



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Επίδραση δασικών πυρκαγιών στο  
πλημμυρικό καθεστώς λεκανών απορροής:  
Η περίπτωση του ρέματος Γιαννούλα στην  
Πάρνηθα»



*Φοιτητής: Λυμπερόπουλος Σπυρίδων*

Αθήνα,  
Μάρτιος  
2008

Επιβλέπων:  
Επίκουρος Καθηγητής Ι. Ναλμπάντης

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Ευχαριστίες</b>	<b>v</b>
<b>Περίληψη</b>	<b>vi</b>
<b>Abstract</b>	<b>viii</b>
<b>Κατάλογος συμβόλων</b>	<b>x</b>
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Η σημασία των πυρκαγιών από υδρολογική άποψη.....	1
1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	1
1.3 Διάρθρωση της εργασίας .....	2
<b>2 Επίδραση των δασικών πυρκαγιών στο υδρολογικό καθεστώς λεκανών απορροής</b>	<b>3</b>
2.1 Γενικά.....	3
2.2 Επίδραση στο έδαφος.....	3
2.3 Επίδραση στην απορροή γενικά .....	6
2.4 Επίδραση στην πλημμυρική απορροή .....	9
<b>3 Μεθοδολογία εκτίμησης πλημμύρας σχεδιασμού πριν και μετά τις πυρκαγιές</b>	<b>13</b>
3.1 Γενικά.....	13
3.2 Ανάλυση ισχυρών βροχοπτώσεων – Κατάρτιση όμβριων καμπυλών.....	14
3.2.1 Τυπικές αναλυτικές εκφράσεις όμβριων καμπυλών .....	15
3.2.2 Αναλυτική έκφραση όμβριων καμπυλών συμβατή με τη γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών (GEV) .....	17
3.2.3 Αναλυτική έκφραση όμβριων καμπυλών συμβατή με τη γενικευμένη κατανομή μεγίστων τύπου I (Gumbel) .....	19
3.2.4 Το λογισμικό «Υδρογνώμων» .....	19
3.3 Κατάρτιση υετογράμματος σχεδιασμού.....	20
3.4 Υπολογισμός περισσεύματος βροχόπτωσης.....	22
3.4.1 Γενικά .....	22
3.4.2 Η μέθοδος του δείκτη $\varphi$ .....	23
3.4.3 Η μέθοδος SCS.....	24
3.5 Το υδρογράφημα πλημμυρικού γεγονότος και οι συνιστώσες του.....	27
3.5.1 Απλοποιημένη αναπαράσταση των συνιστωσών της επιφανειακής απορροής .....	27

3.5.2	Διαχωρισμός βασικής ροής και χαρακτηριστικά μεγέθη υδρογραφήματος .....	27
3.5.3	Χρόνος συγκέντρωσης και μέθοδοι εκτίμησης του .....	29
3.6	Το συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα .....	30
3.6.1	Γενικά .....	30
3.6.2	Το αδιάστατο Μοναδιαίο Υδρογράφημα της υπηρεσίας SCS .....	32
3.6.3	Προσδιορισμός του υδρογραφήματος άμεσης απορροής .....	33
3.6.4	Μέθοδοι μέτρησης παροχής .....	33
3.7	Εναλλακτικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης .....	35
3.8	Διόδευση πλημμύρας δια μέσου υδατορεύματος .....	36
3.8.1	Γενικά .....	36
3.8.2	Η μέθοδος Muskingum-Cunge .....	38
3.9	Το λογισμικό HEC-HMS .....	39
<b>4</b>	<b>Το ρέμα Γιαννούλας (Αγ. Γεωργίου)</b> .....	<b>41</b>
4.1	Γενικά .....	41
4.2	Αντιπλημμυρικά έργα πεδινής κοίτης .....	45
4.3	Η ορεινή λεκάνη του ρέματος .....	46
4.4	Οι πυρκαγιές του 2007 .....	47
<b>5</b>	<b>Επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων</b> .....	<b>49</b>
5.1	Βροχομετρικά δεδομένα .....	49
5.1.1	Ο αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός Ζωγράφου και τα πρωτογενή δεδομένα .....	49
5.1.2	Επεξεργασία δεδομένων .....	51
5.2	Γεωγραφικά δεδομένα .....	55
5.2.1	Γενικά .....	55
5.2.2	Ψηφιακά μοντέλα εδάφους (ανύψωσης) .....	56
5.2.3	Εξαγωγή υδρολογικών χαρακτηριστικών .....	58
<b>6</b>	<b>Εφαρμογή της μεθοδολογίας – Αποτελέσματα</b> .....	<b>64</b>
6.1	Γενικά .....	64
6.2	Κατάρτιση όμβριων καμπυλών .....	64
6.3	Κατάρτιση υετογράμματος σχεδιασμού .....	67
6.4	Υπολογισμός περισσεύματος βροχόπτωσης .....	70
6.5	Προσδιορισμός συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος .....	74
6.6	Προσδιορισμός Υδρογραφήματος Άμεσης Απορροής για πραγματικό γεγονός .....	77
6.7	Προσδιορισμός υδρογραφήματος σχεδιασμού για διάφορες περιόδους επαναφοράς πριν και μετά τις πυρκαγιές .....	81

6.8	Σύγκριση αποτελεσμάτων πριν και μετά τις πυρκαγιές.....	91
6.8.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης.....	91
6.8.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης και άλλων μελετών.....	94
<b>7</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>95</b>
	<b>Αναφορές</b>	<b>99</b>
	Στην ελληνική γλώσσα.....	99
	Ξενόγλωσσες.....	100
	Από διαδίκτυο.....	101
	<b>Παράρτημα 1: Υετογράμματα σχεδιασμού</b>	<b>102</b>
	<b>Παράρτημα 2: Υδρογραφήματα σχεδιασμού</b>	<b>108</b>
	<b>Παράρτημα 3: Εδαφοτομές εντός της λεκάνης</b>	<b>114</b>
	<b>Παράρτημα 4: Φωτογραφικό υλικό από τη λεκάνη</b>	<b>117</b>
	<b>Παράρτημα 5: Α/Φ καμένων εκτάσεων</b>	<b>119</b>

# Ευχαριστίες

---

Με αυτή τη διπλωματική εργασία κλείνει ένας πολύ σημαντικός κύκλος φοίτησης στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και στο Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών.

Οι γνώσεις που αποκομίστησαν από όλη αυτή την πορεία στο ΕΜΠ ήταν αναμφισβήτητα πολλές, και δίνουν την προοπτική για ένα ελπιδοφόρο μέλλον στον εργασιακό τομέα.

Θερμότατες ευχαριστίες στον καθηγητή μου και επιβλέποντα αυτής της εργασίας κ. Ιωάννη Ναλμπάντη για την υπομονή του, και τη αμέριστη βοήθειά του τις αμέτρητες φορές που χρειάστηκε μέχρι την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης την κ. Λήδα Στάμου, Ε.Τ.Ε.Π του εργαστηρίου Χαρτογραφίας για την καθοριστική συμβολή της στο θέμα της υδρολογικής ανάλυσης ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε περιβάλλον ΓΣΠ, χωρίς την οποία αυτό το τμήμα της εργασίας δεν θα είχε ποτέ ολοκληρωθεί.

Οφείλω, ακόμη, να ευχαριστήσω τα μελετητικά γραφεία Πέππας Ε.Π.Ε. και Καραβοκύρης & Συνεργάτες που έχουν εκπονήσει τις μελέτες διευθέτησης του ρέματος Γιαννούλας για λογαριασμό του ΥΠΕΧΩΔΕ, για τα στοιχεία που μου διέθεσαν σχετικά με το ρέμα και για τις πολύτιμες συμβουλές τους πάνω σε πρακτικές λεπτομέρειες.

Ολοκληρώνοντας δεν μπορώ να παραλείψω να ευχαριστήσω τους γονείς μου και όσους μου στάθηκαν ηθικά στη δύσκολη αυτή πορεία στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Λυμπερόπουλος Σπύρος

Μάρτιος 2008

## Περίληψη

---

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση των δασικών πυρκαγιών στο πλημμυρικό καθεστώς λεκανών απορροής. Με αφορμή τις πρόσφατες πυρκαγιές στην Πάρνηθα, μελετάται η περίπτωση της λεκάνης του ρέματος Γιαννούλα (Αγ. Γεωργίου), και ειδικότερα η επίδραση που είχε η πυρκαγιά στην πλημμυρική παροχή στο σημείο εξόδου της ορεινής λεκάνης, δεδομένου ότι σχετικά μεγάλο κομμάτι της ορεινής λεκάνης είχε καεί. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται καταξιωμένη μεθοδολογία για τον καθορισμό της πλημμυρικής παροχής της λεκάνης πριν και μετά τις πυρκαγιές.

Είναι γεγονός ότι η μερική ή ολική καταστροφή του δάσους από πυρκαγιές και γενικά της βλάστησης του εδάφους συντελεί στη μερική ή ολική παράσυρση του εδάφους από τις βροχές, στην αύξηση της διάβρωσης του εδάφους και στη δημιουργία πλημμυρών. Οι λιγοστές στον ευρωπαϊκό χώρο μελέτες σχετικά με την επίδραση των πυρκαγιών σε πλημμυρικά φαινόμενα έχουν δείξει ότι η φωτιά, αυξάνοντας την αδιαπερατότητα του εδάφους, και την υδροφοβικότητά του, προκαλεί στις περισσότερες περιπτώσεις, αύξηση της απορροής και των πλημμυρικών παροχών αιχμής σε σχέση με τις συνθήκες πριν την πυρκαγιά, με τα ποσοστά της αύξησης που κυμαίνονται με τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε λεκάνης.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της πλημμυρικής παροχής στο ρέμα της Γιαννούλας πριν τις πυρκαγιές περιλαμβάνει δύο προσεγγίσεις: Κατά την πρώτη, την αδρομερή προσέγγιση, η λεκάνη θεωρείται αδιαμέριστη σαν ολότητα και οι υπολογισμοί γίνονται στο Microsoft Excel, ενώ κατά τη δεύτερη, την ημικαταναμημένη, η λεκάνη διαμερίζεται σε δύο υπολεκάνες, όπου η μία περιλαμβάνει μόνο τις καμένες εκτάσεις και η άλλη τις μη καμένες και οι υπολογισμοί γίνονται στο λογισμικό HEC-HMS.

Η αδρομερής προσέγγιση περιλαμβάνει ως πρώτο βήμα ανάλυση βροχομετρικών δεδομένων, παραγωγή όμβριων καμπυλών μέσω του προγράμματος «Υδρογνώμων», και εξαγωγή υετογράμματος σχεδιασμού για την περιοχή μελέτης, με περίοδο επαναφοράς  $T = 50$  χρόνια. Στη συνέχεια, με τη μέθοδο SCS, μετατρέπονται τα ύψη βροχόπτωσης σε περισεύματα βροχόπτωσης και κατασκευάζεται το αδιάστατο συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα κατά SCS βάσει των μορφομετρικών στοιχείων της λεκάνης που έχουν εξαχθεί ύστερα από ανάλυση με ΓΣΠ. Με βάση το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα κατασκευάζεται, τελικώς, το υδρογράφημα άμεσης απορροής. Από το τελευταίο, με θεώρηση της βασικής απορροής ως αμελητέας, εκτιμάται η πλημμυρική αιχμή στο σημείο εξόδου της λεκάνης. Καθοριστική παράμετρος στην παραπάνω μοντελοποίηση είναι ο αριθμός καμπύλης (CN). Δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στον παράγοντα της προηγούμενης εδαφικής υγρασίας (AMC) και, όπου απαιτείται, γίνεται η κατάλληλη αναγωγή του CN.

Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόστηκε ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα: (α) υπολογισμός της πλημμυρικής παροχής αιχμής για το γεγονός σχεδιασμού με περίοδο επαναφοράς  $T = 50$  χρόνια πριν την πυρκαγιά, (β) μέτρηση στο πεδίο της πλημμυρικής στάθμης στο σημείο εξόδου για ένα ισχυρό γεγονός βροχόπτωσης μετά την πυρκαγιά (το Δεκέμβριο 2007), (γ) εύρεση, με τον τρόπο αυτό, της πλημμυρικής παροχής αιχμής στο

σημείο εξόδου μετά την πυρκαγιά με τη σχέση του Manning, (δ) εύρεση, με δοκιμές, της τιμής του αριθμού καμπύλης CN μετά την πυρκαγιά (με ταυτόχρονη μεταβολή του χρόνου συγκέντρωσης  $t_c$ , όπως περιγράφεται στη μεθοδολογία) με την οποία η μετρηθείσα πλημμυρική παροχή αιχμής ταυτίζεται με την υπολογισμένη, (ε) αναγωγή του CN από το πραγματικό πλημμυρικό γεγονός στο γεγονός σχεδιασμού με περίοδο επαναφοράς  $T = 50$  χρόνια, (στ) υπολογισμός της πλημμυρικής παροχής αιχμής για το γεγονός σχεδιασμού με περίοδο επαναφοράς  $T = 50$  χρόνια, (ζ) σύγκριση των παροχών αιχμής πριν και μετά την πυρκαγιά για το γεγονός σχεδιασμού με περίοδο επαναφοράς  $T = 50$  χρόνια.

Η παραπάνω σύγκριση έδειξε ότι η παροχή αιχμής στο σημείο εξόδου παρουσιάζεται αυξημένη σε ποσοστό 17% μετά την πυρκαγιά. Η αύξηση είναι σημαντική και μεγαλύτερη από ότι αναμένεται βάσει των βιβλιογραφικών τιμών του CN. Η ακρίβεια, βέβαια, της αδρομερούς προσέγγισης περιορίζεται από την έλλειψη βροχομετρικών δεδομένων στη θεωρούμενη λεκάνη και τα μεγάλα υψόμετρα της Πάρνηθας και από την αβεβαιότητα στη μέτρηση της πλημμυρικής στάθμης για το επιλεχθέν πραγματικό πλημμυρικό γεγονός μετά την πυρκαγιά.

Στη δεύτερη προσέγγιση, την ημικατανεμημένη, η λεκάνη του ρέματος διαχωρίζεται σε δύο υπολεκάνες. Το υδρογράφημα της ανάντη υπολεκάνης (υπολεκάνη 2, καμένα) διοδεύεται στην έξοδο της συνολικής ορεινής λεκάνης όπου πραγματοποιείται σύνθεση με το υδρογράφημα της κατάντη υπολεκάνης (υπολεκάνη 1, μη καμένα). Σε κάθε υπολεκάνη εφαρμόζεται η ίδια μεθοδολογία που περιγράφηκε πιο πάνω για την αδρομερή προσέγγιση με τη διαφορά ότι μεταβολή του CN μετά τις πυρκαγιές θεωρείται μόνον στην υπολεκάνη 2. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται αύξηση της πλημμυρικής παροχής αιχμής μετά τις πυρκαγιές για το τυπικό γεγονός σχεδιασμού με περίοδο επαναφοράς  $T = 50$  χρόνια (κατά 23%). Σε όρους απόλυτης τιμής, η παροχή αιχμής είναι αρκετά μεγαλύτερη εκείνης της αδρομερούς προσέγγισης αλλά η ποσοστιαία αύξηση λόγω της πυρκαγιάς δίνει συγκρίσιμες τιμές.

Οι αναλύσεις που περιγράφηκαν πιο πάνω επεκτάθηκαν με εξέταση και άλλων πλημμυρικών γεγονότων σχεδιασμού με περιόδους επαναφοράς από 10 ως 10 000 έτη.

Η ανάλυση και σύγκριση των υδρογραφημάτων πριν και μετά τις φωτιές και με τις δύο προσεγγίσεις δείχνει αύξηση των πλημμυρικών παροχών στο σημείο εξόδου μετά τις πυρκαγιές. Η αύξηση αυτή πάντως δεν είναι σε τόσο σημαντικό βαθμό που να δικαιολογεί την κινδυνολογία που έχει αναπτυχθεί γύρω από τις αναμενόμενες πλημμύρες στην Πάρνηθα σαν αποτέλεσμα των εκτεταμένων πυρκαγιών. Ο αριθμός καμπύλης CN μετά τις πυρκαγιές είναι αρκετά υψηλότερος από ότι πριν τις φωτιές, δείγμα της μείωσης της διαπερατότητας του εδάφους. Σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων μελετών (π.χ., στη Σικελία) επιβεβαιώνουν τη διαδικασία που ακολουθήθηκε. Η εξέταση των παροχών αιχμής πριν και μετά τις πυρκαγιές για περιόδους επαναφοράς από 10 ως 10 000 έτη έδειξε ότι η ποσοστιαία αύξηση (%) της παροχής είναι μεγαλύτερη για μικρότερες περιόδους επαναφοράς παρά για μεγαλύτερες. Τα αποτελέσματα που αναφέρονται στην εργασία υποστηρίζουν την υπόθεση ότι το υδρολογικό καθεστώς της λεκάνης αλλάζει σαν αποτέλεσμα της φωτιάς, ειδικά για τα συνήθη πλημμυρικά γεγονότα (με χαμηλή περίοδο επαναφοράς).

## Abstract

---

The effect of forest fires is evaluated in regard to the flood regime of river basins. Motivated by the recent fires in Parnitha Mountain, the case of the river basin of the Giannoula (or St. George) stream is studied. The focus is on the influence the fire on the flood peak discharge at the outlet of the mountainous part of the basin a large part of which has been burnt. For this purpose, a widely accepted methodology is being used after some modifications for defining the basin's flood peak discharge before and after the fires.

It is commonly accepted that partial or complete destruction of vegetation land cover due to fires leads to removal of surface soil. Multiple processes which are triggered by rainfall are involved such as flooding and erosion. Very few studies at the European level are available which evaluate the effect of fire on the hydrological response of river basins. In general, these have shown that fire augments water repellency and hydrophobicity of the surface soil. Increased volumes of surface runoff and flood peak discharges have been measured as compared to pre-fire conditions. The percentage of increase has been, however, found to vary widely.

Two methodological approaches were followed for determining pre-fire flood regime of the test basin. The first one is a lumped approach where the whole basin is considered as a single homogeneous entity and the calculations are made within MS-Excel. The second approach is of the semi-distributed type with a partitioning of the basin into two sub-basins: the upper sub-basin which includes only the burnt areas and the lower sub-basin which is unburnt. Within this approach calculations are performed with the aid of the HEC-HMS software package.

First, historical rainfall depths are processed with the aid of the "Hydrognomon: software package to produce IDF curves and develop design hyetographs. Second, rainfall depths are transformed into excess rainfall depths via the SCS method. Third, a unit hydrograph is constructed based on the dimensionless unit hydrograph proposed by SCS. The necessary morphometric information of the basin results from processing geographical information within GIS. Fourth, the direct runoff hydrograph is derived and the total discharge hydrograph is obtained by assuming negligible baseflow which is realistic for the test basin. Fifth, the flood peak discharge at the basin outlet is drawn from the hydrograph. The parameter known as the curve number (CN) plays a crucial role in the above modelling process. Particular attention is paid to the antecedent moisture condition (AMC) and, where needed, CN is modified accordingly.

For the lumped approach, the above classical methodology was applied as follows: (a) the flood peak discharge is estimated for the design event with a return period  $T = 50$  years before the fire; (b) the flood stage is measured for a significant rainfall event after the fire (in December 2007); (c) the flood peak discharge at the outlet after the fire is estimated based on the Manning formula; (d) the curve number (CN) value is found for post-fire conditions (by altering at the same time the concentration time  $t_c$ , as described in the methodology) which brings the measured (through stage) very close to the estimated (through rainfall) flood peak



discharge; (e) CN from the real flood event is transformed into CN of the design event with a return period  $T = 50$  years; (f) the flood peak discharge for the design event with a return period  $T = 50$  years is calculated; (g) the peak discharges before and after the fire are compared for the design event with a return period  $T = 50$  years.

The above comparison showed a 17% increase in the peak discharge at the basin outlet, after the fire. This increase is significant and greater than that expected from the literature CN values. The uncertainty, however, of the results of the lumped approach is expected to be high mainly due to the lack of precipitation data within the test basin, the high altitudes of Parnitha Mountain and the uncertainty of the flood stage measurement for the chosen real flood event after the fire.

In regard to the semi-distributed approach, the hydrograph of the upper sub-basin (sub-basin 2, burnt) is routed to the basin outlet where a synthesis with the hydrograph of the lower sub-basin (sub-basin 1, unburnt) takes place. All methodological features are identical to those of the lumped approach with the exception of the CN alteration after the fires: here only CN of sub-basin 2 is altered after the fires. An increase of the flood peak discharge after the fires by 23% is observed concerning the typical design event with a return period  $T = 50$  years. In terms of absolute values, the peak discharge is higher than that of the lumped approach, but the magnitudes of the percentage increase are comparable. Although the semi-distributed approach must be considered more accurate, it suffers from the same uncertainties which were discussed above.

