχθη παραπάνω. Παρακάτω παρατίθενται ο χάρτης ισόχρονων καμπυλών, καθώς και οι πίνακες με τα στατιστικά τους στοιχεία.



Χάρτης 27: Ισόχρονων καμπυλών

Κατ' αυτόν τον τρόπο, ο χάρτης που παράγεται, διαχωρίζεται σε 6 χρονικά διαστήματα, τα οποία απεικονίζουν της περιοχές της λεκάνης, όπου η απορροή χρειάζεται τον ίδιο χρόνο για να φθάσει στην έξοδο αυτής. Το αποτέλεσμα που προκύπτει, θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για να εκτιμηθεί ο όγκος του νερού που έπεσε κάθε ώρα σε κάθε ισόχρονη (παροχή).

Στη συνέχεια, αξιοποιώντας τις πληροφορίες που παρέχονται στο attribute table, του επιπέδου των ισόχρονων, μπορούμε να υπολογίσουμε την συνολική έκταση της κάθε ισόχρονης, από το field calculator του ArcMap. Ο τύπος εκτίμησης της έκτασης κάθε ισόχρονης είναι ο εξής: Area= Count*cell size^2.

Πίνακας 14: Στατιστικά στοιχεία ισόχρονων καμπυλών

Χρόνος (h)	Αριθμός κελιών	Ποσοστό επί του συνόλου (%)	Έκταση (km2)
1	1963	2,086	1,226875
2	2697	2,86	1,685625
3	3623	3,85	2,264375
4	12778	13,58	7,98625
5	31982	33,99	19,98875
6	23172	24,62	14,4825
7	12655	13,45	7,909375
8	4219	4,48	2,636875
9	891	0,94	0,556875
10	96	0,1	0,06
11	1	0,001	0,000625
12	4	0,004	0,0025
13	1	0,001	0,000625
14	4	0,004	0,0025

Από τον πίνακα, είναι εμφανές πως την μεγαλύτερη έκταση καλύπτει η πέμπτη ισόχρονη (19,98875 km^2), με την έκτη ισόχρονη να έπεται (14,4825 km^2). Οι υπόλοιπες ισόχρονες καλύπτουν από πολύ μικρή έως αμελητέα έκταση.

Σύμφωνα με τον χάρτη και τον πίνακα, συμπεραίνεται πως οι χρόνοι συρροής για τα τμήματα που αφορούν στις κοίτες των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου είναι πιο μικροί σε σχέση με τους χρόνους για τμήματα της λεκάνης που σχετίζονται με πλαγιές ή πρανή με αποτέλεσμα το νερό να απορρέει επιφανειακά ως στρωματοροή.

9.12 Απόκριση λεκάνης απορροής

Ο τελικός στόχος, είναι η κατασκευή του υδρογραφήματος της απορροής, για το σημείο εξόδου της λεκάνης. Με βάση τον πίνακα των στατιστικών στοιχείων (αριθμός κελιών, έκταση) για τις ισόχρονες, μπορούμε να υπολογίσουμε τον όγκο του νερού που δέχεται ανά μία ώρα, κάθε μία κλάση ισόχρονων καμπυλών, εκτιμώντας έτσι την παροχή στην έξοδο της λεκάνης. Έπειτα από αυτήν την διαδικασία, οι τιμές των παλμών ορίστηκαν κατά τον ακόλουθο τρόπο. Ο πρώτος παλμός, αντιστοιχεί στον όγκο του νερού που δέχτηκε την πρώτη ώρα η πρώτη ισόχρονη. Ο δεύτερος παλμός, αντιστοιχεί στον όγκο του νερού που έπεσε την δεύτερη ώρα στην πρώτη ισόχρονη και την πρώτη ώρα στην δεύτερη ισόχρονη. Με την ίδια λογική, πράτουμε και για τους υπόλοιπους παλμούς. Με την παραδοχή ότι η βροχόπτωση θεωρείται ομοιόμορφη, λόγω ελλειπή στοιχείων της βροχόπτωσης ανά ώρα. Όπου υπολογίζεται από το σύνολο της βροχόπτωσης εκείνης της ημέρας μια σταθερά υετού για κάθε ισόχρονη.

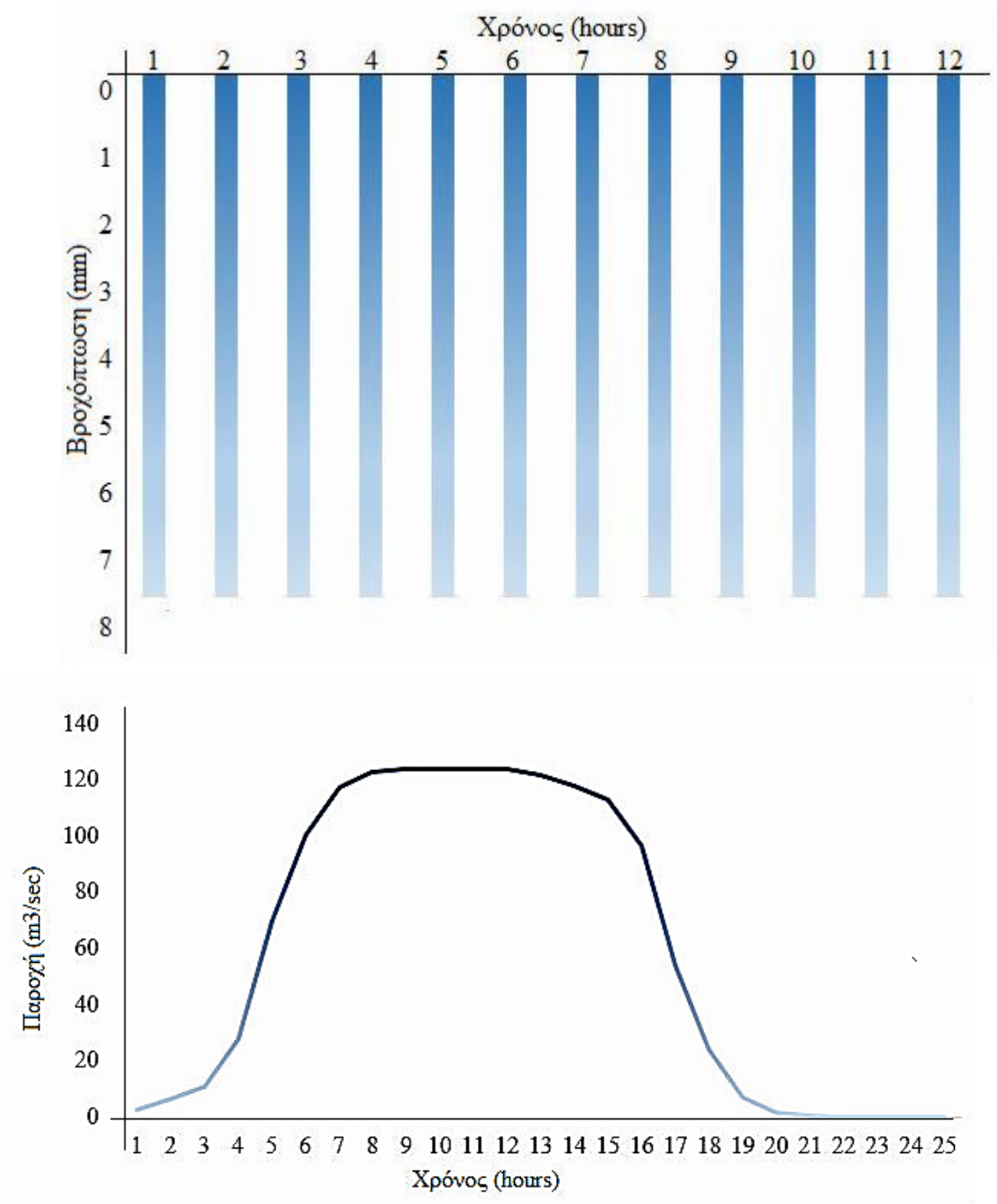
$$\text{Σταθερά} = 0{,}0905 \,/12 \text{ h} = 0{,}0076 \text{ m}$$

Μετά το πέρας της παραπάνω διαδικασίας, επιτελείται η εξαγωγή του συνθετικού μοναδιαίου άμεσου υδρογραφήματος που αναπαριστά τη διακύμανση της παροχής ανά ώρα στην έξοδο της υπό μελέτη λεκάνης. Ακολουθούν οι σχηματικές αναπαραστάσεις της διαδικασίας που περιγράφηκε σχετικά με τους παλμούς του νερού, καθώς και η παράθεση των υδρογραφημάτων, για τις δύο ξεχωριστές περιπτώσεις που μελετώνται.

		Ώρες											
Χρόνος (h)	Έκταση (m2)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1226875	9324,25	9324,25	9324,25	9324,25	9324,25	9324,25	9324,25	9324,25	9324,25	9324,25	9324,25	9324,25
2	1685625	12810,8	12810,8	12810,8	12810,8	12810,8	12810,8	12810,8	12810,8	12810,8	12810,8	12810,8	12810,8
3	2264375	17209,3	17209,3	17209,3	17209,3	17209,3	17209,3	17209,3	17209,3	17209,3	17209,3	17209,3	17209,3
4	7986250	60695,5	60695,5	60695,5	60695,5	60695,5	60695,5	60695,5	60695,5	60695,5	60695,5	60695,5	60695,5
5	19988750	151915	151915	151915	151915	151915	151915	151915	151915	151915	151915	151915	151915
6	14482500	110067	110067	110067	110067	110067	110067	110067	110067	110067	110067	110067	110067
7	7909375	60111,3	60111,3	60111,3	60111,3	60111,3	60111,3	60111,3	60111,3	60111,3	60111,3	60111,3	60111,3
8	2636875	20040,3	20040,3	20040,3	20040,3	20040,3	20040,3	20040,3	20040,3	20040,3	20040,3	20040,3	20040,3
9	556875	4232,25	4232,25	4232,25	4232,25	4232,25	4232,25	4232,25	4232,25	4232,25	4232,25	4232,25	4232,25
10	60000	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456	456
11	625	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75
12	2500	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
13	625	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75
14	2500	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19

	Παλμοί																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	9324,25	22135	39344,3	100040	251954	362021	422133	442173	446405	446861	446866	446885	437565	424774	407564	346869	194954	84887,3	24776	4735,75	503,5	47,5	42,75	23,75	19
Παροχή	2,59007	6,14861	10,929	27,7888	69,9873	100,561	117,259	122,826	124,001	124,128	124,129	124,135	121,546	117,993	113,212	96,3524	54,154	23,5798	6,88222	1,31549	0,13986	0,01319	0,01188	0,0066	0,00528

Σχήμα 20: Διαδικασία υπολογισμού Πλημμυρογραφήματος



Σχήμα 21: Συνθετικό Μοναδιαίο άμεσο Υδρογράφημα

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 21), απεικονίζεται, το συνθετικό μοναδιαίο άμεσο υδρογράφημα, το οποίο εκτιμήθηκε για την έξοδο της λεκάνης απορροής του παραπόταμου. Ταυτόχρονα, στο έτερο σχήμα αναπαρίσταται με τη μορφή ιστογράμματος η κύμανση της ομοιόμορφης βροχόπτωσης, ανά ώρα, πάνω από τη λεκάνη απορροής.

Από το παραπάνω διάγραμμα εξάγονται πολύ χρήσιμα συμπεράσματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διαχείριση πλημμυρικών γεγονότων, στην κατασκευή έργων προστασίας και στη διαχείριση των υδατικών πόρων εν γένει.

Καταρχήν η απόκριση της λεκάνης απορροής του ρέματος Γιαννούλας είναι σχετικά απλή. Καθώς το ρέμα είναι χείμαρρος περιοδικής ροής, οπότε η ανάλυση και ερμηνεία του υδρογραφήματος που προέκυψε από την προσομοίωση της βροχόπτωσης και της επιφανειακής απορροής είναι σχετικά απλή καθώς η κοίτη στερείται βασικής ροής.

Παρ' όλο την παραδοχή της βροχής που είναι σταθερή (7,6 mm) και τις δώδεκα ώρες του πλημμυρικού γεγονότος, φανερό είναι ότι μέγιστη παροχή παρατηρείται την $12^{η}$ ώρα (κρίσιμος χρόνος) και είναι της τάξης των 124,1 m^3/sec. Η μέση παροχή είναι 59, 5 m^3/sec για το γεγονός στις 2 Νοεμβρίου του 1977 και αντιστοιχεί σε επιγανειακή απορροή συνολικού όγκου νερού περίπου 5.000.000 m^3.

Τέλος, σημειώνεται ότι η μορφή του υδρογραφήματος δεν είναι τυπική αιφνίδιας πλημμύρας καθώς με δεδομένη μια σταθερή βροχόπτωση ανά ώρα, δεν παρατηρούνται τα τρία μέγιστα πλημμυρικής παροχής. Επομένως για να ήταν πιο αντικειμενική η συγκεκριμένη μελέτη αναγκαία είναι η βροχόπτωση ανά ώρα του συγκεκριμένου γεγονότος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 : Κριτική αποτίμηση - Συμπεράσματα

Οι πλημμύρες είναι ένα από τα πιο καταστρεπτικά φυσικά φαινόμενα που απασχολούν και προβληματίζουν τον άνθρωπο από το παρελθόν και συνεχίζουν μέχρι σήμερα. Έχουν γίνει πολλές μελέτες και έρευνες για τον καθορισμό του φαινομένου, των παραμέτρων που το προκαλούν, των συνεπειών που έχει τόσο στους ανθρώπους όσο και στις ιδιοκτησίες τους και τέλος, των τρόπων με τους οποίους μπορούν να αντιμετωπιστούν και να προληφθούν, αν είναι αυτό δυνατό. Παρά τη σημαντική πρόοδο σ' αυτόν τον τομέα, το πρόβλημα δεν έχει εξαλειφθεί και αυτό όχι μόνο στην Ελλάδα αλλά σε παγκόσμια κλίμακα. Οι πλημμύρες είναι φυσικά φαινόμενα που δεν μπορούν να αποτραπούν. Εντούτοις, η ανθρώπινη δραστηριότητα συμβάλλει στην αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης πλημμυρικών φαινομένων και των δυσμενών επιδράσεων τους. Η κλίμακα και η συχνότητα των πλημμυρών είναι πιθανό να αυξηθούν λόγω της αλλαγής του κλίματος, που θα επιφέρει υψηλότερη ένταση βροχοπτώσεων και αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Επίσης, η μη ορθή σε πολλές περιπτώσεις διαχείριση των λεκανών απορροής δημιουργούν προβλήματα στην ομαλή διόδευση των πλημμυρών. Πολλά κράτη μέλη λαμβάνουν ήδη μέτρα προστασίας κατά των πλημμυρών, αλλά η συντονισμένη δράση σε επίπεδο κοινότητας θα έφερνε καλύτερα συνολικά αποτελέσματα και θα βελτίωνε το γενικό επίπεδο προστασίας κατά των πλημμυρών.