The above described analyses were expanded to other flood design events with return periods from 10 to 10000 years.

According to both approaches, the analysis and comparison of the hydrographs before and after the fires showed an increase in flood peak discharges after the fires. The increase is nevertheless not that important so as to justify the high concerns raised around the forthcoming floods in Parnitha as a result of the extended fires. The curve number (CN) after the fires was found considerably higher than before, which is a sign of the decrease of the water repellency of the surface soil. Comparison with other studies (e.g., in Sicily) confirmed the results and the methodology followed. The examination of peak discharges before and after the fires for return periods from 10 to 10000 years showed that the percentage of the discharge increase is more significant for low return periods than for high ones. This supports the hypothesis that the hydrological response of the basin changes as a result of fire, especially for the usual flood events (those with low return periods).

## Κατάλογος συμβόλων

CN	Αριθμός καμπύλης απορροής
C	Αριθμός Courant στη μέθοδο διόδευσης Muskingum-Cunge Std
$h_{a0}$	Αρχικό ύψος βροχής
$t_{a0}$	Αρχικό χρονικό διάστημα που η βροχόπτωση μετατρέπεται μόνο σε απώλειες
$S_r$	Αποθήκευση στο τμήμα υδατορεύματος
$x$	Βάρος συμμετοχής της εισροής στη διόδευση με μέθοδο Muskingum
$P$	Βρεχόμενη περίμετρος
$d$	Διάρκεια βροχόπτωσης
$t_r$	Διάρκεια περισσεύματος βροχόπτωσης
$S$	Δυνητικά μέγιστη κατακράτηση
$A$	Εμβαδόν λεκάνης απορροής
$A_w$	Εμβαδόν υγρής διατομής
$i_a$	Ένταση απωλειών
$i$	Ένταση βροχόπτωσης
$S_f$	Κλίση γραμμής ενέργειας
$z$	Κλίση πρηνών
$S_0$	Κλίση πυθμένα
$S_m$	Μέση κλίση λεκάνης
$K$	Μέσος χρόνος διαδρομής αιχμής πλημμύρας διαμέσου τμημ. υδατορεύματος
$L$	Μήκος υδατορεύματος
$a, b, c$	Παράμετροι ομβρίων καμπυλών
$\eta, \theta, \psi, \lambda, \kappa, \omega$	Παράμετροι ομβρίων καμπυλών
$Q$	Παροχή
$Q_p$	Παροχή αιχμής
$q_0$	Παροχή ανά μονάδα μήκους από υδρογράφημα εισροής
$T$	Περίοδος επαναφοράς
$h_r$	Περίσσειμα βροχόπτωσης
$b$	Πλάτος πυθμένα
$y$	Στάθμη νερού
$C_u$	Συντελεστής αδιάστατου μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά SCS
$n$	Συντελεστής τραχύτητας κατά Manning
$c$	Ταχύτητα διάδοσης κύματος
$U$	Τεταγμένες μοναδιαίου υδρογραφήματος
$s_x$	Τυπική απόκλιση
$R$	Υδραυλική ακτίνα
$l$	Υδρογράφημα εισροής στη διόδευση με μέθοδο Muskingum
$H$	Υψόμετρο
$h$	Ύψος βροχόπτωσης
$T_p$	Χρόνος ανόδου μοναδιαίου υδρογραφήματος
$t_c$	Χρόνος συγκέντρωσης λεκάνης
$t_p$	Χρόνος υστέρησης

# 1 Εισαγωγή

---

## 1.1 Η σημασία των πυρκαγιών από υδρολογική άποψη

Οι εκτεταμένες πυρκαγιές είναι γεγονός ότι επηρεάζουν ισχυρά την υδρολογική συμπεριφορά φυσικών λεκανών, ιδίως στις Μεσογειακές περιοχές που είναι επιρρεπείς σε τέτοιους κινδύνους. Είναι γενικά παραδεκτό ότι οι πυρκαγιές αυξάνουν τον κίνδυνο πλημμυρών λόγω της απώλειας του καλύμματος βλάστησης και της συνακόλουθης μείωσης της διαπερατότητας του εδάφους. Στην ευρωπαϊκή βιβλιογραφία υπάρχουν λίγες μελέτες που εκτιμούν την επίδραση της πυρκαγιάς στην υδρολογική απόκριση των λεκανών απορροής και, συγκεκριμένα, των μεσογειακών. Αυτή η σπανιότητα ποσοτικών υδρολογικών μελετών αντανακλά τη δυσκολία απόκτησης δεδομένων υψηλής ποιότητας ώστε να συγκριθούν συνθήκες πριν και μετά τη φωτιά. Τα προβλήματα από τις φωτιές, ειδικά στον ελλαδικό χώρο, είναι ιδιαίτερα μεγάλα αν αναλογιστεί κανείς τα ζεστά, ξηρά καλοκαίρια και τις μικρές διάρκειες και έντονες βροχοπτώσεις.

Η πρόσφατη πυρκαγιά στην Πάρνηθα, το καλοκαίρι του 2007, εκτός από την τεράστια οικολογική καταστροφή σε έναν από τους ελάχιστους πνεύμονες πρασίνου του λεκανοπεδίου Αττικής, έφερε στο προσκήνιο και το φόβο για επερχόμενες πλημμύρες. Από τις λεκάνες απορροής των ρεμάτων που έχουν καεί, ιδιαίτερα επικίνδυνη φαίνεται η περίπτωση του ρέματος της Γιαννούλας (Αγ. Γεωργίου). Το ποσοστό της καμένης έκτασης του ρέματος αγγίζει το 23% περίπου της ορεινής λεκάνης του ρέματος, ποσοστό αρκετά μεγάλο που αποτέλεσε και την αφορμή για την μελέτη αυτή, μιας και αρκετές πυκνοκατοικημένες περιοχές ή βιομηχανικές εκτάσεις στους πρόποδες του βουνού, αντιμετωπίζουν το ενδεχόμενο να πληγούν περισσότερο από πλημμύρες του εν λόγω ρέματος από ό,τι τις προηγούμενες χρονιές.

## 1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση της επίδρασης των δασικών πυρκαγιών στο πλημμυρικό καθεστώς λεκανών απορροής. Ως περιοχή μελέτης επιλέχτηκε η λεκάνη του ρέματος Γιαννούλα στην Πάρνηθα. Γίνεται, έτσι, μια προσπάθεια να υπολογιστούν οι πλημμυρικές παροχές του ρέματος τόσο πριν όσο και μετά τις πυρκαγιές του 2007 ώστε να εκτιμηθεί η αλλαγή στο πλημμυρικό καθεστώς της λεκάνης εξαιτίας των πυρκαγιών. Η διερεύνηση γίνεται θεωρώντας πλημμυρικά γεγονότα σχεδιασμού για διάφορες περιόδους επαναφοράς.

Τα υπάρχοντα δεδομένα για τη μελέτη ήταν περιορισμένα. Για την ύπαρξη ασφαλών δεδομένων πλημμυρικής στάθμης και παροχών θα αρκούσε η ύπαρξη ενός σταθμηγράφου και ενός υδρομετρικού σταθμού στο σημείο εξόδου της λεκάνης, πράγμα που δεν ήταν εύκολο να υλοποιηθεί. Αρκεστήκαμε, έτσι, στη χρήση και επεξεργασία άλλων (πλην των δεδομένων απορροής) πρωτογενών δεδομένων, όπως βροχομετρικών υψών, χαρτογραφικών και βιβλιογραφικών δεδομένων καθώς και σε μια μέτρηση της πλημμυρικής

στάθμης στο πεδίο. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε έχει ως βάση θεμελιώδεις αρχές της επιστήμης της Τεχνικής Υδρολογίας. Η ελληνική και ξένη βιβλιογραφία εξετάστηκε επισταμένα και χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός εγκεκριμένων μεθοδολογιών ώστε να γίνει η ορθή προσαρμογή των δεδομένων και η εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής αιχμής στην έξοδο της λεκάνης. Χρησιμοποιήθηκαν δύο προσεγγίσεις για τη μελέτη, η αδρομερής στην οποία η λεκάνη εξετάζεται ως ολότητα, και η ημικατανεμημένη προσέγγιση όπου η λεκάνη διασπάται σε δύο υπολεκάνες, την καμένη και την μη καμένη. Έτσι, η στρατηγική της έρευνας εστίασε πάνω στα δύο ακόλουθα θέματα: (α) παραγωγή των υδρογραφημάτων άμεσης απορροής πριν και μετά τις πυρκαγιές, και (β) μελέτη των αλλαγών στο πλημμυρικό καθεστώς μέσω της ανάλυσης των παραπάνω υδρογραφημάτων.

Όπως φανερώνουν οι περισσότερες μελέτες σε παρεμφερές αντικείμενο, αναμένεται αύξηση των πλημμυρικών παροχών μετά τα φαινόμενα φωτιάς. Τα ποσοστά αύξησης διαφέρουν από μελέτη σε μελέτη και είναι συνάρτηση ποικίλων χαρακτηριστικών της λεκάνης. Το ερώτημα λοιπόν που φιλοδοξεί να απαντήσει η εν λόγω εργασία είναι κατά πόσο επηρέασε η πυρκαγιά του καλοκαιριού 2007 την πλημμυρική απορροή του ρέματος της Γιαννούλας και κατά πόσο αληθεύουν οι φόβοι περί εκτεταμένων πλημμυρών στην περιοχή.

### **1.3 Διάρθρωση της εργασίας**

Το πρώτο κεφάλαιο είναι η εισαγωγή. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται, συνοπτικά, στοιχεία του δασικού περιβάλλοντος της χώρας μας, κύρια σε ό,τι αφορά στην επίδραση των δασικών πυρκαγιών στο έδαφος και τις υδρολογικές συνθήκες μιας λεκάνης απορροής (στην απορροή γενικά, τη διάβρωση και την πλημμυρική απορροή). Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της πλημμύρας σχεδιασμού. Παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο αναφορικά με συγκεκριμένες μεθοδολογίες της επιστήμης της υδρολογίας για (α) την κατάρτιση όμβριων καμπυλών και υετογράμματος σχεδιασμού, (β) τον υπολογισμό περισσευμάτων βροχής, (γ) την κατασκευή συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος σχεδιασμού. (δ) την κατάρτιση του υδρογραφήματος άμεσης απορροής, και (ε) τη διόδευση πλημμυρών δια μέσου υδατορεύματος. Γίνεται αναφορά επίσης σε λογισμικά όπως το λογισμικό «Υδρογνώμων και το HEC-HMS που χρησιμοποιούνται στη μελέτη. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται στοιχεία σχετικά με το ρέμα μελέτης και τη λεκάνη απορροής, τα αντιπλημμυρικά έργα που έχουν ήδη κατασκευαστεί και στοιχεία σχετικά με την πυρκαγιά που έπληξε σημαντικό τμήμα της Πάρνηθας το καλοκαίρι του 2007. Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων όπως τα βροχομετρικά δεδομένα και τα γεωγραφικά δεδομένα με ΓΣΠ, ώστε από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους για τη λεκάνη να εξαχθούν μορφομετρικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά. Στο έκτο κεφάλαιο αναλύεται η εφαρμογή της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση των πλημμυρικών παροχών πριν και μετά τις πυρκαγιές καθώς και τα αποτελέσματα της μελέτης. Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα της μελέτης σχετικά με την επίδραση των δασικών πυρκαγιών στη λεκάνη απορροής του ρέματος της Γιαννούλας. Στα παραρτήματα 1 και 2 παρατίθενται τα υετογράμματα και τα υδρογραφήματα σχεδιασμού, ενώ στο παράρτημα 3 παρουσιάζονται οι εδαφοτομές εντός της λεκάνης από τις οποίες αντλήθηκαν στοιχεία για το είδος του εδάφους. Τέλος, στα παραρτήματα 4 και 5 παρατίθενται φωτογραφίες από τη λεκάνη και Α/Φ των καμένων εκτάσεων.

## **2 Επίδραση των δασικών πυρκαγιών στο υδρολογικό καθεστώς λεκανών απορροής**

---

### **2.1 Γενικά**

Διασχίζοντας την Ελλάδα, από Βορρά προς Νότο, εύκολα διαπιστώνονται σημαντικές διαφορές στη φυσιογνωμία της φυσικής βλάστησης και του τοπίου γενικότερα, γεγονός που είναι αποτέλεσμα των βιοκλιματικών επιδράσεων και ιδιαίτερα της επίδρασης των γενικών χαρακτηριστικών του μεσογειακού βιοκλίματος της χώρας μας. Η Ελλάδα γεωγραφικά καταλαμβάνει ένα ευρύ πεδίο της εύκρατης ζώνης, από Β προς Ν, καθόσον εκτείνεται από τον 42ο παράλληλο μέχρι τον 36ο και επηρεάζεται από τη θάλασσα της Μεσογείου. Ως γνωστό (Γκόφας, 2001), η διάταξη του ανάγλυφου από Β-ΒΔ προς Ν-ΝΑ, ασκεί σοβαρή επίδραση στην κατανομή των μετεωρολογικών-κλιματικών στοιχείων, ιδιαίτερα στην κατανομή των βροχοπτώσεων, με τη επίδραση της θάλασσας που την περιβρέχει. Στα πλαίσια αυτών των γεωμορφολογικών συνθηκών, οι διάφορες δασικές περιοχές διαφοροποιούνται βιοκλιματικά, σε μεγάλη ποικιλία διαπλάσεων της φυσικής βλάστησης, από τις ξηροθερμόβιες-θερμομεσογειακές διαπλάσεις μέχρι και τις ψυχρόβιες.

Οι δασικές πυρκαγιές ασκούν σοβαρή επίδραση στην τελική διαμόρφωση και υποβάθμιση του δασικού οικοσυστήματος (έδαφος, κλίμα, βροχόπτωση και βλάστηση). Οι έντονες πυρκαγιές, εκτός των άλλων, επηρεάζουν σοβαρά την υδρολογική συμπεριφορά των υδρολογικών λεκανών. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν λίγες μελέτες που εκτιμούν την επίδραση της φωτιάς στην υδρολογική απόκριση των λεκανών, και πιο συγκεκριμένα των μεσογειακών περιοχών. Αυτή η σπανιότητα τέτοιων μελετών δείχνει την δυσκολία απόκτησης αξιόπιστων δεδομένων κατάλληλων για συγκρίσεις της υδρολογικής δίαιτας λεκανών απορροής πριν και μετά από μια πυρκαγιά.

### **2.2 Επίδραση στο έδαφος**

Έχει αποδειχθεί (De Bano, 2000), ότι μετά από μια μεγάλης έντασης δασική πυρκαγιά, η αποσάθρωση των σκληρών ασβεστολιθικών πετρωμάτων, των μεταμορφωσιγενών σχιστολίθων και των τριτογενών αποθέσεων, αυξάνει σημαντικά με την επίδραση των θερμοκρασιακών μεταβολών και των μεταβολών της υγρασίας. Για παράδειγμα, οι επιφάνειες ασβεστολιθικών πετρωμάτων από τις οποίες πέρασε δασική πυρκαγιά, ανάλογα με την έντασή της, δημιουργεί  $\text{CaO}$  (ασβέστη), το οποίο, προσλαμβάνοντας νερό της βροχής, μετασχηματίζεται σε υδροξύλιο του ασβεστίου ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) με αποτέλεσμα την έντονη αποσάθρωση του πετρώματος. Το ίδιο συμβαίνει στα μεταμορφωσιγενή πετρώματα και τις τριτογενείς αποθέσεις, όταν αυτά περιέχουν  $\text{CaCO}_3$ .

Σε ό,τι αφορά στο δασικό έδαφος, οι πυρκαγιές μεταβάλλουν τις φυσικοχημικές ιδιότητές του και, συνεπώς, και την παραγωγικότητά του. Η μερική ή ολική καταστροφή του δάσους και γενικά της βλάστησης του εδάφους συντελεί στη μερική ή ολική παράσυρση του εδάφους

από τις βροχές, στην αύξηση της διάβρωσης του εδάφους και στην εμφάνιση χειμαρρικών φαινομένων (De Bano, 2000).

Η έντονη διάβρωση του εδάφους στη χώρα μας συντελεί: (α) στη καταστροφή των παραγωγικών δασών σε προϊόντα ξύλου, και (β) τροφοδοτεί τους χείμαρρους με φερτά υλικά από τα οποία μεγάλο ποσοστό είναι γόνιμο λεπτό έδαφος.

Η έντονη απορροή μετά την ετήσια (κατά μέσο όρο) καταστροφή 100 χιλ. στρεμ. συγκροτημένου δάσους, οδηγεί στην απώλεια  $29 \times 10^6 \text{ m}^3$  νερού που ήταν προορισμένο, με τη διαδικασία της διήθησης και της διαπερατότητας του χουμώδους δασικού εδάφους, να εμπλουτίσει τα υπόγεια αποθέματα νερού (Γκόφας, 2001).

Οι Inbar et al (1997) απέδειξαν ότι πυρκαγιές σε δασική έκταση του Ισραήλ αύξησε 100 φορές την παραγωγή ιζημάτων. Η καμένη έκταση στο δάσος του όρους Carmel (τυπικό μεσογειακό δάσος με σκληροφυλλική βλάστηση, γνωστή ως μακί) ήταν  $4 \text{ km}^2$  και αντιστοιχούσε στο 90% της αντίστοιχης λεκάνης. Το πέτρωμα της περιοχής μελέτης ήταν ασβεστολιθικό, και οι κλίσεις στο 40% της έκτασης ήταν πολύ απότομες ξεπερνώντας το 30%. Μετά από κάθε καταιγίδα, μετριόταν η απορροή (καθόσον είχε εγκατασταθεί στις καμένες εκτάσεις υδρομετρικός σταθμός - βλ. παρ. 2.3), η βροχόπτωση (με δύο αισθητήρες και ηλεκτρονικούς καταγραφείς) και η παραγωγή ιζημάτων.

Η απώλεια εδάφους ήταν υψηλή ως αποτέλεσμα της διάβρωσης από τις πυρκαγιές. Η παραγωγή ιζημάτων ήταν ιδιαίτερα υψηλή το πρώτο έτος μετά τη φωτιά, περίπου  $1 \text{ kg/m}^2$ . Η αναγέννηση στο δάσος κάλυψε περίπου το 20% από τον πρώτο κιόλας χρόνο και μείωσε την παραγωγή ιζημάτων τον δεύτερο χρόνο των πειραμάτων. Τέτοιες γεωμορφολογικές αλλαγές σημειωτέον είναι μη αντιστρεπτές και, ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες μετά τις πυρκαγιές, μπορούν να αλλάξουν τη μορφή του εδάφους. Οι καταρρίψεις και ο τεμαχισμός δέντρων μετά την πυρκαγιά αυξάνει επίσης την παραγωγή ιζημάτων. Έτσι, λόγω των επιδράσεων στη φυτοκάλυψη και το έδαφος, η φωτιά αυξάνει την πιθανότητα διάβρωσης (Inbar et al, 1997).

Το δασικό έδαφος που καλύπτεται από αείφυλλα πλατύφυλλα και, κυρίως, οι θερμομεσογειακές διαπλάσεις χαρακτηριστικών φυτών του ελλαδικού χώρου, όπως η χαρουπιά, η αγριελιά, ο σχίνος και το πουρνάρι, όταν καούν πολλές φορές και δεν προστατευθούν στη συνέχεια από τη βροχή, τότε, η ικανότητά τους για ανάπτυξη εξαντλείται και με τη διαδικασία της διάβρωσης αποκαλύπτεται το σκελετικό έδαφος. Έτσι, οι διαπλάσεις αυτές, ύστερα από την πυρκαγιά, διαβρώνονται εύκολα, χάνοντας τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους (N, Mg, K, P). Αυτά τα συστατικά, μετά από πυρκαγιά, καλύπτουν σε μορφή στάχτης και λεπτόκοκκου υλικού (χούμο, φυλλοτάπητα και οργανικού εδάφους) την επιφάνεια του εδάφους, οπότε με τη διαδικασία της διάβρωσης, στο έδαφος παραμένει μόνο το χονδρόκοκκο υλικό, με μικρή υδατοχωρητικότητα, διαπερατότητα και παραγωγικότητα. Συχνά, η ένταση των δασικών πυρκαγιών, η συχνότητά τους και τα ειδικά χαρακτηριστικά του εδάφους συνεπιδρούν κατά διάφορο τρόπο. Μικρής έντασης δασικές πυρκαγιές, (έρπουσες) δεν προκαλούν αλλαγές στη δομή του εδάφους. Όταν, όμως, καίγονται υψηλά κορμοβριδή δάση ή πυκνά θαμνώδη δάση με μεγάλη ένταση ανέμου, και η καύσιμη ύλη του δάσους και του εδάφους περιέχει μικρό ποσοστό σχετικής υγρασίας, τότε οι θερμοκρασίες καύσης στην επιφάνεια του εδάφους, ανέρχονται τόσο πολύ, που τελικά καίνε όλο το οργανικό υλικό του εδάφους και καταστρέφουν τη δομή του.