Τα ΣΓΠ είναι όλο και πιο ενεργά στην υδρολογία και στη διαχείριση των υδάτινων πόρων με πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα. Χρησιμοποιούνται για την οριοθέτηση της λεκάνης, την εκτίμηση της απορροής, την υδρολογική προσομοίωση και τη χαρτογράφηση των πλημμυρών. Η πρόβλεψη των πλημμυρικών φαινομένων και των συνεπειών τους απαιτεί εκτενείς χωρικές πληροφορίες για τις λεκάνες απορροής για την εκτίμηση περιοχών υψηλού πλημμυρικού κινδύνου. Τα ΣΓΠ αποτελούν πολύτιμα εργαλεία για την απόκτηση των δεδομένων αυτών, για την προσομοίωση και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και συμβάλλουν σημαντικά στην διαδικασία λήψης αποφάσεων. Διευκολύνουν την εισαγωγή, την αποθήκευση, τη διαχείριση, την ανάλυση, την ένταξη και την παραγωγή χωρικών δεδομένων που μπορεί να βοηθήσει στην λήψη απόφασης σε πραγματικό χρόνο, στο στρατηγικό σχεδιασμό και την αποτελεσματική διαχείριση των κινδύνων και να αυξήσει την δυνατότητα μείωσης των επιπτώσεων. Τα ΣΓΠ μπορεί να βελτιώσουν την προειδοποίηση, την εκκένωση, να

αυξήσουν την αποτελεσματικότητα των συστημάτων έκτακτης ανάγκης γενικότερα στις περιπτώσεις φυσικών καταστροφών και ειδικότερα στην περίπτωση των πλημμυρών (Forte, 2005, Abdalla, 2006, Smith, 2001).

Σε μικρές λεκάνες απορροής, όπου ο διαθέσιμος χρόνος προειδοποίησης πλημμυρικού κινδύνου είναι μικρός, η εκ των προτέρων γνώση των περιοχών εκείνων που δύναται να πληγούν άμεσα από ένα ενδεχόμενο πλημμυρικό φαινόμενο είναι ιδιαιτέρως σημαντική. Έτσι με τη δημιουργία μιας απλής μεθοδολογίας, που βασίζεται στη χρήση του GIS, μπορούμε να προσδιορίσουμε χωρικά τις περιοχές εκείνες που έχουν αυξημένη επικινδυνότητα σε πλημμυρικά φαινόμενα.

Αντικείμενο της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η διερεύνηση των φυσικών και ανθρωπογενών αιτιών εκδήλωσης αιφνίδιων πλημμυρικών επεισοδίων στον κάτω ρου της κεντρικής κοίτης του ρέματος Γιαννούλας, που διασχίζει το ανατολικό Θριάσιο πεδίο στη Δυτική Αττική. Στην παρούσα εργασία, όπως έχει προαναφερθεί, γίνεται μια προσπάθεια περιγραφής της διαδικασίας μοντελοποίησης της επιφανειακής απορροής στην υδρολογική λεκάνη του ρέματος Γιαννούλας, μέσω της αξιοποίησης ενός χωρικά κατανεμημένου μοντέλου βροχής-απορροής, σε περιβάλλον Σ.Γ.Π, έτσι ώστε να γίνει η αποτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την εκτέλεση του χωρικά κατανεμημένου μοντέλου βροχής-απορροής, εφαρμόστηκε για το ΨΜΕ, με cell size 25x25, από το οποίο παρήχθησαν τα επίπεδα κλίσεων, διεύθυνσης ροής, συσσώρευσης ροής, κατάντη μήκους ροής, παροχής υδρογραφικού δικτύου, παροχής στρωματοροής, ταχύτητας υδρογραφικού δικτύου, ταχύτητας στρωματοροής, χρόνου απορροής και το επίπεδο των ισόχρονων καμπυλών. Σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι υπάρχει επίδραση της ανάλυσης του ΨΜΕ στα εξαγόμενα επίπεδα και στις τιμές τους, καθώς απαιτείται έλεγχος της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Μετά το πέρας αυτής της διαδικασίας, πραγματοποιήθηκε η χαρτοσύνθεση των προαναφερθέντων επιπέδων, ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων και η εξαγωγή των κατάλληλων συμπερασμάτων.

Κατά το τελικό στάδιο, της προσομοίωσης, επιτελέστηκε η εξαγωγή του συνθετικού μοναδιαίου άμεσου υδρογραφήματος που αναπαριστά τη διακύμανση της παροχής ανά ώρα στην έξοδο της υπό μελέτης λεκάνης. Η κατασκευή του υδρογραφήματος, συνετέλεσε στην εκτίμηση της αιχμής της πλημμυρικής παροχής, καθώς και του κρίσιμου χρόνου που μεσολαβεί προκειμένου να φθάσει την αιχμή αυτή αμέσως μετά την βροχόπτωση.

Αρνητικά τις μεθοδολογίας αυτής, είναι ότι δεν λαμβάνονται υπ' όψιν απώλειες λόγω κατείσδησης, εξατμισοδιαπνοής καθώς και οι τύποι των πετρωμάτων, το ποσοστό κορεσμού του νερού από προηγούμενη βροχή. Επιπρόσθετα η έλλειψη μετρήσεων της πλημμυρικής παροχής και της βροχόπτωσης, του υπό μελέτη υδρογραφικού δικτύου, για το συγκεκριμένο πλημμυρικό συμβάν, αποτέλεσε τροχοπέδη, στο να καταστεί εφικτός ο άμεσος έλεγχος της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Ωστόσο έχει εκπονηθεί πληθώρα μελετών στις οποίες έχει αξιοποιηθεί η ίδια μεθοδολογία, απ' όπου έχουν αποδοθεί πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Ειδικότερα το ρέμα Γιαννούλας, είναι ένας εφήμερος χείμαρρος 6^{ης} τάξης, σύνθετης μορφής, ο οποίος μετά από έντονα μετεωρολογικά φαινόμενα δίνει συχνά πλημμύρες. Από τη χαρτογράφηση της υδρολογικής λεκάνης που αποστραγγίζει το χείμαρρο, τις ποσοτικές αναλύσεις και την υδρολογική ανάλυση που πραγματοποιήθηκαν προέκυψε ότι σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου έχει η τοπογραφία της περιοχής, η γεωλογία και το κλίμα. Από τη μελέτη του Καρύμπαλη Ε. για τη διαδοχική κατά τάξη απορροή παρατηρείται ότι το δίκτυο στο σύνολο του παρουσιάζει ανωμαλίες στην οργάνωσή του. Οι λεκάνες που αποστραγγίζονται στο ορεινό τμήμα του υδρογραφικού δικτύου, βρίσκονται σε περιοχή που χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο και μεγάλες μορφολογικές κλίσεις, γεγονός που συντελεί στην αυξημένη πλημμυρική παροχή και την αύξηση της επιφανειακής απορροής σε σύντομο σχετικά χρόνο στην περιοχή του οικιστικού ιστού, στο πεδινό τμήμα του υδρογραφικού δικτύου.

Οι πλημμυρικές παροχές του χειμάρρου εκδηλώνονται στα κατάντη, λόγω της αυξημένης ανθρωπογενούς δραστηριότητας η φυσική έκταση της λεκάνης απορροής έχει μετατραπεί σε αστική. Οι ανθρώπινες παρεμβάσεις έχουν μεταβάλλει το τοπίο και τις γεωμορφολογικές συνθήκες του χειμάρριου συστήματος με τρόπο μη αναστρέψιμο. Οι κυριότερες επιπτώσεις που έγκειται να υπάρξουν από το φαινόμενο πλημμυρών, στην περιοχή μελέτης καθορίζονται από την παρουσία αντιπλημμυρικών έργων, την επέμβαση στο φυσικό περιβάλλον και ανάγλυφο, με αποτέλεσμα την μείωση χρόνου συρροής όγκων νερού και αύξηση πλημμυρικού όγκου. Οι ανθρώπινες παρεμβάσεις, η ένταση και παρουσία ανθρώπινης δραστηριότητας σε περιοχές με αυξημένους δείκτες πλημμυρικής επικινδυνότητας επιδεινώνει τα φαινόμενα πλημμυρών. Σε αυτό συμβάλλει και το γεγονός ότι κατά μήκος του ποτάμιου συστήματος έχουν γίνει διάφορες επεμβάσεις πέραν της οικιστικής δραστηριότητας, όπως επιχωματώσεις,

ακόμα και πλήρης κάλυψη της κοίτης, όπως αποδεικνύεται και στο φωτογραφικό υλικό του Παραρτήματος 2 για την πεδινή κοίτη.

Συνεπώς, ο σχεδιασμός των χρήσεων γης και ο περιορισμός των ανεξέλεγκτων ανθρωπογενών επεμβάσεων στην κοίτη του ποταμού αλλά και την παραποτάμια περιοχή, σε συνδυασμό με την παρακολούθηση τόσο της βροχόπτωσης στη λεκάνη απορροής όσο και της παροχής στον κάτω ρου, αποτελούν το κλειδί για την αποτελεσματική αντιπλημμυρική προστασία του ανατολικού Θριάσιου πεδίου και τον μετριασμό των αρνητικών συνεπειών που προκαλούν οι αιφνίδιες πλημμύρες. Με την βοήθεια της συγκεκριμένης μεθοδολογίας παρέχεται η δυνατότητα εκτίμησης ακραίων παροχών και σχεδίασης άμεσου υδρογραφήματος σε υδρογραφικά δίκτυα και υδατορέματα, για τα οποία δεν υφίστανται πραγματικές μετρήσεις, εφαρμόζοντας κατάλληλες τεχνικές προσομοίωσης με τη χρήση ΣΓΠ. Η γνώση του πλημμυρικού δυναμικού των λεκανών είναι σημαντική για τη σχεδίαση της αντιπλημμυρικής προστασίας και την κατασκευή αντιπλημμυρικών έργων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

Ελληνική:

-Βαφειάδης Μ., (2000), Επιφανειακή Υδρολογία, Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδραυλικής Και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Α.Π.Θ, Θεσσαλονίκη

-Γάκη-Παπαναστασίου Κ., Καρύμπαλης Ε., Κατσαφάδος Π., Μαρουκιάν Χ., (2008) Διερεύνηση των φυσικών και ανθρωπογενών αιτιών εκδήλωσης πλημμυρών στον κάτω ρου του χείμαρρου Ξηριά, Πρακτικά 8ου Διεθνούς Υδρογεωλογικού Συνεδρίου της Ελλάδας: 455-464

-Γκιόκας Α., (2009), Κατάρτιση μεθοδολογικού πλαισίου για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Αθήνα.

-ΓΥΣ, Τοπογραφικός χάρτης της Ελλάδας κλίμακας 1:50.000 φύλλο Αθήνα-Έλευσις

-Ε.Ο.Κ.Ε (Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή), (2005), Γνωμοδότηση με θέμα: Ανακοίνωση της Επιτροπής προς το Συμβούλιο, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, την Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή και την Επιτροπή των Περιφερειών: Διαχείριση του κινδύνου πλημμυρών-Πλημμύρες: Πρόληψη, προστασία και μετριασμός των επιπτώσεων τους, Διαχείριση του κινδύνου πλημμυρών, Βρυξέλλες

-Ζύγουρα Α., (2011) Ο ρόλος των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών του υδρογραφικού δικτύου του Σαρανταπόταμου στον πλημμυρικό κίνδυνο του Θριάσιου Πεδίου, Μεταπτυχιακή εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα

-Καρύμπαλης Ε., Παυλόπουλος Κ. (2004), Σημειώσεις & Εργαστηριακές Ασκήσεις Υδρολογίας, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Γεωγραφίας Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, Αθήνα

-Καραβίτης Γ., (2011), Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους και εναλλακτικοί τρόπο αναπαράστασης αναγλύφου-Μελέτη περίπτωσης νήσος Άνδρος, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα

-Καραμολέγκος Μ., (2012), Χρήση των Σ.Γ.Π. στην Υδρολογική Ανάλυση και στη Σύνταξη Χαρτών Κινδύνου Πλημμύρας, Διπλωματική εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα

-Καράμπελα Α., (1997), Γεωμορφολογική και περιβαλλοντική μελέτη του Θριάσιου πεδίου, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστημιο Αθηνών, Σχολή θετικών επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας

-Καρύμπαλης Ε., Γάκη-Παπαναστασίου Κ., και Μαρουκιάν Χ., (2007), Ποιος ευθύνεται για τα πλημμυρικά επεισόδια στο νομό Αττικής, η φύση ή ο άνθρωπος; Οι περιπτώσεις των λεκανών του Κηφισού ποταμού και του Μεγάλου Ρέματος της Ραφήνας, Στο: Το αύριο εν κινδύνω – φυσικές και τεχνολογικές καταστροφές στην Ευρώπη και την Ελλάδα. Κ. Σαπουντζάκη (επιμ.), εκδόσεις Gutenberg, 287-30

-Καρύμπαλης Ε., (2011), Εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου στη λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας (Θριάσιο Πεδίο) με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα

-Καρύμπαλης Ε., Κατσαφάδος Π., Καλογερόπουλος Κ., Καραλής Σ., Χαλκιάς Χ., (2013), Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου σε μικρές χειμαρρικές λεκάνες, στο Καρύμπαλης Ε., Παπαδόπουλος Α., Χαλκιάς Χ., (επιμ.), Η Γεωγραφία του Παράκτιου και Νησιωτικού Χώρου, Σταμούλη: Αθήνα

-Κουργιαλάς Ν., (2010), Ολοκληρωμένη Διαχείριση - Πρόβλεψη & Αντιμετώπιση Πλημμυρικών Φαινομένων σε Σύνθετες Γεωμορφολογικά Περιοχές με Χρήση Μαθηματικών Μοντέλων και GIS, Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

-Κουτσόπουλος Κ., (2002), Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και Ανάλυση Χώρου, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου

-Κρούσκα Ζ., (2014) Πλημμυρικός Κίνδυνος στο Θριάσιο Πεδίο, Μεταπτυχιακή εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα

-Κωτούλας Δ., (2001), Ορεινή Υδρονομική, Τα ρέοντα Ύδατα, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Αριστοτελείου Πανεπιστημίου, Θεσ/νίκη

-Λέκκας Ε., (2000), Φυσικές και τεχνολογικές καταστροφές, Τομέας Δυναμικής τεκτονικής εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Ε.Κ.Π.Α, Αθήνα

-Μαμάσης Ν., (2007), Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα, Διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Αθήνα

-Μαμάσης Ν., (2011), Τυπικά συστήματα υδατικών πόρων, Εκτίμηση πλημμυρικών παροχών, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατκών Πόρων, ΕΜΠ

-Μιμίκου Μ.Α., Μπαλτάς Ε.Α., (2006) Τεχνική υδρολογία, 4η Έκδοση, Αθήνα: Παπασωτηρίου

-Μουντράκης Δ., (1985), Γεωλογία της Ελλάδας, Univ. Studio Press: Θεσσαλονίκη

-Μπαντής, Σ. (2007). Διαχείριση φυσικών κινδύνων - Κατολισθήσεις, Διδακτικές Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

-Μπαλούτσος Γ., Κουτσογιάννης Δ., Οικονόμου Α., Καλλίρης Π., Διερεύνηση της απόκρισης της λεκάνης απορροής Ξηριά Κορίνθου στην καταιγίδα της 11-13 Ιανουαρίου 1997 με τη μέθοδο SCS, Γεωτεχνικά επιστημονικά θέματα Τεύχος 1 (ΙΙ), 77-90

- Μπέλλος Β., (2009), Υδρολογία, Κεφάλαιο 7, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών – Τομέας Υδραυλικών Έργων, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο, Θράκη