Όταν τα αποκαΐδια μιας δασικής πυρκαγιάς μικρής έντασης δεν καταστραφούν στο σύνολο τους, τότε, δεν γίνονται σοβαρές μεταβολές στο πορώδες και στη διαπερατότητα του εδάφους. Αντίθετα, όταν το ανόργανο (σκελετικό) έδαφος του δάσους, καεί επανειλημμένα, τότε η συμπίεση από τη ραγδαία βροχή, μπορεί να κλείσει τους πόρους του εδάφους με πηλό και καρβουνόσκονη και να μειώσει σημαντικά τον αερισμό του και τη διαπερατότητά του.

Στη χώρα μας, όπου, συνήθως, μετά τις πυρκαγιές του καλοκαιριού ακολουθούν ραγδαίες φθινοπωρινές βροχές, αν η κλίση του καμένου εδάφους είναι πάνω από 30%, η διάβρωση είναι σημαντική και οι ολισθήσεις συνηθισμένες.

Αναφορικά με την αποψιλωτική υλοτομία ενός καμένου δάσους και την προπαρασκευή του (με καλλιέργεια) για αναδάσωση, είναι σημαντικό η καλλιέργεια και η διάταξη των υπολειμμάτων καύσης να γίνει κατά τις χωροσταθμικές καμπύλες. Με τον τρόπο αυτό, υποβοηθάται η μείωση της διάβρωσης του εδάφους.

Οι λιβαδικές εκτάσεις που καλύπτονται κυρίως από λιβαδικά φυτά και λίγους θάμνους, διαβρώνονται ευκολότερα από ότι το πυκνό δάσος. Για το λόγο αυτό, η καλλιέργεια και η προετοιμασία του καμένου δάσους προς αναδάσωση συνιστάται να γίνεται λίγους μήνες πριν αρχίσουν οι φθινοπωρινές βροχές.

Δασικά εδάφη υγρά, όταν καούν, είναι βέβαιο ότι θα διατηρήσουν μετά το κάψιμο τους μεγάλη ποσότητα άκαυστης οργανικής ουσίας.

Η μεγάλη σχετική υγρασία ευνοεί τα υπολείμματα της καρβουνόσκονης να ενσωματωθούν στο έδαφος και εμποδίζει τη φωτιά να κάψει τον εδαφικό χούμο.

Συμπερασματικά, μετά τη δασική πυρκαγιά, αν το έδαφος (το επιφανειακό) καεί στο σύνολο του, τότε οι εδαφικές χημικές και φυσικές ιδιότητες και η δομή του αλλάζουν δραστικά, τα φυτά υποσιτίζονται και το έδαφος διαβρώνεται.

Ανάλογα με το είδος της δασικής πυρκαγιάς και με την έντασή της, αναπτύσσεται θερμοκρασία στο δασικό έδαφος διαφορετική σε διάφορα βάθη. Το θερμοκρασιακό εύρος της πυρκαγιάς εξαρτάται από πολλούς ακόμα παράγοντες, όπως από τη σύνθεση, την πυκνότητα και το είδος του εδάφους (εδαφική υφή, υγρασία, οργανική ύλη κλπ.).

Παρατηρήσεις σε διάφορους τύπους δασικών εδαφών έδειξαν, ότι η υποκείμενη νεκρή οργανική ύλη από χόρτα, θάμνους, δεν καίγεται καθόλου, όταν η περιεχόμενη σχετική υγρασία του δάσους είναι πάνω από το 120%, ενώ καίγεται στο σύνολο της σε περιεχόμενη υγρασία κάτω από 40%. Μέσα σ' αυτό το εύρος της σχετικής υγρασίας, η ποσότητα της καμένης νεκρής οργανικής ύλης, εξαρτάται από την ποσότητα της ακτινοβολούμενης θερμότητας που λαμβάνεται από την παρακείμενη καιγόμενη ύλη. Για παράδειγμα, για ένα θερμοκρασιακό εύρος στην επιφάνεια του εδάφους 100-250°C και σε βάθος εδάφους 1-2 cm, η θερμοκρασία δεν ξεπερνάει τους 100°C.

Σε μια μεγάλης έντασης δασική πυρκαγιά, το έδαφος υποφέρει, όταν η οργανική ύλη καεί στο σύνολο της, γιατί οι θερμοκρασίες στην επιφάνεια του εδάφους φθάνουν τους 300-400°C, ενώ οι θερμοκρασίες σε βάθος εδάφους 1 cm, 3 cm, και 5 cm, φθάνουν αντίστοιχα τους 200-300°C, τους 60-80°C, και τους 40-50°C. Το θερμοκρασιακό εύρος σε βάθος εδάφους που μπορεί να φθάσει η επίδραση της πιο μεγάλης σε ένταση πυρκαγιάς είναι γύρω στα 10 cm. Στο ίδιο βάθος έχουμε θερμοκρασιακή μεταβολή του μικροκλίματος. Η θερμοκρασία εδάφους

αυξάνει (κατά μέσο όρο) κατά 10°C μετά την πυρκαγιά και οφείλεται στο κάψιμο και στη θανάτωση της οργανικής ύλης, στην αποκάλυψη του εδάφους και στη μεταβολή των φυσικοχημικών του ιδιοτήτων.

Στην επιφάνεια του καμένου δασικού εδάφους που αποκαλύπτεται από πυρκαγιά, η θερμοκρασία του τους θερινούς μήνες (στις εύκρατες ζώνες) μπορεί να αυξηθεί μέχρι και 26°C, με ένα ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος 6°C. Η οργανική ουσία του δάσους δρα ως θερμομονωτικό στρώμα στο δασωμένο έδαφος ενώ, σε ένα γυμνό έδαφος, η θερμοκρασία αυξάνει και μεταδίδεται στα βαθύτερα στρώματα (Γκόφας, 2001).

Τα υγρά εδάφη σε σχέση με τα ξερά θερμαίνονται λιγότερο, όπως και τα αργιλώδη εδάφη σε σχέση με τα αμμώδη.

Συμπερασματικά, οι δασικές πυρκαγιές μεταβάλλουν τις φυσικοχημικές ιδιότητες του δασικού εδάφους, μετατρέποντας την οργανική του ύλη μετά το κάψιμο σε διαλυτή στάχτη. Παράλληλα, διαμορφώνουν ίδιο μικροκλίμα μετά την απομάκρυνση της βλάστησης.

## 2.3 Επίδραση στην απορροή γενικά

Όταν βρέχει, το νερό πέφτει πάνω στο φύλλωμα του δάσους και από εκεί, ως σταγόνες περνά στους λεπτούς κλάδους του κάθε δένδρου. Αφού διαβρέξει το φύλλωμα των δέντρων, στη συνέχεια πέφτει υπό μορφή σταγόνων πάνω στην υποβλάστηση. Εκεί ένα μέρος του συγκρατείται ενώ το υπόλοιπο καταλήγει στο έδαφος.

Ένα μικρότερο μέρος της βροχής οδεύει από τους λεπτούς κλάδους των δέντρων στους χοντρότερους και από εκεί ακολουθώντας τον κορμό ρέει στο δασικό έδαφος. Άλλο ένα, ακόμη μικρότερο μέρος του νερού εξατμίζεται κατά τα διάφορα στάδια της κίνησής του μέχρι να φθάσει στο δασικό έδαφος.

Η κομοστέγη του δάσους είναι εκείνη που κρατάει τελικά σε νερό περίπου το 150%, σε σχέση με το βάρος του ξερού φυλλώματος, ανεξάρτητα από τη σύνθεση της βλάστησης. Αυτό σημαίνει ότι η κομοστέγη ενός δάσους κρατάει ένα ύψος βροχής 2 mm περίπου.

Οι απώλειες εξάτμισης εξαρτώνται από την ένταση και τη διάρκεια της βροχής καθώς και από τη σχέση του όγκου της υποβλάστησης προς την επιφάνεια που αυτή καλύπτει. Η βλάστηση των υψηλών, κυρίως, δασών εξατμίζει το 25-35% της βροχόπτωσης. Συνήθως, το 50% της βροχόπτωσης που πέφτει πάνω σε παραμεσόγεια κωνοφόρα εξατμίζεται αμέσως.

Οι απώλειες της συγκράτησης μπορεί να γίνουν μέγιστες, όταν τα κατακρημνίσματα είναι πολύ λεπτές σταγόνες, όπως οι σταγόνες της ομίχλης ή της πάχνης, οπότε τότε μπορεί να μη φτάσουν σταγόνες βροχής στο έδαφος.

Τα παραμεσόγεια ξηροφυτικά δάση που εξαπλώνονται κοντά στα παράλια των ελληνικών θαλασσών, οφείλουν, κατά μεγάλο μέρος, την αύξησή τους στην υψηλή τιμή και την ετήσια διακύμανση της σχετικής υγρασίας, όταν, μάλιστα, το μέσο ετήσιο ύψος βροχής στα δάση αυτά μόλις ξεπερνά τα 300 mm. Όταν η βροχή περάσει από τη κομοστέγη και φθάσει στο δασικό έδαφος, ένα μέρος της απορροφάται από την κατακείμενη νεκρή οργανική ύλη, ενώ το υπόλοιπο νερό της βροχής διηθείται προς τα κάτω, στο μεταλλικό έδαφος.

Οι δασικές πυρκαγιές μειώνουν την κατακράτηση της ποσότητας του βρόχινου νερού στην έκταση εκείνη που η κομοστέγη του δάσους έχει καταστραφεί από τη φωτιά. Θεωρητικά, θα



μπορούσε να ειπωθεί ότι η φωτιά αυξάνει την υγρασία, γιατί το νερό φθάνει απευθείας στην επιφάνεια του δασικού εδάφους, ιδιαίτερα όταν έχουμε μικρής διάρκειας και έντασης βροχές. Στην πραγματικότητα, όμως, η καταστροφή της κομοστέγης του δάσους από την πυρκαγιά, αυξάνει και την άμεση έκθεση του εδάφους στον ήλιο και, έτσι, αυξάνεται η εξάτμιση της υγρασίας με τελικό αποτέλεσμα τη μείωση της τελευταίας.

Η καταστροφή από τη φωτιά των κατακείμενων δασικών οργανικών υπολειμμάτων και της υποβλάστησης, παίζει σπουδαιότερο ρόλο στη διατάραξη των σχέσεων εδάφους/νερού από ό,τι η καταστροφή της κομοστέγης. Έχει υπολογιστεί μάλιστα, ότι 1 cm πάχους ξερών υπολειμμάτων, κρατάει 0.5 cm κατακρημνισμάτων. Αν λοιπόν καούν 10 cm ξερά οργανικά υπολείμματα, τότε σε περίπτωση βροχής ελευθερώνονται 5 cm ύψους βροχής για διήθηση και απορροή. Δασικά εδάφη με παχύ στρώμα φύλλων και χούμο κρατούν μέχρι 10 φορές περισσότερη υγρασία από ότι τα ξερά κατακείμενα οργανικά υπολείμματα. Συνεπώς, κάψιμο 1 cm πάχος χούμου συνεπάγεται απώλεια δυναμικού κατακράτησης 5 mm εδαφικής υγρασίας.

Μπορούμε να φανταστούμε τί αποτέλεσμα έχει στο δασικό έδαφος μια ραγδαία βροχή που ακολουθεί μετά από μια δασική πυρκαγιά, όταν αυτή έχει κάψει όλη την οργανική ύλη (χλωρή και ξερή) και όλο το χούμο. Οι σταγόνες της βροχής χτυπούν με δύναμη πάνω στο χαλαρό καμένο έδαφος και κατακερματίζουν αυτό διαλύοντας την πορώδη δομή του. Το έδαφος κατά την κοινή έκφραση "ταρατσώνεται", μειώνονται οι δυνατότητες διήθησης του και αυξάνει έντονα η επιφανειακή απορροή και η επιφανειακή διάβρωση.

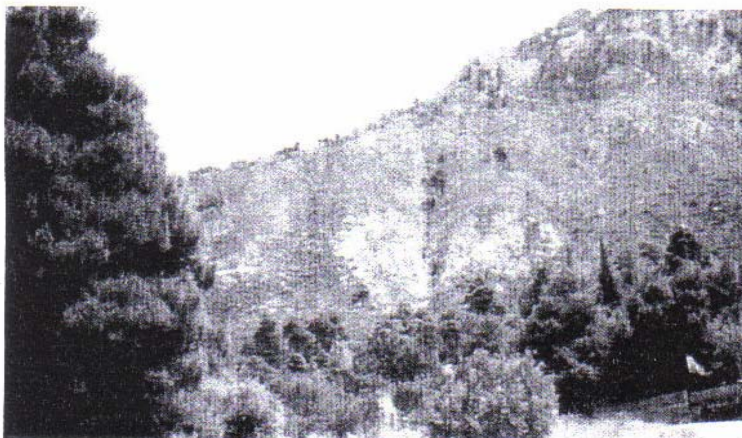
Γενικά, ο περιορισμός της οργανικής ύλης του δασικού εδάφους συνεπάγεται σοβαρή μείωση της υδατοχωρητικότητάς του. Ειδικά τα αργιλώδη εδάφη που κάηκαν δημιουργούν κολλοειδή συσσωματώματα που μειώνουν δραστικά το πορώδες του δασικού εδάφους.

Μεγάλης έντασης δασικές πυρκαγιές, σε διαβρωσιγενή εδάφη, με ισχυρές κλίσεις, έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των επιφανειακών απορροών και την έντονη διάβρωση.

Πειράματα έδειξαν, ότι σε κλίση 80% καμένου εδάφους η διάβρωση ήταν 4.5 φορές μεγαλύτερη από ότι σε κλίση 60% του ίδιου εδάφους και ότι η διάβρωση στο γυμνό έδαφος αυξάνει μέχρι 40-50 φορές σε σύγκριση με το καλυμμένο έδαφος, κάτω από τις ίδιες προαναφερόμενες κλίσεις του εδάφους προκαλώντας συνήθως χαραδρωτική διάβρωση. (Γκόφας, 2001).

Η μεταφορά εδάφους που ακολουθεί συνήθως μετά τη δασική πυρκαγιά έχει στενή σχέση με την ένταση της φωτιάς. Για παράδειγμα, μικρής έντασης δασικές πυρκαγιές, αφήνουν μερικά κατακείμενα οργανικά υλικά πάνω στην επιφάνεια του εδάφους και, γι' αυτό, οι φωτιές αυτές προκαλούν ελάχιστη ή καθόλου απορροή ή εδαφική διάβρωση.

Μια επιφανειακή κάλυψη 50-70% είναι απαραίτητη για τη σταθερότητα του εδάφους σε περίπτωση ισχυρών κλίσεων και ισχυρών βροχών.



Σχήμα 2.1 : Φωτογραφία από χαρακτηριστική χαραδρωτική διάβρωση μετά από πυρκαγιά

Για να επανέλθει το έδαφος μετά από πυρκαγιά στο πιο πάνω ποσοστό φυτοκάλυψης, απαιτούνται 2-4 χρόνια, για τα καμένα αείφυλλα πλατύφυλλα, τα δρυοδάση και τα δάση Χαλεπίου και Τραχείας Πεύκης της χώρας μας. Η περίοδος ανάκαμψης διαφέρει και, σύμφωνα με τον Doehring, αυτή μπορεί να φτάσει και τα 30 χρόνια καθόσον εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες (Doehring, 1968).

Η επίδραση των πυρκαγιών στις υδρολογικές συνθήκες ενός καμένου δάσους επιφέρει τελικά αύξηση των απορροών και ποιοτική υποβάθμιση του νερού που χρησιμοποιείται για ύδρευση πόλεων. Το μέγεθος αυτής της επίδρασης εξαρτάται από την ένταση και το μέγεθος της πυρκαγιάς, τον τύπο του εδάφους, καθώς και το μέγεθος και την τοπογραφική διαμόρφωση της λεκάνης απορροής.

Το νερό που προέρχεται από διαβρώσεις καμένων επιφανειών περιέχει αυξημένες ποσότητες Ca, K, N και P. Το δε ποσό του εδάφους που παρασύρεται από το νερό μετά την πυρκαγιά είναι ανάλογο της έκτασης που κάηκε. Η περιεκτικότητα των παραπάνω χημικών συστατικών συνήθως δεν κάνει το νερό ακατάλληλο για πόσιμο ή επικίνδυνο, μπορεί όμως να προκαλέσει ευτροφισμό, όταν χρησιμοποιηθεί για άρδευση. Άλλα στοιχεία του εδάφους και της στάχτης που ελευθερώνονται, δεν προκαλούν προβλήματα στην ποιότητα του νερού.

Ειδικότερα για την περιεκτικότητα του νερού σε Ca, Mg, K, Na και Mn και την επίδρασή της στην υγεία, από την βιβλιογραφία προκύπτει ότι:

- Για δύο τουλάχιστον χρόνια μετά την πυρκαγιά, περιέχονται μεγάλες συγκεντρώσεις νιτρωδών που μπορεί να φθάσουν και μέχρι τα 0.5 ppm. Οι συγκεντρώσεις όμως αυτές βρίσκονται πάντοτε πολύ κάτω από τα διεθνή πρότυπα του πόσιμου νερού.
- Για την ίδια χρονική περίοδο με την προηγούμενη, οι συγκεντρώσεις του Ca παρουσιάζουν από το πρώτο έτος σχετική μείωση, και συνεχίζουν να μειώνονται και κατά το δεύτερο μετά την πυρκαγιά έτος. Το αυτό ακριβώς συμβαίνει και με τις συγκεντρώσεις σε Na.
- Οι συγκεντρώσεις σε ανθρακικά άλατα γενικά αυξάνουν, τόσο στο νερό των πλημμυρών που εκρέει από καμένες επιφάνειες, όσο και μέσα στο καμένο έδαφος.
- Οι συγκεντρώσεις σε P μέσα στο νερό των πλημμυρών και στο καμένο έδαφος παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις που έφθασαν πολλές φορές στο διπλάσιο ή ακόμη και στο τριπλάσιο των συγκεντρώσεων των μη καμένων επιφανειών. Αυτό οφείλεται στη

μεγάλη ποσότητα P που περιέχεται στη στάχτη μετά από πυρκαγιά, κυρίως μεγάλης έντασης. Παρά το γεγονός αυτό, η ποιότητα του νερού δεν επηρεάζεται σοβαρά.

- Το K, το Mn και το Mg παρουσιάζονται σε αυξημένες συγκεντρώσεις στο νερό που προέρχεται από απορροές καμένων επιφανειών.
- Τέλος, τα κατιόντα  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$  και  $Mn^{++}$  δεν επιδρούν δυσμενώς στην υγεία του ανθρώπου.

Η πυρκαγιά μεταβάλλει ουσιαστικά τον τύπο και την κατανομή των κατιόντων, καθιστώντας τα τρωτά και ευαίσθητα να μετακινηθούν σε διαλυμένη μορφή μετά από ραγδαία βροχή και επιφανειακή απορροή, στις λίμνες και τη θάλασσα.

Είναι πάντως γεγονός, ότι δευτερογενώς, οι πυρκαγιές αυξάνουν τη θερμοκρασία του νερού, που ρέει στα ρέματα και αυτό διότι καταστρέφεται η βλάστηση από τα πρηνή των ρεμάτων και η επίδραση των ακτινών του ήλιου είναι άμεση. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες από την άμεση ακτινοβολία του ήλιου προκαλούν, με τη σειρά τους, δραστικές μεταβολές στην πανίδα και στη χλωρίδα των ρεμάτων.

Γενικά, το πρόβλημα των δασικών πυρκαγιών στον ελλαδικό χώρο και κατ' επέκταση στην περιοχή της μεσογείου, επηρεάζει σημαντικά την υδρολογική συμπεριφορά και τη διατήρηση του εδάφους, δεδομένου ότι οι βροχοπτώσεις είναι μικρής διάρκειας και μεγάλης έντασης, τα καλοκαίρια ζεστά και ξηρά και οι ανθρωπογενείς επεμβάσεις όπως η αποψίλωση δασικών εκτάσεων είναι σύνθητες φαινόμενο.