-Νικολόπουλος Α., (2004), Ημερίδα: «Αντιπλημμυρική προστασία Αττικής», ΤΕΕ

-Ξανθόπουλος Θ., Χριστούλας Δ., Μιμίκου Μ., Κουτσογιάννης Δ., Αφτιάς Μ., (1995), Το Αντιπλημμυρικό πρόβλημα της Αθήνας: Στρατηγική αντιμετώπισης, Πρακτικά Ημερίδας: Αντιπλημμυρική προστασία του λεκανοπεδίου της Αθήνας, ΤΕΕ, Αθήνα

-Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου για την αξιολόγηση και διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου

-Παπανικολάου Δ., (1986), Γεωλογία της Ελλάδας, εκδόσεις Επτάλοφος, Αθήνα

-Παπανικολάου Δ., Διακάκης Μ., (2011), Μεταβολές στην ένταση και στην κατανομή των φυσικών καταστροφών, Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, Τράπεζα της Ελλάδος, Αθήνα

-Παυλόπουλος Κ., (2016), Σημειώσεις Εργαστηριακών Ασκήσεων Γεωμορφολογίας, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

-Πέππας Ι., (2005) και Αντωνίου Ν., Υδρολογική μελέτη ρέματος Αγ, Γεωργίου, Μελέτη στα πλαίσια διευθέτησης της κοίτης του χειμάρρου, ΥΠΕΧΩΔΕ, Αθήνα

-Ράμπιας Ε., (2007), Υδραυλική προσομοίωση ποταμού Αλιάκμονα με χρήση του μοντέλου HEC-RAS, Μεταπτυχιακή εργασία ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα

-Στάθης Δ., (2004), Ακραία γεγονότα βροχής και πλημυρογένεση στην Ελλάδα, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων

-Στεφανίδης Π., (1995), Διερεύνηση αιτιών και μηχανισμών λειτουργίας πλημμυρικών φαινομένων στον Ελλαδικό χώρο, Πρακτικά διεθνούς συμποσίου με θέμα « Προστασία και Περιβαλλοντική Διαχείριση των Ρευμάτων» ΥΠΕΧΩΔΕ, Αθήνα, σελ. 139-140

-Συνοδινού Β. & Νιβολιανίτου Ζ., (2010), Σημαντικές Παράμετροι Δράσης και Διαδικασιών για την επιτυχή Διαχείριση Πλημμύρας στην Ελλάδα, 9ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ

-ΤΕΕ (2007), Συμπεράσματα Ημερίδας, Αντιπλημμυρικός σχεδιασμός-διαχείριση κινδύνου πλημμυρών, Αθήνα, 5 Δεκεμβρίου 2007

-ΥΠΕΧΩΔΕ (1998), Δνση Υδραυλικών Έργων Δ10, Οριστική μελέτη διευθέτησης χειμάρρου Αγ. Γεωργίου (Γιαννούλας), Μελετητής Γ. Καραβοκύρης και συνεργάτες, Αθήνα

-Χαλκιάς Χ., (2016), Σημειώσεις & Εργαστηριακές Ασκήσεις ΣΓΠ, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Γεωγραφίας Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, Αθήνα

Ξενόγλωσση:

-Andreadakis E., Fountoulis I., (2007), Flood hazard assessment in tectonically active areas, Συμπόσιο Τεκτονικής Γεωλογίας προς τιμήν του Ομότιμου Καθηγητή Ηλία Μαριολάκου, Ελληνική Γεωλογική Εταιρία

-ArcGIS Desktop Help, ESRI ArcGIS Desktop 9.3, Copyright 1999 – 2000

-Barredo J.I., (2007), Major flood disasters in Europe: 1950-2005, Nat Hazards 42, 125-148

-Brater, E. F. and H. W. King., (1976), Handbook of Hydraulics for the Solution of Hydraulic Engineering Problems, New York: McGraw-Hill Book Company

-Bronsert A., (2003), Floods and climatic change: interactions and impacts, Risk Anal 23, 545-557

-Burrough P.A., (1986), Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment, Monographs an Soil and Resources Survey, No 12, Oxford Science Publications, 103-135

-Camarasa Belmonte A.M., Segura Beltran F., (2001), Flood events in Mediterranean ephemeral streams (ramblas) in Valencia region, Spain, CATENA, 45(3): 229-249

-CEC, (2004), Flood risk management, Flood prevention, protection and mitigation, Commision of the European Communities, COM(2004) 472, Brussels

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

-Clark C., (1945), Storage and the unit hydrograph, Trans ASCE 110, 1419-1446

-Clarke K.C., (2001), Getting started with geographic information systems, 3rd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ

-Dankers R., and Feyen L., (2008), Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on highresolution climate simulations, J. Geophys. Res., 113

-Dooge J.C.I., (1959), A General Theory of the Unit Hydrograph Journal of Geophysical Research, 64, 241-256

-Du J., Xie H., Hua Y., Xu Y., Xu CY., (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

-E.E.A. (European Environmental Agency), (2007), Climate change and water adaptation issues, EEA, Office for Official Publications of the European Communities, Technical report No.2

-EM-DAT, The OFDA/CRED international disaster database, http://www.cred.be/emdat

-Forte F., Pennetta and Strobl R.O., (2005), Historic Records and GIS Application for Flood Risk Analysis in the Salento Peninsula (Southern Italy), Natural Hazards and Earth System Science, 5 (6), 833-844

-Garbrecht J., Shen H.W., (1988), The physical framework of the dependence between channel flow hydrographs and drainage network morphometry, Hydrological Processes, 2: 337-355

-Gardiner V., and Gregory K.J., (1982), Drainage density in rainfall-runoff modeling, In: Singh, V.P., (ed) Rainfall-runoff relationships, Water Resources Publications: Littleton (Colorado)

-Gaume E., Bain V., Bernardara P., Newinger O., Barbuc M., Bateman A., Blaskovicova L., Bloschl G., Borga M., Dumitrescu A., Daliakopoulos .I, Garcia J., Irimescu A., Kohnova S., Koutroulis A., Marchi L., Matreata S., Medina V., Preciso E., Sempere-Torres D., Stancalie G., Szolgay J., Tsanis I., Velasco D., Viglione A., (2009), A compilation of data on European flash floods, J Hydrol 367, 1–2, 70–78

-Gioti E., Riga C., Kalogeropoulos K., Chalkias C., (2013), A GIS-based flash flood runoff model using high resolution DEM and meteorological data, EARsel eProceedings 12, 1/2013

-Goodchild M. F., (1985), Geographic Information Systems in Undergraduate Geography: A Contemporary Dilemma, The Operational Geographer 8: 34-38

-Horton R.E., (1932), Drainage basin characteristics, Am. Geoph. Union 13, 350-361

-IPCC (2001), Climate Change: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovermental Panel on Climate Change, J.T Houghton et al (eds)

-Kalogeropoulos K., Karalis S., Karymbalis E., Chalkias C., Katsafados P., (2012), Modelling flash floods in Vouraikos River mouth Greece

-Koutsoyiannis D., Mamassis N., Efstratiadis A., Zarkadoulas N., Markonis I., (2012), Floods in Greece, Department of Water Resources and Environmental Engineering, National Technical University of Athens, Greece

-Kron W., (2002), Flood risk-hazard, exposure, vulnerability. In: Wu B, Wang ZY, Wang G, Huang GGH, Fang H, Huang J (eds) Flood defense, Science Press: New York

-Lastra J., Fernandez E., Diez-Herrero A., Marquinez J., (2008), Flood hazard delineation combining geomorphological and hydrological methods: an example in the Northen Iberian Peninsula, Nat Hazards 45(2), 277-293

-Llasat M.C., Llasat-Botija M., Rodriguez A., Lindbergh S., (2010a) Flash floods in Catalonia: a recurrent situation, AdvGeosci, 26, 105-111

-Maidment I., (1993), Handbook of Hydrology

-Maroukian H., Zamani A., Gaki-Papanastassiou K., and Pavlopoulos K., (1994), The implications of human interference in the natural environment of Africa, Greece, Proceedings of the 6th International Conference Environmental Contamination, Athens, 330-332