## 2.4 Επίδραση στην πλημμυρική απορροή

Οι δασικές πυρκαγιές, όταν συμβούν σε ένα δάσος αλλοιώνουν τον υδρολογικό κύκλο καθόσον το νερό της βροχής φθάνει απευθείας στο έδαφος, καταστρέφει τις φυσικοχημικές του ιδιότητές του, το παρασύρει προς τα κατόπι με τις γνωστές συνέπειες των πλημμυρών (καταστροφές έργων πολιτισμού, γεωργικών καλλιεργειών, δημιουργία χειμάρρων, υποβάθμιση δασικών εδαφών κλπ).

Οι επιδράσεις της φωτιάς γενικά μπορεί να είναι μεγάλες όσον αφορά τις λεκάνες απορροής και τον κίνδυνο πλημμύρας: αλλαγή στο σχήμα των πλημμυρικών υδρογραφημάτων με την εμφάνιση μεγαλύτερων αιχμών και δευτερευουσών κορυφών στο υδρογράφημα, και αύξηση της ετήσιας παροχής που σχετίζεται με τη μείωση στην εξατμισοδιαπνοή. Αυτές οι επιδράσεις θεωρούνται ότι οφείλονται σε αλλαγές στην παραγωγή απορροής (αυξημένη επιφανειακή απορροή) (Λέκκας, 1996). Η φωτιά μειώνει την προστασία της επιφάνειας του εδάφους λόγω απώλειας της φυτοκάλυψης, μειώνει την περατότητα του εδάφους, και αυξάνει την υδροφοβικότητά του, όπως επιβεβαιώνουν και οι σχετικές μελέτες στον ευρωπαϊκό χώρο.

Οι Lavabre et al (1993), βρήκαν μια αύξηση στην ετήσια απορροή ίση με 25%, συνδεδεμένη με την εξατμισοδιαπνοή που οφειλόταν σε καταστροφή της φυτοκάλυψης, τον πρώτο χρόνο μετά την πυρκαγιά στη πειραματική λεκάνη Rimbaud έκτασης 1.45 km<sup>2</sup>, που έκαψε το 85% αυτής, ενώ η αύξηση για τις μηνιαίες και ημερήσιες απορροές έφθασε το 30%. Τα υψόμετρα της λεκάνης κυμαίνονταν από 470-622 m. Τα εδάφη της λεκάνης είναι παχιά αμμώδη και η βλάστηση πριν τις πυρκαγιές ήταν μακί με καστανιές και πεύκα. Οι συσκευές μέτρησης περιλάμβαναν βροχογράφους, έναν μετεωρολογικό σταθμό και όργανα μέτρησης παροχής. Οι Lavabre et al βρήκαν μεγάλες αλλαγές στο σχήμα των υδρογραφημάτων (τα

υδρογραφήματα μετά τη φωτιά ήταν πιο απότομα) και ότι η συχνότητα των πλημμυρών αυξάνεται σημαντικά. Παρατήρησαν επίσης ότι η απορροή δεν χρειάζονταν προηγούμενη σοβαρή διαβροχή της λεκάνης καθώς η δυνατότητα κατακράτησης νερού από το έδαφος είχε ουσιαστικά χαθεί. Η πλημμύρα 10 ετών που είχε υπολογιστεί πριν την πυρκαγιά, ξεπεράστηκε 3 φορές μέσα στο χρόνο που ακολούθησε την φωτιά, παρόλο που τα γεγονότα βροχόπτωσης δεν ξεπερνούσαν σε διάρκεια τις 12 ώρες και σε περίοδο επαναφοράς το ένα έτος περίπου. Οι Lavabre et al υποστηρίζουν ότι η επίδραση της συγκεκριμένης πυρκαγιάς στην υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης είναι περίπου 5 χρόνια. Οι συνέπειες μπορεί να περιλαμβάνουν και περιβαλλοντικό κόστος, τόσο στην καμένη τοποθεσία όσο και κατάντη (Lavabre et al, 1993).

Όπως αναφέρει η βιβλιογραφική έρευνα που έχει πραγματοποιήσει ο Batalla (2001), γενικά αυξήσεις στην απορροή έχουν αναφερθεί κυρίως από μεσογειακές περιοχές και λιγότερο από άλλες περιοχές (την Καλιφόρνια, το Ισραήλ και την Ιβηρική Χερσόνησο), και ποικίλλουν από 11% έως 300% σε μεγάλες λεκάνες, και 800% σε μικρές λεκάνες. Οι αυξήσεις στις πλημμυρικές αιχμές κυμαίνονται από 45% ως 600% σε μεγάλες λεκάνες, και μέχρι 5700% σε μικρές λεκάνες. Βέβαια, υπάρχουν και μελέτες που δείχνουν μηδαμινή ή ελάχιστη αλλαγή στην υδρολογική απόκριση λεκανών μετά τη φωτιά. Το σχήμα των πλημμυρικών υδρογραφημάτων μεταβάλλεται με εμφάνιση δευτερευουσών απότομων αιχμών (<http://insma.udg.es/isse2001/papers/Batalla.html>).

Οι Inbar et al (1997) στο ίδιο πείραμα που αναφέραμε και στο υποκεφάλαιο 2.2, απέδειξαν ότι πυρκαγιές σε δασική έκταση του Ισραήλ αύξησε 500 φορές την απορροή. Κατά τους ερευνητές, οι περιοχές με φυτοκάλυψη συνεισφέρουν στην απορροή μόνο μετά από ασυνήθιστες καταιγίδες και ακόμα και τότε με μικρή παραγωγή ιζημάτων. Η απορροή κατά μέσο όρο, στα 3 χρόνια που έγιναν μετρήσεις ήταν το 1.6% της ολικής βροχόπτωσης. Η ένταση βροχόπτωσης σε συνδυασμό με τις ιδιότητες του εδάφους, τις κλίσεις και την έκταση της φωτιάς αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες σχηματισμού της απορροής και επηρεάζουν τον ρυθμό παραγωγής ιζημάτων (Inbar et al, 1997).

Χαρακτηριστική είναι η μελέτη των Candela et al (2005), που μελετήσαν τις επιδράσεις δασικών πυρκαγιών στη μεταβολή της παροχής αιχμής σε μια μεσογειακή λεκάνη. Η λεκάνη μελέτης των ερευνητών αυτών ήταν στη Σικελία με έκταση 53 km<sup>2</sup> που έχει καεί κατά 30%. Η βλάστηση είναι σκληροφυλλική, μακί και η λεκάνη περιέχει και τμήμα με καλλιέργειες. Τα πετρώματα είναι κυρίως ασβεστολιθικά. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο SCS οι ερευνητές συνέκριναν την παροχή αιχμής και το χρόνο συγκέντρωσης πριν και μετά τη φωτιά. Για περίοδο επαναφοράς  $T = 50$  χρόνια, η παροχή αιχμής από 261 m<sup>3</sup>/s πριν την πυρκαγιά έγινε 342 m<sup>3</sup>/s μετά την πυρκαγιά, ενώ ο χρόνος συγκέντρωσης βάσει της σχέσης του USDA μειώθηκε (για CN<sub>II</sub> από  $t_c = 2.8$  h σε  $t_c = 2.3$  h). Επίσης, ο αριθμός καμπύλης (CN) μετά τις πυρκαγιές παρουσιάστηκε αυξημένος ενώ αναλύθηκε και η σημασία του παράγοντα της προγενέστερης εδαφικής υγρασίας (AMC) στη δημιουργία πλημμυρικών φαινομένων. Η αύξηση στις παροχές αιχμής ήταν πιο σημαντική στις χαμηλές περιόδους επαναφοράς παρά στις υψηλότερες, ενώ παρατηρήθηκε μια μείωση στη συχνότητα εμφάνισης υψηλών τιμών πλημμυρικής αιχμής (Candela et al, 2005).

Οι Scott and Van Wyk (1990) και Scott (1993) πραγματοποίησαν σημαντικές μελέτες στη Ν. Αφρική όσον αφορά την επίδραση πυρκαγιών στο υδρολογικό καθεστώς λεκανών απορροής. Στην πρώτη μελέτη έγιναν έρευνες σε 4 ορεινές λεκάνες της Ν. Αφρικής. Πριν

από τη φωτιά, οι δύο από τις λεκάνες είχαν ως φυσική βλάστηση fynbos (γηγενές θαμνώδες φυτό), ενώ οι άλλες δύο ήταν τεχνητές δασικές εκτάσεις, η μία με πεύκα (*Pinus radiata*) και η άλλη με ευκαλύπτους. Στις λεκάνες με τα fynbos (έκτασης 1.8 km<sup>2</sup> και 2.45 km<sup>2</sup> και μέσης κλίσης 46% και 59% αντίστοιχα με έδαφος αμμώδη πηλό) η ετήσια συνολική απορροή αυξήθηκε 16% στην πρώτη και 10% στη δεύτερη, λόγω της μείωσης της εξάτμισοδιαπνοής και της διήθησης τον πρώτο χρόνο μετά τη φωτιά. Η παροχή αιχμής αυξήθηκε κατά 19% στην πρώτη και κατά 8,5% στη δεύτερη λεκάνη με τα fynbos. Ο μηχανισμός παραγωγής πλημμυρών στις λεκάνες αυτές φάνηκε να παραμένει ο ίδιος μετά τις πυρκαγιές. Οι δύο λεκάνες με τη μη φυσική βλάστηση, έκτασης περίπου 2 km<sup>2</sup> η κάθε μια και σχετικά μικρής κλίσης (περίπου 10%) με εδάφη κυρίως αργιλικά, παρουσίασαν μεγαλύτερες αυξήσεις και τεράστιες απώλειες εδαφών εν συγκρίσει με τις λεκάνες με τη φυσική βλάστηση. Μετά τη φωτιά, τα υδρογραφήματα ήταν πιο απότομα από ό,τι πριν τη φωτιά παρότι η διάρκειά τους άλλαξε ελάχιστα. Οι αυξήσεις της παροχής αιχμής τον πρώτο χρόνο στη λεκάνη με τα πεύκα ήταν 290% ενώ με τους ευκαλύπτους 1110% και η άμεση απορροή ξεπερνούσε σε αύξηση το 100% τον πρώτο χρόνο μετά τη φωτιά. Στις λεκάνες με απότομες κλίσεις υπήρχε μεγαλύτερη επιφανειακή απορροή και απώλεια εδαφών. Αυτές οι επιδράσεις των πυρκαγιών οφείλονται σε αλλαγές στην παραγωγή της πλημμυρικής απορροής λόγω μείωσης της διηθητικότητας στις καμένες λεκάνες (Scott, 1993).

Η δεύτερη μελέτη πραγματοποιήθηκε σε δασικές περιοχές μιας λεκάνης στη Ν. Αφρική (Bosbookloof) έκτασης 2 km<sup>2</sup>, μέσου υψομέτρου 543 m και μέσης κλίσης 26%, που κάηκε κατά το μεγαλύτερο μέρος της (80%). Η λεκάνη εμπεριείχε κατά 60% μη φυσική βλάστηση με πεύκα και κατά 40% φυσική βλάστηση με fynbos. Το έδαφος ήταν αμμώδης πηλός με ποσοστά αργίλου και το κλίμα της λεκάνης θεωρείται μεσογειακό. Βρέθηκε ότι η άμεση απορροή αυξήθηκε κατά 201% και οι παροχές αιχμής αυξήθηκαν κατά 292% τον πρώτο χρόνο μετά τη φωτιά, ενώ η διάρκεια των πλημμυρικών επεισοδίων παρέμενε η ίδια. Επίσης, η απώλεια εδαφών κυμαινόταν από 10-26 t/ha και η παραγωγή ιζημάτων παρατηρήθηκε αυξημένη. Η υδατοϊκανότητα του εδάφους μειώθηκε σημαντικά μετά το πέρασμα της φωτιάς. Πιο σοβαρή μείωση της διαπερατότητας υπήρξε στα βαθύτερα εδάφη λόγω της θέρμανσης του εδάφους. Αυτό οδήγησε σε μεγαλύτερες επιφανειακές απορροές και σε σημαντικές απώλειες εδαφών σε σχέση με την κατάσταση πριν το κάψιμο της μελετηθείσας έκτασης. Παρατηρήθηκε ότι γεγονότα βροχόπτωσης ακόμα και ύψους 10 mm παρήγαγαν επιφανειακή απορροή στη σοβαρά καμένη λεκάνη (Scott and Van Wyk, 1990).

Οι Aronica et al (2002), μελέτησαν τις αλλαγές στο υδρολογικό καθεστώς μετά από πυρκαγιά σε δύο μικρές λεκάνες στη Σικελία σε μηνιαία και ημερήσια χρονική κλίμακα. Η ανάλυση του πλημμυρικού καθεστώτος έγινε με την προσαρμογή μιας λογαριθμοκανονικής κατανομής δύο παραμέτρων σε δεδομένα παροχών αιχμής πριν και μετά τη φωτιά. Με έκπληξη των ερευνητών, οι παροχές αιχμής μετά την πυρκαγιά παρουσιάστηκαν μικρότερες από ό,τι πριν τη φωτιά. Αυτές οι αλλαγές βρέθηκαν να είναι πιο σημαντικές σε λεκάνες με μεγάλη καμένη έκταση από ό,τι σε αυτές με μικρότερη καμένη έκταση, δείχνοντας την ύπαρξη ενός είδους «κατωφλίου» όσον αφορά την επίδραση της φωτιάς στην υδρολογική απόκριση φυσικών περιοχών (Aronica et al, 2002).

Οι αλλαγές στο υδρολογικό καθεστώς λεκανών απορροής είναι μεγαλύτερες τον πρώτο χρόνο μετά τη φωτιά και μειώνονται από το δεύτερο χρόνο και μετά (De Bano, 2000, Scott, 1993).

Ο Brown (2003), μελέτησε τις επιδράσεις πυρκαγιών στα υδρολογικά χαρακτηριστικά λεκάνης σε σκληροφυλλική δασώδη έκταση με κύριο φυτό τους ευκαλύπτους στην περιοχή New South Wales της Αυστραλίας. Οι λεκάνες μελέτης ήταν δύο, έκτασης 139 km<sup>2</sup> και 27 km<sup>2</sup> αντίστοιχα με μέσο υψόμετρο 1192 m και 1100 m αντίστοιχα. Αυτές, ύστερα από πυρκαγιά το 1965, κάηκαν ολοσχερώς. Εγκαταστάθηκε μια σειρά υδρομετρικών σταθμών στην περιοχή και ο Brown κατέληξε στα εξής συμπεράσματα:

- Μετά τη φωτιά υπάρχουν σαφείς αλλαγές στο σχήμα των πλημμυρικών υδρογραφημάτων.
- Οι πλημμυρικές παροχές αιχμής μετά τη φωτιά εμφανίζονται αυξημένες.
- Η απορροή ήταν πολύ αυξημένη τα χρόνια που ακολούθησαν τη φωτιά σε σχέση με αυτή που θα εμφανιζόταν αν δεν είχε υπάρξει η πυρκαγιά.
- Τα φερτά υλικά που μετέφεραν τα ρέματα αυξήθηκαν σημαντικά.
- Τελικά, μετά από 4-5 χρόνια, οι περιοχές των λεκανών φαίνεται ότι «ανάρρωσαν» και τα υδρολογικά τους χαρακτηριστικά επανήλθαν στην κατάσταση πριν τη φωτιά (Brown, 2003).

Όπως αναφέρουν οι Di Michele and Salvatori (2001), η υγρασία του εδάφους έχει ιδιαίτερη σημασία στον καθορισμό της κατανομής της συχνότητας πλημμυρών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο SCS-CN ώστε να μετασχηματίσουν το ύψος βροχόπτωσης σε περίσσειμα βροχής, ενσωμάτωσαν την κατανομή πιθανότητας της AMC (antecedent moisture class) μέσα στην κατανομή της συχνότητας πλημμυρών και έδειξαν την σημαντικότητα της γνώσης του παράγοντα AMC για την ποσοτική εκτίμηση των πλημμυρικών φαινομένων (Di Michelle and Salvatori, 2001). Περισσότερα για τη μέθοδο SCS και τον παράγοντα προγενέστερης εδαφικής υγρασίας AMC θα αναφέρουμε σε επόμενο κεφάλαιο.

## **3 Μεθοδολογία εκτίμησης πλημμύρας σχεδιασμού πριν και μετά τις πυρκαγιές**

---

### **3.1 Γενικά**

Η διαχείριση υδατικών πόρων ασχολείται εκτός των άλλων με το να μετριάσει τις δυσμενείς επιδράσεις υψηλών παροχών υδατορευμάτων ή πλημμυρών. Το μέγεθος των πλημμυρών περιγράφεται από τους όρους «πλημμυρική παροχή», «ύψος ή στάθμη πλημμύρας» και «όγκος πλημμύρας». Κάθε μια από αυτές τις παραμέτρους είναι σημαντική στον υδρολογικό σχεδιασμό διαφορετικών κατασκευών ελέγχου ροής. Ο καθορισμός της πλημμύρας σχεδιασμού, δηλαδή της πλημμύρας μιας δεδομένης περιόδου επαναφοράς, κατά τη διάρκεια ενός έργου, είναι απαραίτητο στάδιο στην ρύθμιση της ροής για κατασκευή υδραυλικών κατασκευών, όπως φράγματα, ταμιευτήρες, συστήματα αποστράγγισης, κλπ (Loukas, 2002).

Είναι γεγονός ότι οι περισσότερες πλημμύρες είναι αποτέλεσμα δράσης: (α) της συνολικής ποσότητας και της χρονικής κατανομής της βροχόπτωσης, (β) της περατότητας του πετρώματος ή του εδάφους, και (γ) της τοπογραφίας. Το μέγεθος της πλημμύρας σχετίζεται με την ποσότητα και την ένταση της βροχόπτωσης. Οι καταστροφικές πλημμύρες, συχνά, είναι αποτέλεσμα σπάνιων, μεγάλων και έντονων καταιγίδων. Οι μικρότερες πλημμύρες ή ροές που εμφανίζονται πιο συχνά, δημιουργούνται από λιγότερο έντονες καταιγίδες. (Λέκκας, 1996)

Στην εργασία αυτή διερευνάται η ενδεχόμενη αύξηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας του ρέματος της Γιαννούλας στην Πάρνηθα μετά από τις εκτεταμένες πυρκαγιές στο βουνό το καλοκαίρι του 2007. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει διάφορα στάδια για τη μετατροπή των πρωτογενών δεδομένων που στην προκειμένη είναι κυρίως τα βροχομετρικά ύψη για δεκαπενταετή περίοδο παρατηρήσεων στο μετεωρολογικό σταθμό του ΕΜΠ στο Ζωγράφου, σε παροχές στην έξοδο της λεκάνης.

Η μεθοδολογία πριν τις πυρκαγιές περιλαμβάνει κατάρτιση του υετογράμματος σχεδιασμού, εύρεση των αντίστοιχων περισσευμάτων βροχόπτωσης και παραγωγή του υδρογραφήματος σχεδιασμού μετά την εξαγωγή του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος. Μετά τις πυρκαγιές, εκτός από τα στάδια που προαναφέρθηκαν, η μεθοδολογία περιλαμβάνει μέτρηση της μέγιστης πλημμυρικής στάθμης στην έξοδο της εξεταζόμενης λεκάνης για πραγματικό πλημμυρικό γεγονός μετά τις πυρκαγιές, υπολογισμός της αντίστοιχης παροχής αιχμής, κατάρτιση πραγματικού υετογράμματος του πλημμυρικού γεγονότος, και διερεύνηση επίπτωσης σε κρίσιμες παραμέτρους. Καθίσταται, έτσι, δυνατόν να παραχθούν υδρογραφήματα σχεδιασμού και μετά τις πυρκαγιές και να γίνει διερεύνηση της μορφής τους για διάφορες περιόδους επαναφοράς.

Για την επεξεργασία των δεδομένων και την παραγωγή των τελικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν διάφορα λογισμικά Η/Υ όπως το Microsoft Excel, το λογισμικό

«Υδρογνώμων» (Κοζάνης et al, 1995) και το λογισμικό HEC-HMS (Hydrologic modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual, 2000) .

### 3.2 Ανάλυση ισχυρών βροχοπτώσεων – Κατάρτιση όμβριων καμπυλών

Στα προβλήματα σχεδιασμού αντιπλημμυρικών έργων ενδιαφέρει ιδιαίτερα η δίατα των ισχυρών βροχοπτώσεων της περιοχής, η μαθηματική περιγραφή της οποίας δεν μπορεί παρά να είναι πιθανοτική. Το κλασικό μαθηματικό εργαλείο του υδρολόγου μηχανικού, το οποίο περιγράφει αυτή τη δίατα είναι οι λεγόμενες καμπύλες έντασης-διάρκειας-περιόδου επαναφοράς της βροχόπτωσης ή, όπως απλούστερα έχει καθιερωθεί να αποκαλούνται στην ελληνική τεχνική ορολογία, οι όμβριες καμπύλες (στην αγγλική βιβλιογραφία intensity-duration-frequency, ή συνοπτικά IDF curves). Πρόκειται για απλές αναλυτικές ή γραφικές εκφράσεις της μέγιστης έντασης βροχής  $i$  συναρτήσεως της διάρκειας  $d$  και της περιόδου επαναφοράς  $T$ . Σχετικά με τη φύση των μεταβλητών αυτών διευκρινίζονται τα ακόλουθα:

α. Η διάρκεια βροχής  $d$  δεν αντιπροσωπεύει κάποια πραγματική ολική διάρκεια ισχυρής καταιγίδας, αλλά είναι μια δεδομένη διάρκεια που καθορίζει τη χρονική κλίμακα παρατήρησης του φαινομένου.

β. Η ένταση βροχής  $i$  δεν αναφέρεται σε συγκεκριμένη καταιγίδα, αλλά θεωρείται ως η πραγματοποίηση μιας τυχαίας μεταβλητής  $I$  που αντιπροσωπεύει τον πληθυσμό των ισχυρών βροχοπτώσεων, για τη συγκεκριμένη διάρκεια παρατήρησης  $d$ . Συνδέεται με το ύψος βροχής της διάρκειας  $d$  με τη σχέση

$$i = \frac{h}{d} \quad (3.1)$$

και, κατά συνέπεια, αντιπροσωπεύει τη μέση ένταση βροχής και όχι τη στιγμιαία ένταση.

γ. Η περίοδος επαναφοράς  $T$  αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα σε έτη που χρειάζεται κατά μέσο όρο να παρέλθει ώστε η μέση ένταση βροχής  $I$  σε διάρκεια  $d$  να υπερβεί την τιμή  $i$ . Υπενθυμίζεται (από τη θεωρία πιθανοτήτων) ότι η συνάρτηση κατανομής της τυχαίας μεταβλητής  $I$ , ορίζεται ως

$$F_I(i) = P(I \leq i) \quad (3.2)$$

όπου με  $P(I \leq i)$  συμβολίζεται η πιθανότητα να μην πραγματοποιηθεί υπέρβαση της τιμής  $i$  κατά τη διάρκεια ενός (υδρολογικού ή ημερολογιακού) έτους. Η πιθανότητα υπέρβασης της τιμής  $i$  κατά τη διάρκεια ενός έτους προφανώς είναι

$$F_{II}(i) = 1 - F_I(i) = P(I > i) \quad (3.3)$$

Η περίοδος επαναφοράς είναι το αντίστροφο της πιθανότητας υπέρβασης, ήτοι

$$T = \frac{1}{F_{II}(i)} = \frac{1}{P(I > i)} \quad (3.4)$$

Η χρησιμότητα των όμβριων καμπυλών είναι άμεση σε όλα τα προβλήματα υδρολογικού σχεδιασμού που αφορούν στην αντιπλημμυρική προστασία. Ουσιαστικά, η χρήση τους συνίσταται στην πρόγνωση της έντασης βροχής  $i$ , για δεδομένη διάρκεια  $d$ , η οποία έχει σχέση με τα χαρακτηριστικά του υδατορεύματος ή του αγωγού που μελετάται, και για



δεδομένη περίοδο επαναφοράς  $T$ , που έχει σχέση με τη σημασία του έργου που μελετάται. Οι όμβριες καμπύλες αποτελούν τη βασική είσοδο σε μοντέλα μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε πλημμυρική απορροή ξεκινώντας από την απλή ορθολογική μέθοδο και φτάνοντας σε πιο σύνθετες μεθόδους, όπως αυτές του μοναδιαίου υδρογραφήματος, και των πιο πολύπλοκων υδρολογικών και υδραυλικών μοντέλων.

Η όμβρια καμπύλη, δηλαδή η σχέση μεταξύ των μεταβλητών  $i$ ,  $d$ , και  $T$ , ασφαλώς, δεν είναι παγκόσμια, αλλά η μαθηματική της έκφραση αλλάζει από περιοχή σε περιοχή. Η μεθοδολογία κατάρτισής της είναι στατιστική. Προϋπόθεση γι' αυτήν είναι να υπάρχουν διαθέσιμες στην περιοχή που ενδιαφέρει ιστορικές σειρές μέγιστων εντάσεων βροχής (από συμβατικό ή ψηφιακό βροχογράφο) για ένα σύνολο  $k$  διαρκειών  $d_j$ ,  $k = 1, \dots, k$ , ξεκινώντας από την ελάχιστη διάρκεια που επιτρέπει η ευκρίνεια των παρατηρήσεων (π.χ., 5 min ως 1 h) και φθάνοντας μέχρι τη μέγιστη διάρκεια βροχής που ενδιαφέρει στα τυπικά προβλήματα του μηχανικού (π.χ., 24 ως 48 h). Με την ανάλυση συχνότητας και τη συσχέτιση των μεγεθών ένταση, διάρκεια, περίοδος επαναφοράς προκύπτουν διαγράμματα που είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στον υδρολογικό σχεδιασμό πολλών έργων αξιοποίησης και προστασίας των υδατικών πόρων. Στις όμβριες καμπύλες εξάγονται συνήθως μαθηματικές σχέσεις εκθετικού ή άλλου τύπου. (Τσακίρης, 1995, Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Σε πολλές χώρες το θέμα της κατάρτισης όμβριων καμπυλών έχει αντιμετωπιστεί μαζικά για εκτεταμένες γεωγραφικές περιοχές και κατασκευάστηκαν έτσι χάρτες που δίνουν έτοιμα στοιχεία για κάθε περιοχή, βάσει των οποίων μπορεί να καταρτιστούν εύκολα όμβριες καμπύλες σε οποιοδήποτε σημείο, χωρίς να απαιτείται να ανατρέξει κανείς στα πρωτογενή ιστορικά δεδομένα.

### 3.2.1 Τυπικές αναλυτικές εκφράσεις όμβριων καμπυλών

Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται ευρύτατα οι ακόλουθες μαθηματικές σχέσεις (Τσακίρης, 1995)

$$i = at^\eta \quad (\text{διαφορετική για κάθε περίοδο επαναφοράς}) \quad (3.5)$$

και

$$i = c \frac{t^\eta}{T^b} \quad (\text{μοναδική σχέση για όλες τις περιόδους επαναφοράς}) \quad (3.6)$$

όπου  $a$ ,  $\eta$ ,  $b$ , και  $c$  σταθερές που προσδιορίζονται από την ανάλυση.

Στην απλούστερη περίπτωση, οι όμβριες καμπύλες εκφράζονται ως μια σειρά από απλές εξισώσεις, καθεμιά από τις οποίες αντιστοιχεί σε μια δεδομένη περίοδο επαναφοράς  $T$ . Σε αυτή την περίπτωση, οι όμβριες καμπύλες εκφράζονται ως υπερβολικές συναρτήσεις της διάρκειας, σε μια από τις ακόλουθες διαδεδομένες μορφές, εκτός από τις δύο απλούστερες που είδαμε πριν

$$i = \frac{\omega}{(d + \theta)^\eta} \quad (3.7)$$

$$i = \frac{\omega}{d^\eta + \theta} \quad (3.8)$$

$$i = \frac{\omega}{d^\eta} \quad (3.9)$$

$$i = \frac{\omega}{d + \theta} \quad (3.10)$$

όπου  $\omega$ ,  $\theta$  και  $\eta$  είναι παράμετροι που οι τιμές τους εξαρτώνται από την περίοδο επαναφοράς. Η πιο συνηθισμένη από αυτές τις εξισώσεις είναι η (3.9). Σε διάγραμμα με λογαριθμικούς άξονες παριστάνεται ως ευθεία με κλίση  $\eta$ . Προσεκτική παρατήρηση δείχνει ότι η παράμετρος  $\eta$  θα πρέπει να είναι σταθερή και ανεξάρτητη της περιόδου επαναφοράς, οπότε οι ευθείες που αντιστοιχούν σε διάφορες περιόδους επαναφοράς είναι παράλληλες. Διαφορετικά (αν οι ευθείες τέμνονταν) θα ήταν δυνατό για δεδομένη διάρκεια  $d$  και για δύο διαφορετικές περιόδους επαναφοράς να προκύψει η ίδια τιμή της έντασης βροχής  $i$ , οπότε δεν θα υπήρχε αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία έντασης και περιόδου επαναφοράς. Στις εκφράσεις (3.7) και (3.10) δεν είναι κατ' αρχήν απαραίτητο οι παράμετροι  $\theta$  και  $\eta$  να έχουν σταθερές τιμές, ανεξάρτητες της περιόδου επαναφοράς (δεν προκύπτει για κάθε συνδυασμό παραμέτρων  $\eta$  παραπάνω άτοπη συνέπεια). Ωστόσο, και πάλι η υιοθέτηση σταθερών τιμών (ανεξάρτητων από την περίοδο επαναφοράς) για τις παραμέτρους αυτές διευκολύνει την ανάλυση και αποκλείει την πιθανότητα υιοθέτησης εσφαλμένου συνδυασμού παραμέτρων (δηλαδή, τέτοιου που να καταργεί την αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία έντασης και περιόδου επαναφοράς).

Έτσι, οι Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος (1999) πρότειναν την απλουστευτική παραδοχή, σύμφωνα με την οποία μόνο ο αριθμητής  $\omega$  στις εκφράσεις (3.7) - (3.10) επιτρέπεται να εξαρτάται από την περίοδο επαναφοράς  $T$ , οπότε ελήφθη η παρακάτω έκφραση όμβριων καμπυλών

$$i = \frac{\alpha(T)}{b(d)} \quad (3.11)$$

όπου οι  $\alpha(T)$  και  $b(d)$  είναι συναρτήσεις της περιόδου επαναφοράς και διάρκειας, αντίστοιχα. Η σχέση  $b(d)$  παίρνει μια από τις ακόλουθες μορφές:

$$b(d) = (d + \theta)^n \quad (3.12)$$

$$b(d) = d^n + \theta \quad (3.13)$$

$$b(d) = d^n \quad (3.14)$$

$$b(d) = d + \theta \quad (3.16)$$

Κατά μία εμπειρική θεώρηση, η έκφραση της συνάρτησης  $\alpha(T)$  μπορεί να πάρει μια από τις ακόλουθες μορφές:

$$\alpha(T) = \lambda T^\kappa \quad (3.17)$$

$$\alpha(T) = i = \frac{1}{\lambda} (\psi + \ln T) \quad (3.18)$$

όπου  $\kappa$ ,  $\lambda$  και  $\psi$  είναι αριθμητικές παράμετροι. Μια πιο συνεπής στατιστική θεώρηση, προσδιορίζει τη συνάρτηση  $\alpha(T)$  απευθείας από τη συνάρτηση κατανομής της μέγιστης έντασης βροχής. Έτσι, για συναρτήσεις κατανομής Pareto και Gumbel μεγίστων, προτάθηκαν αντίστοιχα οι σχέσεις:

$$\alpha(T) = \lambda(T^\kappa - \psi) \quad (3.19)$$

$$\alpha(T) = \frac{1}{\lambda} \left\{ \psi - \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\} \quad (3.20)$$

Συνδυάζοντας την (3.12) με την (3.17) παίρνουμε τη συχνότερα χρησιμοποιούμενη ενιαία ημιεμπειρική έκφραση όμβριων καμπυλών

$$i = \frac{\lambda T^k}{(d + \theta)^n} \quad (3.21)$$

Αντίστοιχα συνδυάζοντας την πρώτη από την (3.12) με την (3.19), παίρνουμε τις συνεπέστερες γενικευμένες εκφράσεις όμβριων καμπυλών

$$i = \frac{\lambda(T^k - \psi)}{(d + \theta)^n} \quad (3.22)$$

$$i = \frac{1}{\lambda(d + \theta)^n} \left\{ \psi - \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\} \quad (3.23)$$

Η (3.21) είναι απλούστερη στην κατασκευή και στην εφαρμογή της από την (3.22) και την (3.23), αλλά έχει πάντα περιορισμένο πεδίο μεταβολής του  $T$ , οι πολυπλοκότερες (3.22) και (3.23) ισχύουν για οποιαδήποτε τιμή του  $T$ .

### 3.2.2 Αναλυτική έκφραση όμβριων καμπυλών συμβατή με τη γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών (GEV)

Το γενικό πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι η μελέτη της κατανομής των μεταβλητών  $X = \max(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$  ή  $X' = \min(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ , για μεγάλες τιμές του  $n$  (θεωρητικά για  $n \rightarrow \infty$ ), γνωστών ως ασυμπτωτικών ακραίων τιμών.

Πιο αναλυτικά, με τον όρο ασυμπτωτική κατανομή ακροτάτων εννοούμε την οριακή κατανομή της ακρότατης (δηλαδή της μεγαλύτερης ή εναλλακτικά της μικρότερης) από  $k$  ισόνομες μεταβλητές, όταν ο αριθμός  $k$  τείνει στο άπειρο. Συμβολικά, αν  $Y_1, \dots, Y_k$  είναι μια ακολουθία ισόνομων τυχαίων μεταβλητών και

$$X_k = \max(Y_1, \dots, Y_k) \quad (3.24)$$

τότε, η αντίστοιχη ασυμπτωτική κατανομή μεγίστων είναι η:

$$F(x) = \lim_{k \rightarrow \infty} F_{X_k}(x) = \lim_{k \rightarrow \infty} P(X_k \leq y) \quad (3.25)$$

Αντίστοιχα ορίζεται και η ασυμπτωτική κατανομή ελαχίστων. Στην περίπτωση που οι τυχαίες μεταβλητές  $Y_i$  είναι ανεξάρτητες, ο προσδιορισμός της  $F_X(x)$  απλοποιείται αρκετά, δεδομένου ότι

$$F_{X_k}(x) = [F_Y(x)]^k \quad (3.26)$$

όπως εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί παίρνοντας υπόψη την ανεξαρτησία των μεταβλητών.

Σε πολλές περιπτώσεις η παραπάνω ασυμπτωτική κατανομή δεν εξαρτάται από το ακριβές σχήμα της αρχικής συνάρτησης κατανομής  $F_Y(y)$ . Οι περιπτώσεις αυτές, που έχουν μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον, έχουν μελετηθεί σε λεπτομέρεια από τον Gumbel(1958). Αναφέρονται σε τυχαίες μεταβλητές  $Y_i$ , ανεξάρτητες και ισόνομες, των οποίων οι κατανομές ικανοποιούν ορισμένες γενικές συνθήκες.

Η σημασία των κατανομών ακρότατων στην τεχνική υδρολογία προκύπτει από την ομοιότητα της έννοιας των ακρότατων, όπως ορίζεται πιο πάνω, με την ανέλιξη ακρότατων. Έτσι, για

παράδειγμα, αν συμβολίσουμε με  $Y_i$ , την ημερήσια παροχή σε μια διατομή ποταμού κατά την ημέρα  $i$  και με  $X_{365}$  την μέγιστη ημερήσια παροχή κατά τη διάρκεια ενός έτους, είναι προφανής η σύνδεση των μεταβλητών αυτών με την (3.24). Στα πρακτικά προβλήματα αντιπλημμυρικού σχεδιασμού αυτό που ενδιαφέρει είναι η κατανομή μεταβλητών όπως η  $X_{365}$  του παραδείγματος (παρά η κατανομή της  $Y_i$ ). Ωστόσο, οι αυστηρές προϋποθέσεις, κάτω από τις οποίες προκύπτουν θεωρητικά οι κατανομές ακρότατων, σπάνια ικανοποιούνται από τις φυσικές υδρολογικές μεταβλητές. Στο παραπάνω παράδειγμα, οι διάφορες  $Y_i$ , ούτε ανεξάρτητες ούτε ισόνομες μπορούν να θεωρηθούν. Εξ άλλου, η σύγκλιση προς την οριακή κατανομή είναι, κατά κανόνα, πολύ αργή. Για όλους αυτούς τους λόγους, δεν είναι ποτέ προφανές ότι μια συγκεκριμένη μέγιστη ή ελάχιστη υδρολογική μεταβλητή ακολουθεί την ασυμπτωτική κατανομή που προβλέπεται θεωρητικά. Η υιοθέτηση της συγκεκριμένης κατανομής θα πρέπει να γίνεται μετά από έλεγχο προσαρμογής στα πραγματικά δεδομένα.

Κατά Gumbel υπάρχουν οι εξής 3 περιπτώσεις ασυμπτωτικών κατανομών:

Πίνακας 3.1: Ασυμπτωτικές κατανομές κατά Gumbel

Τύπος Κατανομής	Μέγιστες τιμές(M)	Ελάχιστες τιμές (M)
Ακραίων τιμών 1 (AT1)	Η μεταβλητή δεν έχει άνω ή κάτω όριο	
Ακραίων τιμών 2 (AT2)	Η μεταβλητή δεν μπορεί να γίνει μικρότερη από ένα κάτω όριο	Η μεταβλητή δεν μπορεί να υπερβεί ένα άνω όριο
Ακραίων τιμών 3 (AT3)	Η μεταβλητή δεν μπορεί να υπερβεί ένα άνω όριο	Η μεταβλητή δεν μπορεί να γίνει μικρότερη από ένα κάτω όριο

Η γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών (General Extreme Value ή GEV) συνδυάζει τις 3 περιπτώσεις σε μια ενιαία μαθηματική έκφραση. Σύμφωνα με την μέθοδο ενοποίησης των διαρκειών (Κουτσογιάννης, 1999) τα διαφορετικά δείγματα εντάσεων για διάφορες διάρκειες  $d$  ενοποιούνται σε ένα κοινό δείγμα από το οποίο εκτιμώνται τα στατιστικά χαρακτηριστικά. Η τελική έκφραση είναι της μορφής  $i = a(T)/b(d)$  όπως φαίνεται στην (3.11).

Ο αριθμητής  $a(T)$  της σχέσης δίνεται από την αντίστροφη συνάρτηση κατανομής με παραμέτρους σύμφωνα με τα στατιστικά χαρακτηριστικά του ενοποιημένου δείγματος. Ο παρονομαστής  $b(d)$  δίνει το μέτρο μεταβολής της έντασης σύμφωνα με την διάρκεια  $d$ . Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο παράμετροι  $\eta$  και  $\theta$  σε μία σχέση του τύπου  $b(d) = (d+\theta)^\eta$  επιτρέποντας την περιγραφή της κλίσης των καμπυλών καθώς και μία καμπύλωση προς τις μικρές διάρκειες.

Η γενική μορφή ενιαίας έκφρασης εξίσωσης όμβριων καμπυλών σύμφωνα με την κατανομή GEV μεγίστων, η οποία θα χρησιμοποιηθεί και στους υπολογισμούς παρακάτω είναι η

$$i = \frac{\lambda \psi + \frac{\lambda}{\kappa} \left[ \left( -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{-\kappa} - 1 \right]}{(d + \theta)^\eta} \quad (3.27)$$

Η κατανομή GEV μεγίστων θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των όμβριων καμπυλών στη μελέτη μας. Γενικά δίνει δυσμενέστερες τιμές από οποιαδήποτε άλλη κατανομή και προτιμήθηκε για όσο το δυνατόν ασφαλέστερη προσέγγιση των όμβριων καμπυλών.

### 3.2.3 Αναλυτική έκφραση όμβριων καμπυλών συμβατή με τη γενικευμένη κατανομή μεγίστων τύπου I (Gumbel)

Θα αναφερθούμε επίσης συνοπτικά και στην κατανομή μεγίστων τύπου I (Gumbel), η οποία βρίσκει συχνά εφαρμογή στις όμβριες καμπύλες, αν και είναι γενικά παραδεκτό ότι μάλλον υποεκτιμά τα ποσά βροχόπτωσης.

Η κατανομή μεγίστων τύπου I προκύπτει όταν οι μεταβλητές  $Y_i$ , είναι ισόνομες και ανεξάρτητες με διάστημα τιμών το  $(-\infty, +\infty)$  και η κοινή συνάρτηση πιθανότητας υπέρβασης τους εμφανίζει, τουλάχιστον από μια τιμή της μεταβλητής και πάνω, εκθετική μείωση, δηλαδή μπορεί να εκφραστεί ως

$$F_{1Y}(y) = 1 - F_Y(y) = e^{-g(y)} \quad (3.28)$$

όπου η  $g(y)$  είναι αύξουσα συνάρτηση του  $y$ . Αυτός ο τελευταίος όρος ικανοποιείται από τις πιο κοινές κατανομές (π.χ., κανονική, γάμα, κλπ).