-Martin-Vide J.P., Ninerola D., Bateman A., Navarro A., Velasco E., (1999), Runoff and sediment transport in a torrential ephemeral stream of the Mediterranean coast, JournalofHydrology 225: 118–129

-Martini F., Loat R., (2007), Handbook on good practices for flood mapping in Europe, Paris/Bern: European exchange circle on flood mapping (EXCIMAP)

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

-Miller C.L, Laflamme R.A, (1958), The Digital terran model-theory and application, Photogrammetric Engineering, 24:433-442

-Patton P.C., and V.R. Baker, (1976), Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls, Water Resour. Res. 12, 941-952

-Perry C.A., (2000), Significant floods in the United States during the 20th Century-USGS measures a century of floods, U.S. Geological Survey, Fact Sheet 24

-Pilon P.J., (2003), Guidelines for reducing flood losses, report, UN Department of Economic and Social Affairs (DESA), Inter-Agency Secretariat of the International Stratgy for Disaster Reduction (UN/ISDR), UN Economic and Social Commision for Asia and the pacific (UNESCAP), United States of America, National Oceanic and Atmospheric Administration (USA NOAA), World Meteorogical Organization (WMO)

-Schumn S.A., (1956), Evaluation of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey, Bull. Geol. Soc. Amer., 67, 597-646

-Smith K., (2001), Environmental Hazards: Assessing risk and reducing disaster, 3d Edition, Routledge (Taylor &Francis Group), New York

-Strahler A., (1957), Quantitative analysis of watershed Geomorphology, Am. Geophys. Union Trans., 38 (6), 913-920

-Takeuchi K., (2006), ICHARM calls for an alliance for localism to manage the risk of water-related disasters, In: Tchiquirinskaia I, Thein KNN, Hubert P (eds) Frontiers in flood research, International Association of Hydrological Science (IAHS), Red Book Series

-UNEP Publication, (2004), APELL and Floods, A community-based approach for disaster reduction, APELL Brochure

-Viessman W.Jr., Lewis G.L., (1996), Introduction to Hydrology 4th ed., Harper Collins

-Wisner B., Blaikie P., Cannon T., and Davis I., (2004), At Risk-Natural hazards, people's vulnerability and disasters, Routledge, Wiltshire

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 : Εδαφοτομείς στη λεκάνη του ρέματος Γιαννούλας από το Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών (2007)

Εδαφοτομή 1

Ορίζων	Βάθος	Άργλος%	Ιλύς%	Άμμος%	
A	0 ως 7	17	29	54	*αμμώδης πηλός*
BT1	7 ως 22	23	19	58	*αμμοαργιλώδης πηλός*
BT2	22 ως 57	28	14	58	*αμμοαργιλώδης πηλός*

Βλάστηση:	Ανοιχτό δάσος χαλεπίου πεύκης
Υψόμετρο:	740μ
Φυσιογραφία:	Κάτω μέρος κλιτύος
Ανάγλυφο:	Απότομη περιοχή,κλίσεις 40%-70%
Γεωλογία:	ψαμμιτικός φλύσχης, τεμαχισμένος
Επιφανειακή διάβρωση:	Ελαφρά
Άλλα στοιχεία:	Μετρίως πετρώδες, μετρίως βραχώδες
Τοποθεσία:	Ανατολικό τμήμα λεκάνης, εντός της καμμένης έκτασης

Περιγραφή εδαφοτομής

A:
έντονα ορφνό χρώμα
μεσαία υφή
πολύ συχνά χαλίκια αποστρογγυλωμένα
μέτρια λεπτή υπογωνιώδη δομή
ελαφρά σκληρό έδαφος
όχι ασβεστούχο

BT1:
έντονα ορφνό χρώμα
βαρεία υφή
πολύ συχνά χαλίκια αποστρογγυλωμένα
ισχυρά λεπτή υπογωνιώδη δομή
σκληρό έδαφος
όχι ασβεστούχο

BT2:
ερυθρό χρώμα
βαρεία υφή
πολύ συχνά χαλίκια αποστρογγυλωμένα
ισχυρά λεπτή υπογωνιώδη δομή
σκληρό έδαφος
όχι ασβεστούχο

Εδαφοτομή 2

Ορίζων	Βάθος	Άργλος%	Ιλύς%	Άμμος%	
A	0 ως 11	12	25	63	*αμμώδης πηλός*
BT1	11 ως 29	19	29	52	*αμμώδης πηλός*
BT2	29 ως 65	19	18	63	*αμμώδης πηλός*
BT3	65 ως 98	31	18	51	*αμμοαργιλώδης πηλός*

Βλάστηση:	Κλειστό δάσος χαλεπίου πεύκης
Υψόμετρο:	750μ
Φυσιογραφία:	Κάτω μέρος κλιτύος
Ανάγλυφο:	Απότομη περιοχή,κλίσεις 40%-70%
Γεωλογία:	ψαμμιτικός φλύσχης, τεμαχισμένος
Επιφανειακή διάβρωση:	Ελαφρά
Άλλα στοιχεία:	Μετρίως πετρώδες, ελαφρώς βραχώδες
Τοποθεσία:	Ανατολικό τμήμα λεκάνης, εντός της καμμένης έκτασης

Περιγραφή εδαφοτομής

A:
σκούρο ορφνό χρώμα
μεσαία υφή
συχνά χαλίκια αποστρογγυλωμένα
μέτρια λεπτή πρισματική δομή
πολύ εύθρυπτο έδαφος
όχι ασβεστούχο

BT1:
έντονα ορφνό χρώμα
βαρεία υφή
συχνά χαλίκια αποστρογγυλωμένα
ισχυρά μέση πρισματική δομή
εύθρυπτο έδαφος
όχι ασβεστούχο

BT2:
έντονα ορφνό χρώμα
βαρεία υφή
πολύ συχνά χαλίκια αποστρογγυλωμένα
ισχυρά μέση πρισματική δομή
συνεκτικό έδαφος
όχι ασβεστούχο

BT3:
ερυθροκίτρινο χρώμα
βαρεία υφή
πολύ συχνά χαλίκια αποστρογγυλωμένα
ισχυρά χοντρή πρισματική δομή
συνεκτικό έδαφος
όχι ασβεστούχο

Εδαφοτομή 3

Ορίζων	Βάθος	Άργλος%	Ιλύς%	Άμμος%	
A	0 ως 20	46	26	28	*αργιλώδες*
C	20 ως 45	37	24	39	*αργιλοπηλός*

Βλάστηση:	Κλειστό δάσος ελάτης
Υψόμετρο:	1020μ
Φυσιογραφία:	Μέσο μέρος κλιτύος
Ανάγλυφο:	Λοφώδης περιοχή,κλίσεις 18%-40%
Γεωλογία:	σκληρός ασβεστόλιθος, τεμαχισμένος
Επιφανειακή διάβρωση:	Ελαφρά
Άλλα στοιχεία:	πετρώδες, πολύ βραχώδες
Τοποθεσία:	Βορειοανατολικό τμήμα λεκάνης, στα όρια της καμμένης έκτασης

Περιγραφή εδαφοτομής

A:	ερυθροκίτρινο χρώμα
	βαρεία υφή
	πολύ συχνά χαλίκια αποστρογγυλωμένα
	ισχυρά μέση υπογωνιώδη δομή
	συνεκτικό έδαφος
	ισχυρά ασβεστούχο
C:	ερυθροκίτρινο χρώμα
	βαρεία υφή
	πολύ συχνά χαλίκια αποστρογγυλωμένα
	ισχυρά μέση υπογωνιώδη δομή
	συνεκτικό έδαφος
	ισχυρά ασβεστούχο