Κάποια χαρακτηριστικά της κατανομής φαίνονται στον Πίν. 3.2. Η κατανομή έχει απλή μαθηματική έκφραση και διαθέτει δύο παραμέτρους. Το μέγεθος  $\gamma$  που εμφανίζεται στην έκφραση της μέσης τιμής της μεταβλητής είναι η σταθερά του Euler.

Λόγω της απλής μαθηματικής έκφρασης της συνάρτησης κατανομής, οι τυπικοί υπολογισμοί είναι άμεσοι και δεν προϋποθέτουν τη χρήση πινάκων ή αριθμητικών μεθόδων. Η συνάρτηση κατανομής υπολογίζεται άμεσα αν είναι γνωστή η τιμή της μεταβλητής. (Κουτσογιάννης, 1997)

Πίνακας 3.2: Τυπολόγιο της κατανομής Gumbel μεγίστων	
Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας	$f_x(x) = \lambda e^{-\lambda(x-c)} e^{-e^{-\lambda(x-c)}}$
Συνάρτηση κατανομής	$F_x(x) = e^{-e^{-\lambda(x-c)}}$
Παράμετροι	c: παράμετρος θέσης $\lambda > 0$ παράμετρος κλίμακας

Η εκτίμηση της παραμέτρου  $\lambda$  με τη μέθοδο των ροπών είναι:

$$\lambda = \frac{\pi}{\sqrt{6}s_x} = \frac{1}{0.78s_x} \quad (3.29)$$

όπου  $s_x$  = τυπική απόκλιση.

Μια τυπική μορφή έκφρασης εξίσωσης όμβριων καμπυλών σύμφωνα με την κατανομή Gumbel μεγίστων είναι η

$$i = \frac{\lambda \psi - \lambda \ln(-\ln(1 - \frac{1}{T}))}{(d + \theta)^n} \quad (3.30)$$

### 3.2.4 Το λογισμικό «Υδρογνώμων»

Η επεξεργασία των δεδομένων στις παρακάτω παραγράφους γίνεται με το πρόγραμμα Υδρογνώμων. Ο «Υδρογνώμων» ή «Υδρογνώμονας» (αγγλικά: "Hydrognomon"), αποτελεί σύστημα πρόσβασης στη βάση δεδομένων, διαχείρισης των υδρολογικών, μετεωρολογικών και ποιοτικών δεδομένων και επεξεργασίας των χρονοσειρών. Είναι μία αυτόνομη εφαρμογή

λογισμικού που έχει κατασκευαστεί από στελέχη του εργαστηρίου Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ και από την εταιρεία NAMA (Κοζάνης et al, 1995). Παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης με κοινές εφαρμογές όπως Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) και λογιστικά φύλλα (spreadsheets), που μπορούν να πραγματοποιούν επιπλέον επεξεργασίες ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη. Το σύστημα μπορεί να προσπελαύνεται από το Διαδίκτυο μέσω συμβατικών εφαρμογών που θα προσπελαύνουν τη βάση απευθείας. Επιπρόσθετα, υπάρχει δυνατότητα αυτονόμησης του συστήματος από τη σχεσιακή βάση δεδομένων αποθηκεύοντας δεδομένα χρονοσειρών σε κοινά αρχεία κειμένου (text files) τα οποία παρέχουν το πλεονέκτημα της εύκολης πρόσβασης και από τρίτα λογισμικά (Κοζάνης et al, 1995).

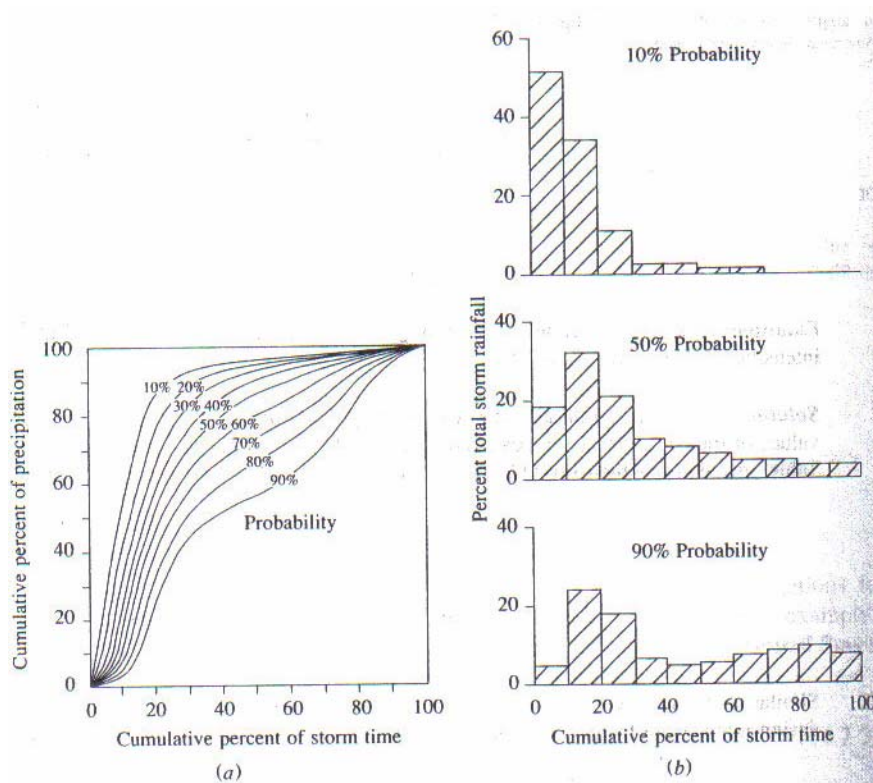
Ο «Υδρογνώμων» μπορεί να χρησιμοποιηθεί για στοχαστική προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών, για στατιστική επεξεργασία υδρολογικών χρονοσειρών για αδρομερή προσομοίωση του υδατικού ισοζυγίου λεκανών απορροής και για την κατάρτιση όμβριων καμπυλών, που είναι η διαδικασία που θα πραγματοποιήσουμε εμείς.

### **3.3 Κατάρτιση υετογράμματος σχεδιασμού**

Η βροχόπτωση σχεδιασμού είναι ένα πρότυπο βροχόπτωσης που χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό ενός υδρολογικού συστήματος. Συνήθως η βροχόπτωση σχεδιασμού εισάγεται στο σύστημα και εξάγονται τιμές παροχών χρησιμοποιώντας σχέσεις βροχόπτωσης - απορροής και διαδικασίες διόδευσης. Μια βροχόπτωση σχεδιασμού μπορεί να προσδιοριστεί με την τιμή του ύψους βροχόπτωσης σε ένα σημείο, με ένα υετόγραμμα σχεδιασμού που καθορίζει τη χρονική κατανομή της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας ή με ένα χάρτη ισουέτιων καμπυλών, που προσδιορίζει το χρονικό πρότυπο της βροχόπτωσης (Shaw, 1983).

Οι βροχοπτώσεις σχεδιασμού μπορούν να βασιστούν σε ιστορικά δεδομένα βροχόπτωσης σε μια περιοχή ή μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας τα γενικά χαρακτηριστικά βροχόπτωσης στη γύρω περιοχή.

Με την ανάλυση των παρατηρούμενων γεγονότων βροχόπτωσης μπορεί να προσδιοριστεί η χρονική αλληλουχία της βροχόπτωσης σε τυπικές καταιγίδες. Ο Huff (1967) ανέπτυξε πρότυπα χρονικής κατανομής για ισχυρές καταιγίδες σε περιοχές που κυμαίνονταν μέχρι τα 400 mi<sup>2</sup> στο Illinois των ΗΠΑ. Τα πρότυπα αναπτύχθηκαν για τέσσερις ομάδες στις οποίες μπορεί να χωριστούν οι βροχοπτώσεις, από την ομάδα με τις πιο ισχυρές (πρώτο τέταρτημόριο) έως την ομάδα με τις λιγότερο ισχυρές καταιγίδες (τελευταίο τέταρτημόριο). Το σχήμα 3.1(a) δείχνει την κατανομή της αθροιστικής βροχόπτωσης ως συνάρτηση του ποσοτού του χρόνου της βροχόπτωσης για διάφορες πιθανότητες από 10% ως 90% για το πρώτο τέταρτημόριο. Η πιθανότητα αυτή νοείται ως η πιθανότητα η πραγματική κατανομή της βροχόπτωσης να κείται στα αριστερά της αντίστοιχης καμπύλης. Οι καμπύλες αυτές είναι εξομαλυμένες, αντανakλώντας τη μέση κατανομή της βροχόπτωσης με το χρόνο. Το σχήμα 3.3(b) δείχνει επιλεγμένα ιστογράμματα καταιγίδων του πρώτου τέταρτημορίου για 10%, 50% και 90% αθροιστική πιθανότητα εμφάνισης.

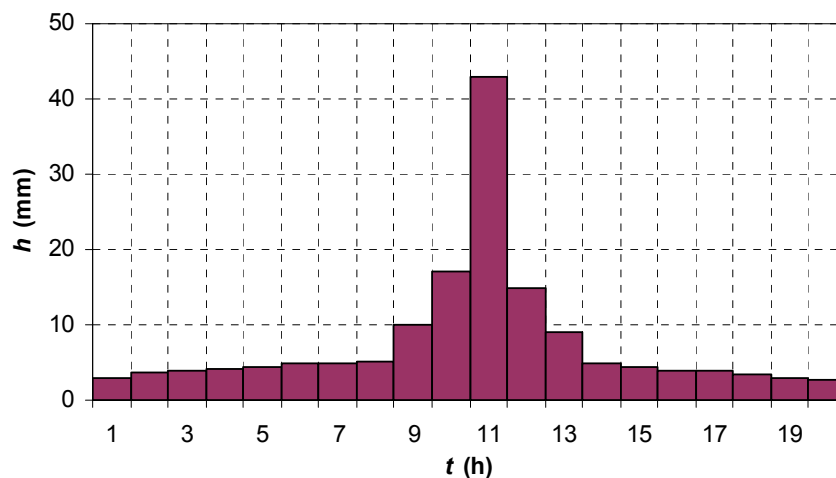


Σχήμα 3.1: (a) Χρονική κατανομή για καταιγίδες του πρώτου τεταρτημορίου για διάφορες πιθανότητες το παρατηρηθέν πρότυπο καταιγίδας να βρίσκεται στα αριστερά της καμπύλης. (b) Επιλεγμένα ιστογράμματα για καταιγίδες του πρώτου τεταρτημορίου (Πηγή: Chow, 1988).

Στον υδρολογικό σχεδιασμό οι μέθοδοι που είχαν αναπτυχθεί χρόνια πριν, όπως η ορθολογική μέθοδος, χρησιμοποιούσαν μόνο την παροχή αιχμής. Δεν λαμβανόταν υπόψιν η χρονική κατανομή της παροχής ούτε εκείνη της βροχόπτωσης. Οι πιο πρόσφατα αναπτυχθείσες μέθοδοι χρησιμοποιούν προβλέψεις του υετογράμματος σχεδιασμού για να αποκτηθεί το υδρογράφημα σχεδιασμού. Προτάθηκαν, έτσι, υποθετικές καταιγίδες με ύψη βροχόπτωσης για διάφορες διάρκειες μέσα στην καταιγίδα που έχουν μια πιθανότητα υπέρβασης συνεπή με την υπάρχουσα πληροφορία που, εν προκειμένω, συμπυκνώνεται σε μια όμβρια καμπύλη.

Παρακάτω αναπτύσσεται μια μέθοδος παραγωγής ενός υετογράμματος σχεδιασμού από μια όμβρια καμπύλη η οποία χρησιμοποιείται στην προσέγγιση των επόμενων κεφαλαίων. Πρόκειται για τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ (alternating blocks), η οποία είναι ένας απλός τρόπος παραγωγής ενός «εικονικού» υετογραφήματος με διαθέσιμη την όμβρια καμπύλη. Η μέθοδος αυτή κρίνεται ότι δίνει μια ικανοποιητική μέση λύση καθώς, στην περίπτωση της μελέτης μας, δεν υπάρχουν επαρκή ιστορικά δεδομένα για να καταλήξουμε με ακρίβεια σε συγκεκριμένη κατανομή της βροχόπτωσης. Το υετόγραμμα σχεδιασμού που παράγεται από αυτή τη μέθοδο ορίζει το ύψος βροχόπτωσης που συμβαίνει σε  $n$  διαδοχικά χρονικά διαστήματα διάρκειας  $\Delta t$  σε μια ολική διάρκεια  $d = n\Delta t$ . Μετά την επιλογή της περιόδου επαναφοράς σχεδιασμού, η ένταση υπολογίζεται από τις όμβριες καμπύλες για κάθε μια από τις διάρκειες  $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, n\Delta t$  και το αντίστοιχο ύψος βροχόπτωσης βρίσκεται σαν γινόμενο της έντασης βροχόπτωσης και της διάρκειας. Παίρνοντας διαφορές μεταξύ διαδοχικών τιμών υψών βροχόπτωσης, βρίσκεται το ποσό της βροχόπτωσης που είναι να προστεθεί για κάθε επιπρόσθετη μονάδα χρόνου  $\Delta t$ . Τα προκύπτοντα μπλοκ βροχόπτωσης καταγράφονται καταρχάς με φθίνουσα σειρά από το μεγαλύτερο προς το

μικρότερο. Μετά ανακατανέμονται ώστε το μέγιστο ύψος να τοποθετείται στο κεντρικό μπλοκ και τα εναπομείναντα μπλοκ με φθίνουσα σειρά και με εναλλαγή μια στα δεξιά και μία στα αριστερά του κεντρικού μπλοκ σχηματίζοντας έτσι το υετόγραμμα σχεδιασμού (Chow, 1988).



Σχήμα 3.2: Τυπικό υετόγραμμα σχεδιασμού με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ

### 3.4 Υπολογισμός περισσεύματος βροχόπτωσης

#### 3.4.1 Γενικά

Μετά το σχηματισμό και την πτώση της βροχής και πριν τη δημιουργία της απορροής, αρχίζουν διάφορες διαδικασίες που συντελούν σ' αυτό που ονομάζεται απώλειες της βροχής. Πιο συγκεκριμένα, από την ποσότητα της βροχής (και πριν αυτή φτάσει στο έδαφος) ένα μέρος συγκρατείται από τη βλάστηση και άλλα ψηλά εμπόδια και λέγεται συγκράτηση (interception). Συνήθως το τμήμα αυτής της ποσότητας που παραμένει αποθηκευμένο πάνω στη φυτοκόμη και εξατμίζεται λέγεται απώλεια συγκράτησης.

Χρονικά έπεται η πτώση της βροχής στο έδαφος και ακολουθείται από το φαινόμενο της διήθησης που αποτελεί επίσης απώλεια. Μετά την αφαίρεση από το συνολικό ύψος βροχής των αρχικών απωλειών συγκράτησης και των απωλειών διήθησης και εφόσον η βροχή συνεχίζεται παρατηρείται συγκέντρωση του νερού σε επιφανειακές κοιλότητες του ανάγλυφου και επιφανειακή αποθήκευση. Το νερό που συγκεντρώνεται σ' αυτές τις κοιλότητες ή στην επιφάνεια εξατμίζεται ή διηθείται αργότερα και επομένως αποτελεί επίσης απώλεια.

Το τμήμα που δημιουργεί την επιφανειακή απορροή και είναι απαλλαγμένο από κάθε είδους απώλειες λέγεται καθαρή βροχόπτωση.

Όμως στην απορροή είναι δύσκολο να απομονώσουμε την επιφανειακή απορροή επειδή στο μέρος της επιπλέον απορροής που ακολουθεί ένα γεγονός βροχής, γνωστής ως άμεσης απορροής, εμπεριέχεται και η ταχεία υπεδάφια ροή. Για το λόγο αυτό, το μέρος της βροχής που προκαλεί την άμεση απορροή είναι η καθαρή βροχή και το τμήμα που προκαλεί την ταχεία υπεδάφια ροή (που ουσιαστικά εμπεριέχεται στο τμήμα που διηθείται) μαζί αναφέρονται απλοποιητικά ως περίσσειμα βροχόπτωσης (Rainfall Excess).



Πολλές φορές, και σε πολλά βιβλία, το περίσσειμα βροχής και η καθαρή βροχή θεωρούνται ταυτόσημες έννοιες. Το ίδιο και ως προς την άμεση και επιφανειακή απορροή.

Είναι γεγονός ότι η εκτίμηση των απωλειών της βροχής είναι συνήθως ένα δύσκολο πρόβλημα που εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης όσο και από τα χαρακτηριστικά της βροχής. Η καθαρή βροχή προκύπτει ως το τμήμα της βροχής μετά την αφαίρεση των διαφόρων απωλειών (συγκράτηση φυτοκόμης, συγκράτηση σε επιφανειακές κοιλότητες και διήθηση).

Πέρα από την αναλυτική εκτίμηση των απωλειών λόγω συγκράτησης και διήθησης υπάρχει η ανάγκη αδρομερούς εκτίμησης των συνολικών απωλειών με τέτοιο τρόπο ώστε αυτές να μπορούν να συσχετιστούν με την άμεση απορροή. Αυτό, όπως ήδη αναφέρθηκε, επιτυγχάνεται με μετρημένα στοιχεία βροχόπτωσης και απορροής. Με τον τρόπο αυτό, προσδιορίζονται διάφοροι δείκτες που μπορούν μετά να χρησιμοποιούνται για τη λεκάνη και για οποιαδήποτε βροχή για τον προσδιορισμό του περισσεύματος της βροχής.

Σύμφωνα με μια προσέγγιση οι συνολικές απώλειες μπορούν αδρομερώς να εκτιμηθούν ως περίπου ίσες με την αθροιστική ποσότητα διήθησης που ακολουθεί το φαινόμενο της βροχής.

Στις μέρες μας για την εκτίμηση των περισσευμάτων βροχόπτωσης, επινοήθηκαν και χρησιμοποιούνται ποσότητες γνωστές ως Δείκτες απωλειών όπως ο δείκτης  $\varphi$ , ο δείκτης  $W$  και ο συντελεστής απορροής  $C$  (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999). Η εκτίμηση του περισσεύματος βροχής στην εργασία μας πάντως θα γίνει με τη μέθοδο SCS που περιγράφεται παρακάτω.

### 3.4.2 Η μέθοδος του δείκτη $\varphi$

Μια πρώτη μέθοδος για τον προσδιορισμό των ολικών απωλειών βροχής αποτελεί η μέθοδος του δείκτη  $\varphi$ , ο οποίος έχει μονάδες ίδιες με αυτές της έντασης βροχής. Έτσι οι απώλειες πραγματοποιούνται με ρυθμό χρονικά σταθερό, μεγέθους  $\varphi$ . Αν η ένταση βροχής γίνει  $i < \varphi$  τότε τα ελλείμματα πραγματοποιούνται με ρυθμό ίσο με  $i$ . Κατά συνέπεια

$$i_a = \min(\varphi, i) \quad (3.31)$$

και

$$h_r = \max(i - \varphi, 0) \quad (3.32)$$

όπου  $i_a$  και  $h_r$  η ένταση όλων των απωλειών και το περίσσειμα βροχόπτωσης αντιστοίχως.

Έτσι, αν είναι γνωστό το πραγματικό (ακαθάριστο) υετόγραμμα  $i(t)$  και ο δείκτης  $\varphi$ , τότε μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα το υετόγραμμα  $h_r(t)$ .

Σε περίπτωση σταθερής έντασης βροχής  $i$  η μέθοδος του δείκτη  $\varphi$  είναι ισοδύναμη με τη μέθοδο του σταθερού συντελεστή απορροής. Για μεταβλητή, όμως, ένταση, η μέθοδος του δείκτη  $\varphi$  γενικά υπερτερεί, ως πιο ρεαλιστική. Ωστόσο, ούτε η μέθοδος του δείκτη  $\varphi$  ανταποκρίνεται απόλυτα στην πραγματικότητα, γιατί όπως είδαμε ο ρυθμός των απωλειών δεν είναι χρονικά σταθερός αλλά έχει φθίνουσα πορεία. Επιπλέον, τόσο η κατακράτηση όσο και η διήθηση παρουσιάζουν ένα αρχικό στάδιο όπου το ύψος τους ταυτίζεται με τη βροχόπτωση, πράγμα που γενικά δεν περιγράφεται από τη μέθοδο του δείκτη  $\varphi$ . Για την αντιμετώπιση αυτού του τελευταίου μειονεκτήματος έχει αναπτυχθεί μια παραλλαγή της μεθόδου η μέθοδος του δείκτη  $\varphi$  με αρχική απώλεια, σύμφωνα με την οποία ένα αρχικό ύψος

βροχής  $h_{a0}$ , ανεξάρτητα από την ένταση, αποτελεί απώλεια ενώ στη συνέχεια η εξέλιξη του ελλείμματος ακολουθεί την εξίσωση  $i_a = \min(\varphi, i)$ .