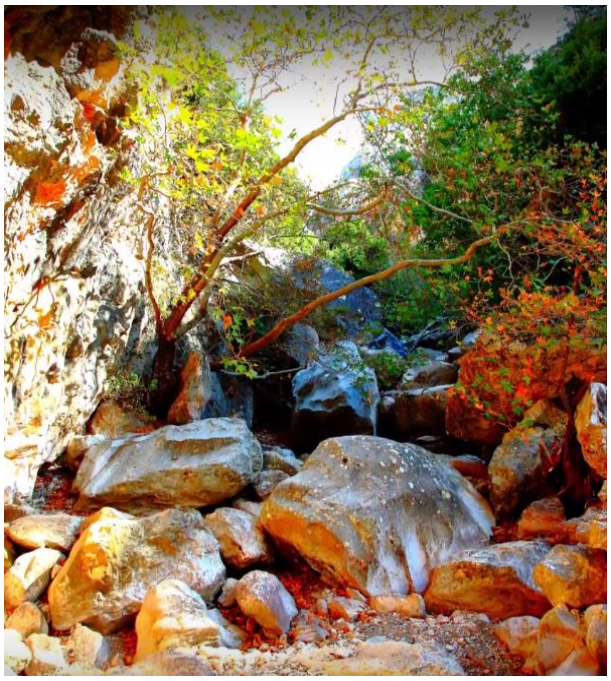
Πηγή: Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών (2007)

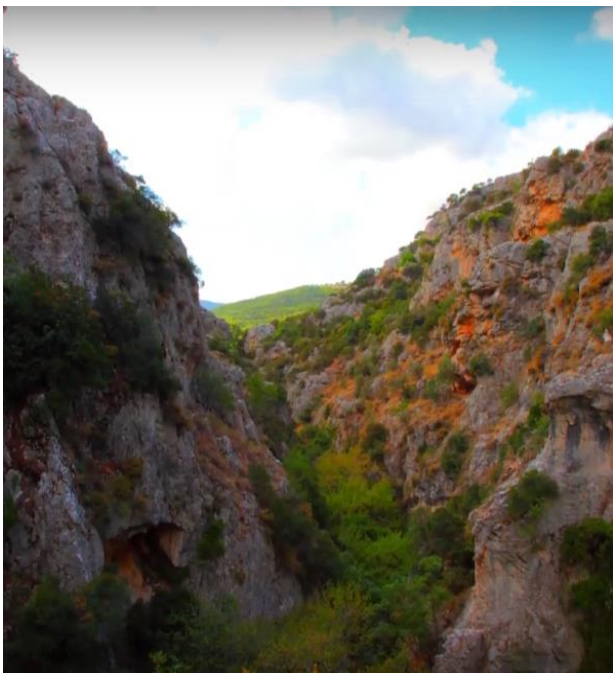
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 : Φωτογραφικό υλικό

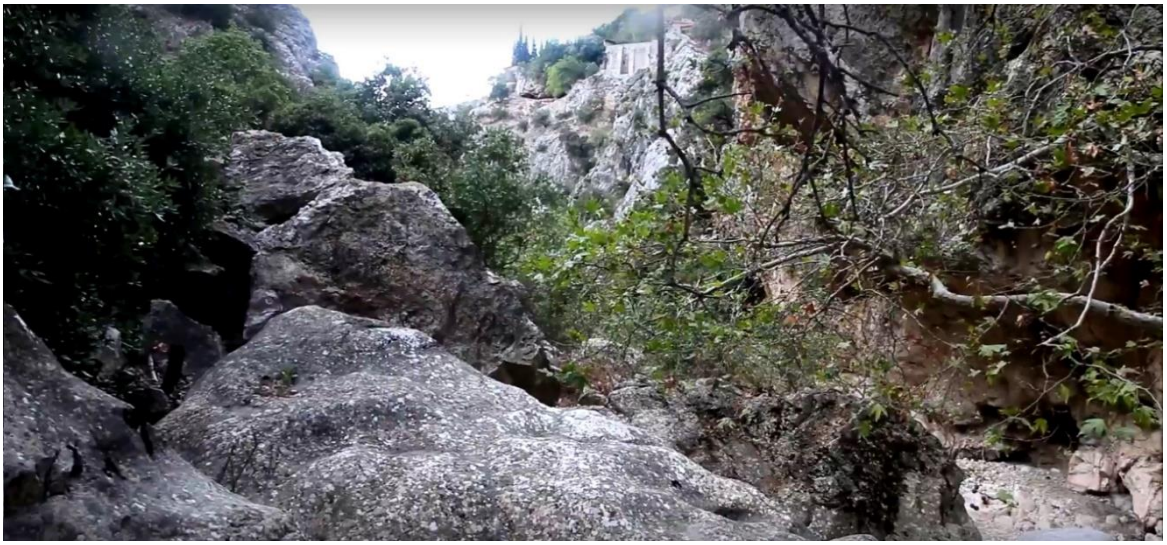
Το ορεινό τμήμα του ρέματος Γιαννούλας : Επίσκεψη 18 Δεκεμβρίου 2016

Κυρίως από το τμήμα του Σπηλαίου Πανός εώς την Μονή Κλειστών







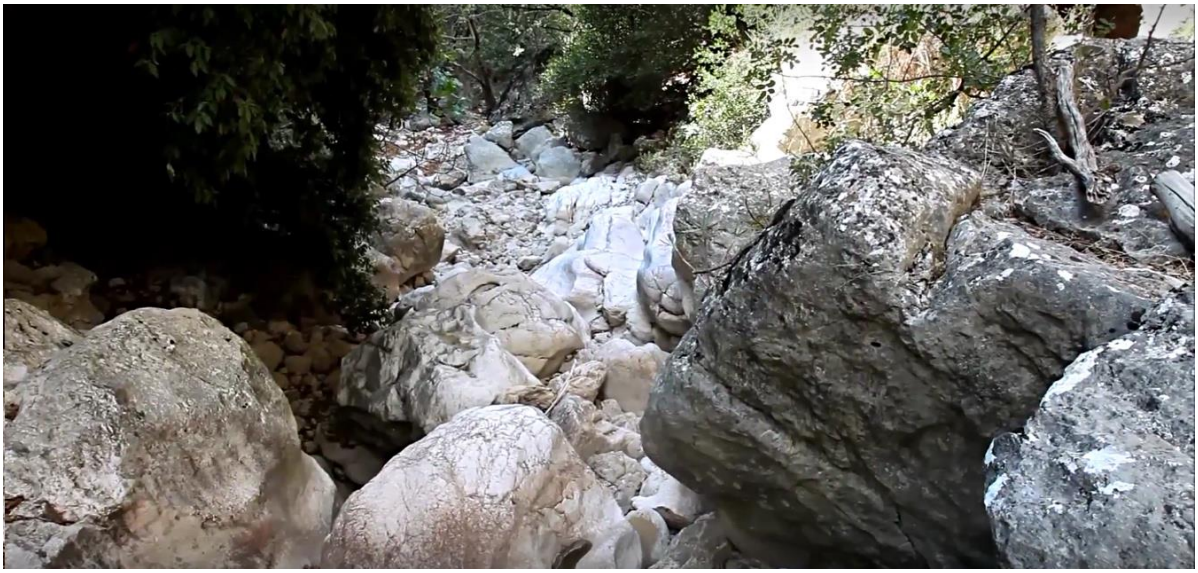










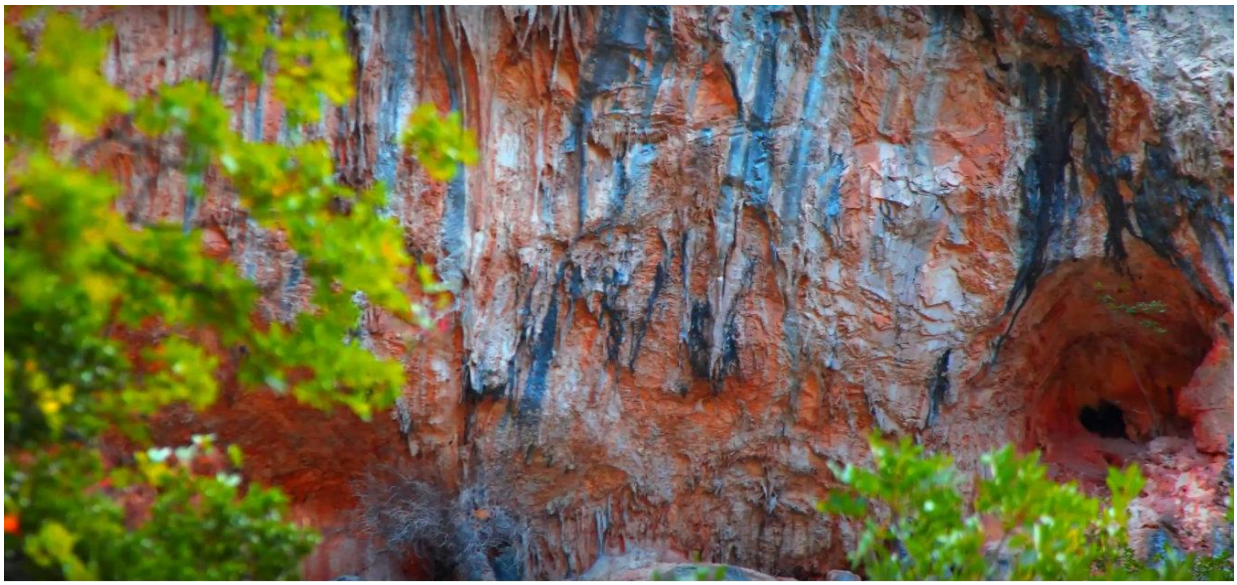






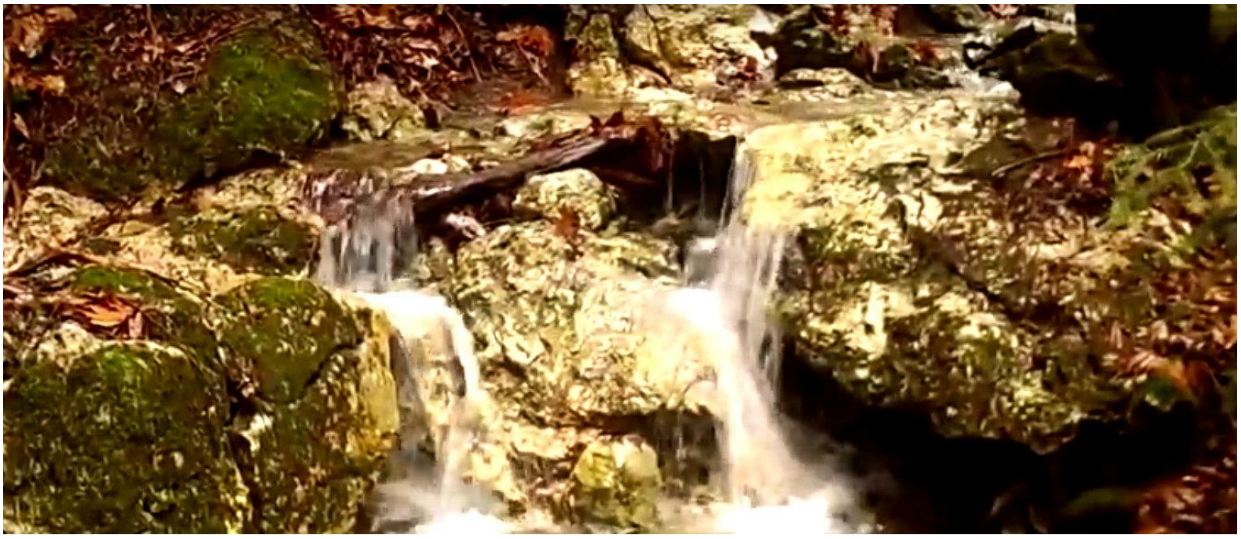














Το πεδινό τμήμα του ρέματος Γιαννούλας :

Πηγή : Καρύμπαλης (2015)









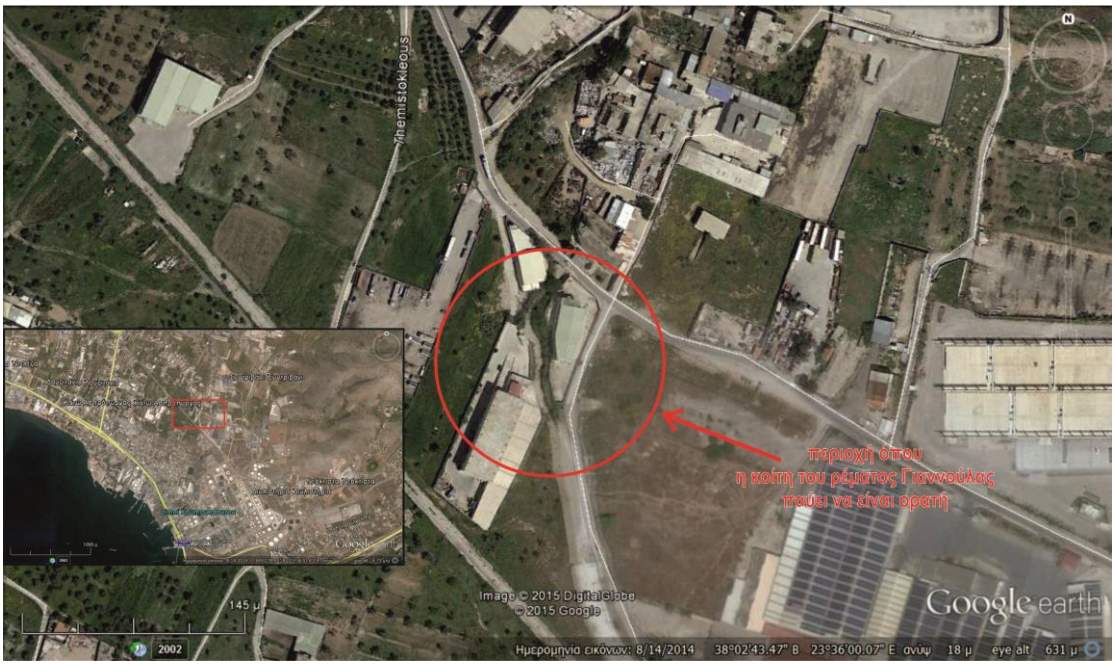








Οι περισσότερες και πλέον έντονες επεμβάσεις που σχετίζονται με την οικιστική και άλλη ανθρωπογενή δραστηριότητα αφορούν το τμήμα των τελευταίων 1,4 km πριν τις εκβολές. Η κοίτη δεν είναι πλέον ορατή και ενεργή για το μήκος αυτό και, πιθανά, έχει αντικατασταθεί από υπόγειο αγωγό άγνωστης διατομής, που είναι αμφίβολο αν είναι ικανός να παροχετεύσει την πλημμυρική παροχή αιχμής του χειμάρρου. Το σημείο όπου η κοίτη δεν είναι πλέον ορατή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Καρύμπαλης, 2015).



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: Άρθρα από εφημερίδες για την πλημμύρα που συνέβει 2-11-1977

(Εφημερίδα ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ, 03-11-1977, Βιβλιοθήκη της Βουλής των Ελλήνων)



Βραδυνή

12

Βιβλικός κατακλυσμός στην Αθήνα και Πειραιά

18 ΟΙ ΝΕΚΡΟΙ ΑΠΟ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ

Ώρες τρόμου και αγωνίας

(Πηγή: Βραδυνή 03-11-1977, Βιβλιοθήκη της Βουλής των Ελλήνων)



(Πηγή: Εφημερίδα ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ 03-11-1977)