Για δεδομένη βροχόπτωση και επιφανειακή απορροή, ο δείκτης  $\varphi$  προκύπτει με απλή αφαίρεση των ποσοτήτων βροχής και επιφανειακής απορροής και διαίρεση της διαφοράς με τη διάρκεια της βροχόπτωσης. Σε περίπτωση πολύπλοκου υετογράμματος η υπολογιστική διαδικασία απαιτεί επαναλήψεις.

Η διαδικασία υπολογισμού του δείκτη  $\varphi$  από ένα μετρημένο γεγονός βροχόπτωσης-απορροής και η εν συνεχεία εφαρμογή του σε άλλες βροχοπτώσεις, για την άμεση εκτίμηση της απορροής, θα ήταν ιδιαίτερα πολύτιμη στις πρακτικές υδρολογικές εφαρμογές. Δυστυχώς όμως, η τιμή του  $\varphi$  δεν είναι η ίδια για όλα τα γεγονότα βροχής-απορροής αλλά μεταβάλλεται σημαντικά συναρτήσει πολλών παραμέτρων της λεκάνης απορροής. Αυτό περιορίζει ιδιαίτερα την αξιοπιστία των εφαρμογών της μεθόδου.

### 3.4.3 Η μέθοδος SCS

Μια ρεαλιστική, εύχρηστη και σχετικά πρόσφατη μέθοδος για τον προσδιορισμό του περισσεύματος βροχόπτωσης είναι η μέθοδος της Αμερικανικής Υπηρεσίας Soil Conservation Service που είναι γνωστή ως μέθοδος SCS. Η μέθοδος στηρίζεται στις ακόλουθες κύριες παραδοχές:

1. Σε ένα αρχικό χρονικό διάστημα  $t_{a0}$  όλη η πραγματική (ακαθάριστη) βροχόπτωση, συνολικού ύψους  $h_{a0}$  μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε απώλεια (αρχική απώλεια), χωρίς να δίνει καθόλου περίσσευμα βροχόπτωσης. Κατά συνέπεια, μετά το χρόνο  $t_{a0}$  το μέγιστο περίσσευμα βροχής  $h_r$  δεν μπορεί να υπερβεί το δυνητικό μέγεθος ( $y = h - h_{a0}$ ), όπου  $h$  το ολικό (ακαθάριστο) ύψος βροχής.
2. Το επιπλέον, πέραν του αρχικού  $h_{a0}$ , ύψος απωλειών που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μια βροχόπτωση με μεγάλο ολικό ύψος  $h$  δεν μπορεί να ξεπεράσει μια μέγιστη τιμή  $S$ , γνωστή ως δυνητικά μέγιστη κατακράτηση (potential maximum retention).
3. Σε κάθε χρονική στιγμή μετά το χρόνο  $t_{a0}$ , οι λόγοι του περισσεύματος βροχής  $h_r$  και του επί πλέον (του αρχικού) ύψους απωλειών [ $x = (h - h_r) - h_{a0}$ ], προς τα αντίστοιχα δυνητικά μεγέθη ( $y$  και  $S$  αντίστοιχα) είναι ίσοι. Συμβολικά:

$$\frac{h_r}{y} = \frac{x}{S} \quad (3.33)$$

Αντικαθιστώντας στην (3.33) τα  $x$  και  $y$  και λύνοντας ως προς  $h_r$  βρίσκουμε

$$\begin{aligned} h_r &= 0 & h &\leq h_{a0} \\ h_r &= \frac{(h - h_{a0})^2}{h - h_{a0} + S} & h &> h_{a0} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Παρατηρούμε ότι η (3.34) δίνει σε κάθε χρονική στιγμή το (αθροιστικό, απ' την αρχή της βροχής) περίσσευμα βροχής  $h_r$  συναρτήσει του ταυτόχρονου ολικού ύψους  $h$  και δύο παραμέτρων, των  $h_{a0}$  και  $S$ . Ακόμη, παρατηρούμε ότι στην (3.34) δεν περιλαμβάνεται ρητά ο χρόνος  $t$ , ο οποίος υπεισέρχεται μόνο έμμεσα, μέσω της εξάρτησης του  $h$  από το χρόνο. Αυτό, καθώς και οι παραδοχές 2 και 3 της μεθόδου δεν τεκμηριώνονται θεωρητικά και είναι μάλλον αυθαίρετες, αλλά ωστόσο η μέθοδος είναι εύχρηστη και αρκετά ρεαλιστική. Για περαιτέρω απλοποίηση, υιοθετείται η επιπλέον παραδοχή ότι  $h_{a0} = 0.2S$ , η οποία θεωρείται

ως η βέλτιστη προσέγγιση από δεδομένα παρατηρήσεων, οπότε η μέθοδος χρησιμοποιεί τελικώς μία μόνο παράμετρο (όπως και η μέθοδος δείκτη  $\phi$ ), την  $S$ . Με αυτή την επιπλέον παραδοχή, η (3.34) τελικώς γράφεται

$$\begin{aligned} h_r &= 0 & h &\leq 0.2S \\ h_r &= \frac{(h - 0.2S)^2}{h + 0.8S} & h &> 0.2S \end{aligned} \quad (3.35)$$

Η σχέση (3.35) εφαρμόζεται και για το τελικό ύψος βροχής της καταιγίδας αλλά και για ενδιάμεσες τιμές του, και έτσι προκύπτει η χρονική εξέλιξη του φαινομένου. Το τελικό ύψος απωλειών μπορεί να φτάσει ασυμπτωτικά (για βροχόπτωση μεγάλου ύψους) την τιμή  $0.2S + S = 1.2S$ .

Σε περίπτωση που είναι γνωστό το τελικό περίσσειμα  $h_r$  (από μέτρηση της απορροής), τότε από αυτό και το τελικό ολικό ύψος  $h$ , μπορεί να υπολογιστεί η παράμετρος  $S$ . Πράγματι, η (3.35) για  $h_r > 0$  γράφεται

$$0.04S^2 - (0.4h + 0.8h_r)S + h(h - h_r) = 0 \quad (3.36)$$

και επιλύεται ως προς  $S$  δίνοντας

$$S = 5h + 10h_r - 10\sqrt{h_r(h_r + 1.25h)} \quad (3.37)$$

Αν δεν υπάρχουν μετρήσεις απορροής, ακολουθείται άλλη, εμπειρική μεθοδολογία εκτίμησης της παραμέτρου  $S$ . Συγκεκριμένα, η παράμετρος  $S$  συνδέεται με μια άλλη χαρακτηριστική παράμετρο, τον αριθμό καμπύλης (runoff curve number) CN, με τη σχέση:

$$S = 254\left(\frac{100}{CN} - 1\right) \quad (3.38)$$

Η παράμετρος CN παίρνει τιμές από 0 μέχρι 100, και επηρεάζεται από τις συνθήκες εδάφους και χρήσης γης στη λεκάνη απορροής, καθώς τις προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας -οι τελευταίες συναρτώνται με τη χρονική απόσταση της υπό μελέτη καταιγίδας από προηγούμενες. Κατ' αρχήν η υπηρεσία SCS κατατάσσει τα εδάφη στις ακόλουθες τέσσερις ομάδες, ανάλογα με τη διαπερατότητα τους:

Ομάδα A: Εδάφη με μεγάλους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδη και χαλικώδη με πολύ μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου.

Ομάδα B: Εδάφη με μέσους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδης πηλός.

Ομάδα C: Εδάφη με μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη από αργιλοπηλό, εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό.

Ομάδα D: Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη που διογκώνονται σημαντικά όταν διαβραχούν, πλαστικές άργιλοι. Στην ίδια ομάδα περιλαμβάνονται εδάφη μικρού βάθους με σχεδόν αδιαπέρατους υπο-ορίζοντες κοντά στην επιφάνεια.

Στη συνέχεια η SCS ορίζει τρεις τύπους προηγούμενων συνθηκών υγρασίας, (AMC) ήτοι:

Τύπος I: Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά, αλλά πάνω από το σημείο μαρασμού). Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μικρότερη από 13 mm (ή 35 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Τύπος II: Μέσες συνθήκες. Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μεταξύ 13 και 38 mm (ή μεταξύ 35 και 53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Τύπος III: Υγρές συνθήκες (εδάφη σχεδόν κορεσμένα). Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μεγαλύτερη από 38 mm (ή μεγαλύτερη από 53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Για τις συνθήκες υγρασίας τύπου II, η SCS δίνει αναλυτικούς πίνακες με τιμές του CN για κάθε ομάδα εδαφών και για διάφορες χρήσεις γης. Ένα μικρό υποσύνολο των πινάκων αυτών δίνει ο Πίνακας 3.3.

Πίνακας 3.3: Τυπικοί αριθμοί καμπύλης απορροής (CN) κατά SCS για αγροτικές, ημιαστικές και αστικές περιοχές και για προηγούμενες συνθήκες υγρασίας (AMC) τύπου II.

Περιγραφή χρήσης γης		Υδρολογικός τύπος εδάφους			
		A	B	C	D
Καλλιεργημένες εκτάσεις		62-72	71-81	78-88	81-91
Λιβάδια, βοσκότοποι		30-68	58-79	71-86	78-89
Δάση		25-45	55-66	70-77	77-83
Ανοιχτοί χώροι, πάρκα	με κάλυψη από πράσινο >75%	39	61	74	80
	με κάλυψη από πράσινο 50-75%	49	69	79	84
Εμπορικές περιοχές		89	92	94	95
Βιομηχανικές περιοχές		81	88	91	93
Οικιστικές περιοχές					
Μέσο μέγεθος οικοπέδου (στρ)	Ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας (%)				
< 0.5	65	77	85	90	92
1	38	61	75	83	87
1.5	30	57	72	81	86
2	25	54	70	80	85
4	20	51	68	79	84
Δρόμοι	με οδόστρωμα και δίκτυο ομβρίων	98	98	98	98
	χαλικόστρωτοι	76	85	89	91
	χωματόδρομοι	72	82	87	89

Για τους άλλους δύο τύπους συνθηκών υγρασίας γίνεται αναγωγή του CN με βάση τις σχέσεις:

$$CN_I = \frac{0.42CN_{II}}{1 - 0.0058CN_{II}} \quad (3.39)$$

$$CN_{III} = \frac{2.3CN_{II}}{1 + 0.013CN_{II}} \quad (3.40)$$

### 3.5 Το υδρογράφημα πλημμυρικού γεγονότος και οι συνιστώσες του

#### 3.5.1 Απλοποιημένη αναπαράσταση των συνιστωσών της επιφανειακής απορροής

Τα υδρογραφήματα των πλημμυρών αποτελούνται κυρίως από επιφανειακή απορροή και παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το σχεδιασμό των υδραυλικών έργων. Συνήθως, στις πρακτικές εφαρμογές του μηχανικού, η ακριβής μαθηματική αναπαράσταση των πολύπλοκων μηχανισμών που είναι υπεύθυνοι για τη γένεση της επιφανειακής απορροής δεν είναι απαραίτητη. Έτσι, χρησιμοποιείται μια απλοποιημένη αναπαράσταση των συνιστωσών της απορροής που περιλαμβάνει δύο συνιστώσες. Αυτές διακρίνονται από τον ρυθμό πραγματοποίησής τους και όχι από τον μηχανισμό δημιουργίας τους.

Κατά τη διάρκεια έντονων καταιγίδων ένα τμήμα των κατακρημνισμάτων ακολουθεί μια γρήγορη πορεία (επίγεια ή υπεδάφια) προς τα υδατορεύματα. Από την άλλη πλευρά, σε πολλά υδατορεύματα, παρατηρείται συνεχής ροή, η οποία δεν σχετίζεται έντονα με το ρυθμό των κατακρημνισμάτων, αφού είναι ορατή ακόμη και σε παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας, πράγμα που δείχνει ότι ένα μέρος των κατακρημνισμάτων ακολουθεί μια πολύ αργή πορεία προς τα υδατορεύματα, σε μια αναγκαστικά υπόγεια διαδρομή. Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις, διακρίνουμε δύο συνιστώσες της επιφανειακής απορροής: την άμεση ή ταχεία ή πλημμυρική απορροή (direct runoff quickflow) και τη βασική ή βραδεία απορροή (baseflow, base runoff).

Η άμεση απορροή σχετίζεται ευθέως με το περίσσειμα βροχόπτωσης. Συγκεκριμένα, αποτελεί έναν μετασχηματισμό του περισσεύματος, ο οποίος χαρακτηρίζεται αφενός από μια χρονική υστέρηση, λόγω του χρόνου που απαιτεί η διαδρομή του νερού μέχρι να φτάσει στην έξοδο της λεκάνης, και αφετέρου από τη διατήρηση της ολικής μάζας ή όγκου. Αντίθετα, η βασική απορροή οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στο μηχανισμό της υπόγειας ροής και γι' αυτό δεν επηρεάζεται αισθητά κατά τη διάρκεια των πλημμυρών. Ανάλογα με το χαρακτήρα της βασικής απορροής σε μια συγκεκριμένη λεκάνη, η δίαυτη απορροής σε αυτή χαρακτηρίζεται ως διαρκής, όταν η απορροή δεν παύει καθόλου στη διάρκεια του έτους, διακοπτόμενη, όταν η απορροή παρατηρείται μόνο κατά την υγρή περίοδο και εξαφανίζεται κατά την ξηρή περίοδο, και εφήμερη ή χειμαρρική, όταν δεν υπάρχει βασική απορροή και το υδατόρευμα παρουσιάζει ροή μόνο μετά από ισχυρές καταιγίδες

#### 3.5.2 Διαχωρισμός βασικής ροής και χαρακτηριστικά μεγέθη υδρογραφήματος

Τα καταγραμμένα υδρογραφήματα κατά τη διάρκεια πλημμυρών, σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα υετογράμματα των βροχοπτώσεων που τις προκάλεσαν, περιέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο που εξελίσσεται μια πλημμύρα στη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής. Πάνω σε αυτά βασίζονται σημαντικές υδρολογικές αναλύσεις, καθώς και η κατάρτιση μοντέλων μετασχηματισμού της βροχής σε απορροή. Στο Σχ. 3.3 φαίνεται ένα τυπικό υδρογράφημα (παροχή υδατορεύματος συναρτήσεως του χρόνου) ενός πλημμυρικού γεγονότος, μαζί με το υετόγραμμα που προκάλεσε την πλημμύρα (ένταση βροχής συναρτήσεως του χρόνου το οποίο έχει καθιερωθεί να σχεδιάζεται με ανεστραμμένη τη φορά των τεταγμένων, όπως ακριβώς φαίνεται στο Σχ. 3.3) Υποτίθεται ότι η βροχόπτωση έχει ικανοποιητική χωρική ομογένεια, ή η ένταση που απεικονίζεται στο υετόγραμμα αποτελεί την χωρικά μέση τιμή για κάθε χρονικό διάστημα  $\Delta t$ . Το υετόγραμμα δείχνει ότι στο χρόνο  $t_k$  ξεκινά ένα επεισόδιο βροχής, και σύντομα, στο χρόνο  $t_L$ , μετά από ένα αρχικό έλλειμμα,

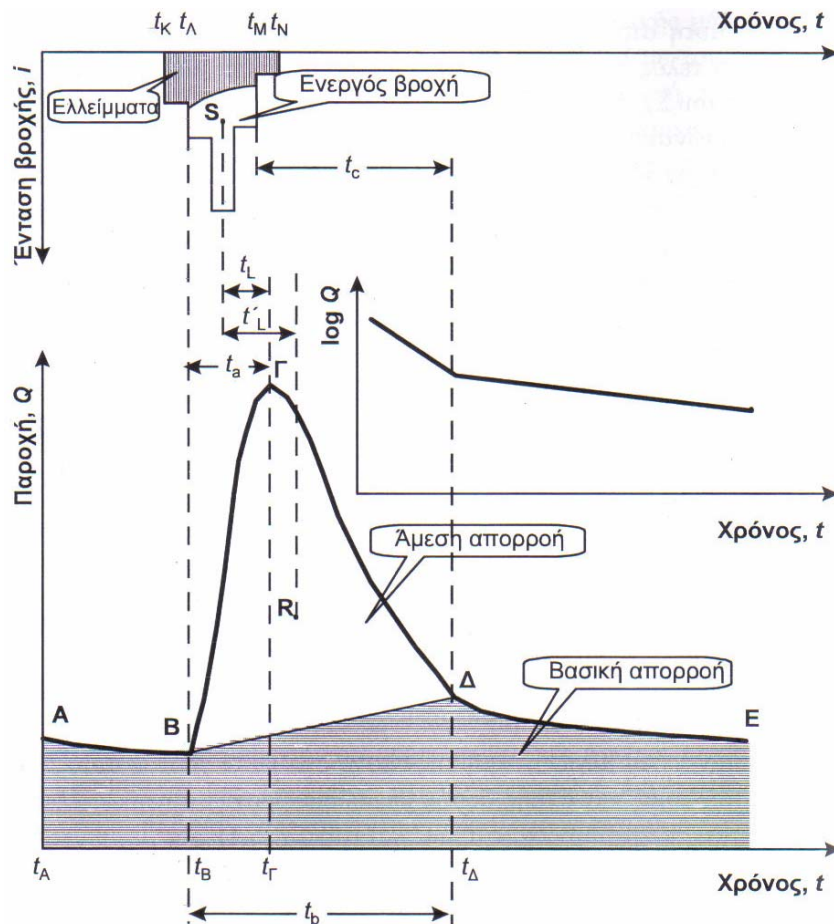
ξεκινά η εμφάνιση περισσεύματος βροχής το οποίο μετατρέπεται σε άμεση απορροή. Η βροχή λήγει στο χρόνο  $t_N$ . Το περίσσειμα βροχής μπορεί να λήγει και αυτή στον ίδιο χρόνο  $t_N$  ή σε προηγούμενο χρόνο  $t_M$ , αν η ένταση στο τέλος του επεισοδίου είναι αρκετά μικρή, όπως είναι στην περίπτωση του Σχ. 3.3.

Παρατηρώντας το υδρογράφημα, διαπιστώνουμε ότι, πριν αρχίσει η εμφάνιση περισσεύματος βροχής, η παροχή του ποταμού είναι ελαφρώς φθίνουσα συνάρτηση του χρόνου. Ο κλάδος AB του υδρογραφήματος αντιπροσωπεύει τη βασική ροή του ποταμού, η οποία στα διαστήματα μεταξύ των πλημμυρικών επεισοδίων μειώνεται με το χρόνο με ήπιο (συντά ανεπαίσθητο) ρυθμό. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η εκφόρτιση των υπόγειων υδροφορέων προς τα επιφανειακά υδάτινα σώματα συνοδεύεται από ταπείνωση της στάθμης τους και συνακόλουθα από μείωση του ρυθμού εκφόρτισης. Έτσι, ο κλάδος AB ονομάζεται κλάδος στείρευσης της βασικής ροής και συνήθως περιγράφεται μαθηματικά από μια εξίσωση εκθετικής μείωσης της παροχής ως προς το χρόνο, της μορφής

$$Q = Q_0 e^{-(t-t_0)/\alpha} \quad (3.41)$$

όπου  $Q_0$  η παροχή στο χρόνο  $t_0$  και  $\alpha$  ένας συντελεστής με διαστάσεις χρόνου, γνωστός ως συντελεστής στείρευσης.

Στο χρόνο  $t_A = t_B$  που ξεκινά το περίσσειμα βροχής, η παροχή του υδατορεύματος αρχίζει να αυξάνεται με έντονο ρυθμό, μέχρι που η παροχή φτάνει στη μέγιστη τιμή της στο χρόνο  $t_r$ . Ο χρόνος αυτός για σχετικώς σύντομα και απλής δομής επεισόδια βροχής συνήθως έπεται της λήξης του περισσεύματος βροχής (όπως και στο Σχ.3.3) για μεγαλύτερης διάρκειας και απλής δομής επεισόδια βροχής ο χρόνος  $t_r$  μπορεί να ταυτίζεται με το χρόνο λήξης του περισσεύματος βροχής  $t_M$ . Ο κλάδος ΒΓ του υδρογραφήματος ονομάζεται ανοδικός κλάδος, το σημείο Γ ονομάζεται αιχμή του υδρογραφήματος και η παροχή στο χρόνο  $t_r$  παροχή αιχμής. Ακολουθεί η μείωση της παροχής που απεικονίζεται στον καθοδικό κλάδο ΓΔ. Στο χρόνο  $t_D$  παύει η άμεση απορροή, συνεχίζει όμως η βασική απορροή, σχηματίζοντας ένα νέο κλάδο στείρευσης, τον κλάδο ΔΕ.



Σχήμα 3.3: Σκαρίφημα τυπικού πλημμυρικού υδρογραφήματος με το αντίστοιχο υετόγραμμα. Διαχωρισμός των συνιστωσών του υδρογραφήματος και χαρακτηριστικοί χρόνοι (Πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999)

### 3.5.3 Χρόνος συγκέντρωσης και μέθοδοι εκτίμησης του

Ένα σημαντικό μέγεθος είναι επίσης ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης (concentration time,  $t_c$ ) που ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται το νερό να διανύσει την απόσταση από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης (ακολουθώντας το υδρογραφικό δίκτυο) ως την έξοδο (Τσακίρης, 1995).

Στο παραπάνω σχήμα (3.3), ο χρόνος συγκέντρωσης εμφανίζεται σαν η χρονική απόσταση από τη λήξη του περισσεύματος βροχής μέχρι τη λήξη της άμεσης απορροής, δηλαδή  $t_c = t_\Delta - t_M$ .

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης του χρόνου συγκέντρωσης. Οι σημαντικότερες είναι οι παρακάτω:

- $t_c$  κατά Kirpich:

$$t_c = 0.0078L^{0.77} S_m^{-0.385} \quad (3.42)$$

όπου  $L$  = μήκος κύριου υδατορεύματος από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης ως την έξοδο (m) και  $S_m$  = μέση κλίση λεκάνης (m/m).

- $t_c$  κατά Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}} \quad (3.43)$$

όπου  $A$  = η έκταση της λεκάνης απορροής, ( $\text{km}^2$ ),  $L$  = η απόσταση κατά μήκος του κύριου ρεύματος μέχρι την έξοδο της λεκάνης ( $\text{km}$ ) και  $\Delta H$  = η υψομετρική διαφορά μεταξύ μέσου υψομέτρου της λεκάνης και της κοίτης του υδατορεύματος στην έξοδο ( $\text{m}$ ).

- $t_c$  κατά SCS:

$$t_c = \frac{0.57L^{0.8}[(1000/\text{CN} - 9)]^{0.7}}{S_m^{0.5}} \quad (3.44)$$

όπου  $L$  = μήκος της κύριας μισγάγγειας ( $\text{m}$ ),  $\text{CN}$  = ο αριθμός καμπύλης (Curve Number) της μεθόδου SCS και  $S_m$  = η μέση κλίση της λεκάνης (%).

Στην παρούσα εργασία, ο χρόνος συγκέντρωσης της κάθε λεκάνης για τις τυπικές υδρολογικές συνθήκες (συνθήκες εδαφικής υγρασίας II, λεκάνη ανεπηρέαστη από πυρκαγιές) εκτιμήθηκε από την εμπειρική σχέση του Giandotti (3.43) η οποία θεωρείται ότι, για λεκάνες της Μεσογείου, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Η εξίσωση 3.44 αξιοποιήθηκε για την εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης μετά από αλλαγή του  $\text{CN}$  από οποιαδήποτε αιτία: (α) θεώρηση άλλων συνθηκών εδαφικής υγρασίας (I ή III), (β) αλλαγή χρήσης γης (όπως π.χ., μια πυρκαγιά), ή (γ) συνδυασμό των παραπάνω. Αν υποθεθεί ότι ο χρόνος συγκέντρωσης πριν την αλλαγή είναι  $t_{c,i}$  και ότι ο αριθμός καμπύλης είναι  $\text{CN}_i$  και  $\text{CN}_f$  αντίστοιχα πριν και μετά την αλλαγή, τότε, σύμφωνα με την 3.45, ο χρόνος συγκέντρωσης μετά την αλλαγή  $t_{c,f}$  είναι

$$t_{c,f} = t_{c,i} \left( \frac{\frac{1000}{\text{CN}_f} - 9}{\frac{1000}{\text{CN}_i} - 9} \right)^{0.7} \quad (3.45)$$

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιήθηκε κατά τη διαδικασία των δοκιμών για την εκτίμηση των πλημμυρικών παροχών μετά την πυρκαγιά κατά την ημικατανεμημένη προσέγγιση, όπως αναλύεται στο υποκεφάλαιο 6.7.

## 3.6 Το συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα

### 3.6.1 Γενικά

Ως Μοναδιαίο Υδρογράφημα μιας βροχής διάρκειας περισσεύματος  $t_r$  ομοιόμορφα κατανεμημένης σε μια λεκάνη απορροής ονομάζεται το αντίστοιχο υδρογράφημα της άμεσης απορροής που προήλθε από περίσσειμα βροχής  $h_r = 1 \text{ cm}$ . Το Μοναδιαίο Υδρογράφημα είναι ουσιαστικά ένα μοντέλο που περικλείει όλα τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και αναφέρεται στην συγκεκριμένη διάρκεια περισσεύματος βροχής. Για κάθε δηλαδή διάρκεια περισσεύματος υπάρχει και ένα διαφορετικό μοναδιαίο υδρογράφημα το οποίο αποτελεί τη βάση (τη μονάδα) για τον υπολογισμό του υδρογραφήματος άμεσης απορροής από οποιοδήποτε ύψος περισσεύματος της ίδιας διάρκειας. Αυτός είναι και ο λόγος που ονομάζεται μοναδιαίο.



Η χρησιμότητα του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι μεγάλη γιατί, όπως θα αναπτυχθεί παρακάτω, αυτό μπορεί, κάτω από ορισμένες παραδοχές, να μετασχηματίσει οποιοδήποτε περίσσειμα ραγδαίας βροχής διαφορετικής έστω διάρκειας σε υδρογράφημα άμεσης απορροής. Οι αρχές στις οποίες στηρίζεται η μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι οι ακόλουθες:

*Αρχή της αναλογίας:* Σύμφωνα με την αρχή αυτή, δύο βροχές με περίσσειμα βροχόπτωσης της ίδιας διάρκειας αλλά με διαφορετικές εντάσεις περισεύματος βροχόπτωσης δημιουργούν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με την ίδια χρονική βάση, αλλά με τεταγμένες σε κάθε χρονική στιγμή που έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με το λόγο των εντάσεων. Δηλαδή, για εντάσεις με λόγο  $k$  μεταξύ τους αλλά της ίδιας διάρκειας προκύπτουν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με τεταγμένες που έχουν λόγο  $k$  και την ίδια χρονική βάση, ίση με  $T$ .

*Αρχή της επαλληλίας:* Σύμφωνα με την αρχή αυτή, το συνολικό υδρογράφημα άμεσης απορροής που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των υδρογραφημάτων άμεσης απορροής των επιμέρους βροχοπτώσεων.

Οι παραπάνω αρχές πηγάζουν ουσιαστικά από τις ακόλουθες παραδοχές που αποτελούν και προϋποθέσεις για τη χρήση του μοναδιαίου υδρογραφήματος:

1. Η κατανομή του περισεύματος της βροχής στο χώρο και στο χρόνο είναι η ίδια για βροχές με την ίδια διάρκεια.
2. Η ένταση της βροχής είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του γεγονότος της βροχής.
3. Δύο ραγδαίες βροχές της ίδιας διάρκειας αλλά διαφορετικού ύψους περισεύματος βροχής δημιουργούν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με τεταγμένες ανάλογες των υψών περισεύματος βροχής.
4. Από δυο ραγδαίες βροχές με το ίδιο ύψος περισεύματος βροχής και την ίδια διάρκεια που συμβαίνουν σε διαφορετικούς χρόνους προκύπτουν εντελώς όμοια υδρογραφήματα άμεσης απορροής.
5. Για δεδομένη λεκάνη απορροής, το σχήμα του μοναδιαίου υδρογραφήματος δεδομένης διάρκειας βροχής αντιπροσωπεύει τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης. (Τσακίρης, 1995)

Το μοναδιαίο υδρογράφημα που αναπτύσσεται από δεδομένα παροχής και βροχόπτωσης σε μια λεκάνη απορροής μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για αυτή τη λεκάνη και για το σημείο του υδατορεύματος όπου έχουν ληφθεί τα δεδομένα παροχής. Τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα χρησιμοποιούνται για να ληφθούν μοναδιαία υδρογραφήματα για άλλες τοποθεσίες του υδατορεύματος στην ίδια λεκάνη ή για γειτονικές λεκάνες παρόμοιων χαρακτηριστικών ή για λεκάνες χωρίς μετρήσεις απορροής. Υπάρχουν τρεις τύποι συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων:

1. Οι τύποι που συνδέουν χαρακτηριστικά υδρογραφημάτων (παροχές αιχμής, χρόνος βασικής απορροής κλπ) με χαρακτηριστικά της λεκάνης όπως το συνθετικό υδρογράφημα κατά Snyder.
2. Οι τύποι που βασίζονται σε μοντέλα αποθήκευσης, όπως το συνθετικό υδρογράφημα κατά Clark.
3. Οι τύποι που βασίζονται σε ένα αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα, όπως το αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα της Soil Conservation Service (SCS).

Παρακάτω περιγράφεται η μέθοδος SCS, η οποία είναι και αυτή που επιλέχθηκε για την παραγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος της παρούσας εργασίας. Η μέθοδος αυτή υπερέχει της μεθόδου Snyder καθώς χρησιμοποιεί μόνο στοιχεία της λεκάνης που έχουν προσδιοριστεί με ακρίβεια από προηγούμενη επεξεργασία.

### 3.6.2 Το αδιάστατο Μοναδιαίο Υδρογράφημα της υπηρεσίας SCS

Το αδιάστατο υδρογράφημα της SCS είναι ένα συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα στο οποίο η παροχή εκφράζεται από τον λόγο της παροχής  $Q$  προς την παροχή αιχμής  $Q_p$ , ως συνάρτηση του λόγου του χρόνου  $t$  προς το χρόνο ανόδου του μοναδιαίου υδρογραφήματος  $T_p$ . Εάν δίνονται η παροχή αιχμής και ο χρόνος υστέρησης για τη διάρκεια του περισσεύματος βροχής, το μοναδιαίο υδρογράφημα μπορεί να υπολογιστεί από το συνθετικό αδιάστατο υδρογράφημα του σχήματος 3.4 καθώς, τότε, οι τιμές των  $Q_p$  και  $T_p$  μπορούν να υπολογιστούν.

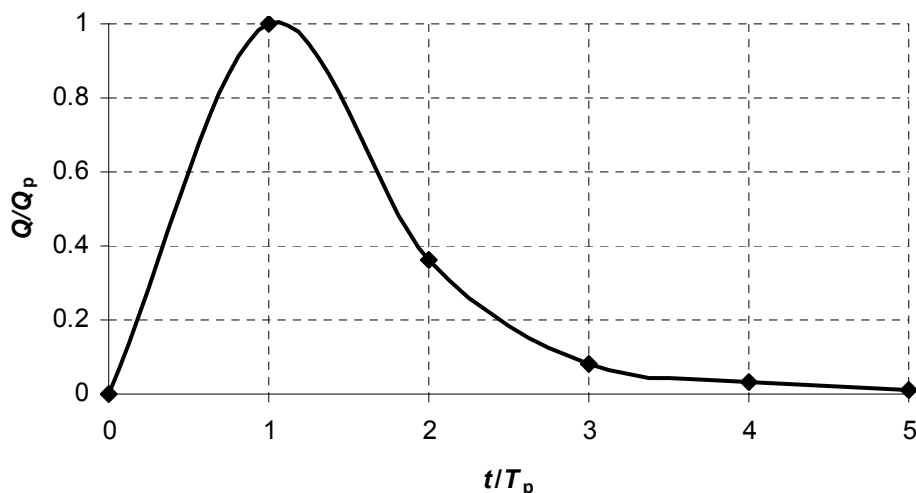
Από μια επισκόπηση ενός μεγάλου αριθμού μοναδιαίων υδρογραφημάτων, η Υπηρεσία Soil Conservation Service προτείνει ο χρόνος καθόδου να υπολογίζεται ως  $1.76T_p$ . Μιας και το εμβαδόν κάτω από το μοναδιαίο υδρογράφημα πρέπει να είναι ίσο με την άμεση απορροή ενός cm, μπορεί να δειχθεί ότι

$$Q_p = \frac{C_u A}{T_p} \quad (3.46)$$

όπου ο συντελεστής  $C_u = 2.08$  και  $A$  είναι το εμβαδόν της λεκάνης απορροής σε  $\text{km}^2$ .

Επιπλέον, μια μελέτη μοναδιαίων υδρογραφημάτων πολλών μεγάλων και μικρών λεκανών στην ύπαιθρο έδειξε ότι ο χρόνος υστέρησης της λεκάνης είναι  $t_p = 0.6t_c$ , όπου  $t_c$  είναι ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης. Ο χρόνος ανόδου  $T_p$  μπορεί να εκφραστεί μέσω των όρων του χρόνου υστέρησης  $t_p$  και τη διάρκεια του περισσεύματος βροχόπτωσης  $t_r$ .

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p \quad (3.47)$$



Σχήμα 3.4: Το συνθετικό αδιάστατο υδρογράφημα της Soil Conservation Service

Το αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα που παριστάνεται στο σχήμα 3.4. μπορεί να μετατραπεί στις απαιτούμενες διαστάσεις πολλαπλασιάζοντας τις τιμές στον οριζόντιο άξονα με  $T_p$  και τις τιμές στον κάθετο άξονα με  $Q_p$ . Από το υδρογράφημα που κατασκευάζεται με αυτό τον τρόπο καθίσταται εφικτό με ψηφιοποίηση ανά χρονικά διαστήματα ίσα με διάρκειας περιστεύματος  $t_r$  να ληφθούν οι τιμές του μοναδιαίου υδρογραφήματος συναρτήσε του χρόνου.

### 3.6.3 Προσδιορισμός του υδρογραφήματος άμεσης απορροής

Το υδρογράφημα άμεσης απορροής για σύνθετες βροχές και με γνωστό το μοναδιαίο υδρογράφημα προκύπτει από τη σχέση:

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq M} h_{r,m} U_{n-m+1} \quad (3.48)$$

που είναι η διακριτή εξίσωση συνέλιξης για ένα γραμμικό σύστημα. Σχετικά με τους όρους της παραπάνω εξίσωσης,  $h_{r,m}$  είναι το ύψος του περίσσειματος βροχής και  $U_m$  οι τιμές των τεταγμένων του μοναδιαίου υδρογραφήματος,  $m = 1, 2, 3, \dots, M$ ,  $n$  τα χρονικά διαστήματα με  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Η σχέση  $n \leq M$  σαν το πάνω όριο του αθροίσματος δείχνει ότι οι όροι προστίθενται για  $m = 1, 2, \dots, n$  για  $n \leq M$ , αλλά για  $n > M$ , το άθροισμα περιορίζεται για  $m = 1, 2, \dots, M$ .

Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι έχουμε 3 περιστεύματα βροχής  $h_{r,1}, h_{r,2}, h_{r,3}$ . Για το πρώτο χρονικό διάστημα ( $n = 1$ ), υπάρχει μόνο ένας όρος για συνέλιξη, αυτός για  $m = 1$ :

$$Q_1 = h_{r,1} U_{1-1+1} = h_{r,1} U_1$$

Για  $n = 2$  υπάρχουν 2 όροι και  $m = 1, 2$ :

$$Q_2 = h_{r,1} U_{2-1+1} + h_{r,2} U_{2-2+1} = h_{r,1} U_2 + h_{r,2} U_1$$

Για  $n = 3$  υπάρχουν 3 όροι:

$$Q_3 = h_{r,1} U_{3-1+1} + h_{r,2} U_{3-2+1} + h_{r,3} U_{3-3+1} = h_{r,1} U_3 + h_{r,2} U_2 + h_{r,3} U_1$$

Για  $n = 4, 5, \dots$  συνεχίζουν να υπάρχουν 3 όροι:

$$Q_n = h_{r,1} U_n + h_{r,2} U_{n-1} + h_{r,3} U_{n-2}$$

Στο παράδειγμα που περιγράφηκε υπάρχουν 3 περιστεύματα βροχόπτωσης και 6 μη μηδενικοί όροι του μοναδιαίου υδρογραφήματος, συνεπώς υπάρχουν  $3 + 6 - 1 = 8$  μη μηδενικοί όροι (τεταγμένες) στο εξαγόμενο υδρογράφημα. Οι τιμές για τις 3 τελικές περιόδους είναι

$$Q_6 = h_{r,1} U_6 + h_{r,2} U_5 + h_{r,3} U_4$$

$$Q_7 = h_{r,2} U_6 + h_{r,3} U_5$$

$$Q_8 = h_{r,3} U_6$$

Τα  $Q_n$  και  $h_{r,m}$  εκφράζονται σε διαφορετικές διαστάσεις, και το  $U$  έχει διαστάσεις που είναι ο λόγος των διαστάσεων του  $Q_n$  και  $h_{r,m}$  έτσι ώστε η σχέση (3.48) να είναι διαστατικά συνεπής.

### 3.6.4 Μέθοδοι μέτρησης παροχής

Η παροχή μπορεί να μετρηθεί με διάφορες μεθόδους οι οποίες επιγραμματικά είναι:

- Μέτρηση με παρεμβολή μετρητών παροχής

- Μέτρηση πεδίου ταχυτήτων
- Μέτρηση με τη μέθοδο διαλυμάτων
- Εκτίμηση με πλωτήρες
- Εκτίμηση με υδραυλικές σχέσεις ροής

Σημασία θα δώσουμε στην τελευταία μέθοδο μέτρησης παροχής, με υδραυλικές σχέσεις ροής, διότι σε επόμενο κεφάλαιο βάσει αυτών των σχέσεων μετριέται η παροχή στην έξοδο του υδατορεύματος μελέτης. Η χρήση των υδραυλικών μεθόδων για τον υπολογισμό της παροχής, ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπως η δική μας που οι άλλες μέθοδοι, λόγω έλλειψης τεχνικών μέσων, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Έτσι, όταν δεν υπάρχουν άμεσες μετρήσεις και ιδίως στην περίπτωση που απαιτείται να εκτιμηθεί η παροχή αιχμής έντονων πλημμυρικών επεισοδίων (π.χ. από ίχνη της ανώτατης στάθμης των υδάτων στις όχθες της κοίτης), η παροχή  $Q$  μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά με τη χρήση σχέσεων της υδραυλικής που συνδέουν την παροχή με τις απώλειες φορτίου. Συνήθως χρησιμοποιείται η εξίσωση του Manning η οποία γράφεται:

$$Q = \frac{1}{n} A_w R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}$$

(3.49) όπου  $A_w$  το εμβαδόν υγρής διατομής ( $m^2$ ),  $R$  η υδραυλική ακτίνα ( $m$ ),  $S_f$  η κλίση της γραμμής ενέργειας και της κοίτης στην περιοχή μετρήσεων και  $n$  ο συντελεστής τραχύτητας της κοίτης κατά Manning. Η εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας  $n$  γίνεται από κατάλληλους πίνακες συναρτήσεων των χαρακτηριστικών του υδατορεύματος και του υλικού της κοίτης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.4.

Μετά από γεγονότα πλημμυρών, οι παρατηρητές προσδιορίζουν κατά προσέγγιση το εμβαδόν της υγρής διατομής για την αιχμή της πλημμύρας,  $A_w$ , και την αντίστοιχη στάθμη του νερού,  $y$ , από τα ίχνη που αφήνουν τα νερά στα πλευρικά τοιχώματα της κοίτης. Από τη διατομή  $A_w$  και τη βρεχόμενη περίμετρο  $P$  που της αντιστοιχεί, υπολογίζεται η υδραυλική ακτίνα,  $R = A_w / P$ . Οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα είναι της τραπεζοειδούς διατομής δηλαδή

$$A_w = (b + zy)y \quad (3.50)$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + z^2} \quad (3.51)$$

όπου  $b$  = πλάτος πυθμένα ( $m$ ),  $y$  = βάθος ροής ( $m$ ) και  $z$  = κλίση πρανών.

Πρανή επενδεδυμένα από μπετόν	0.013
Λεία χωμάτινα πρανή	0.02
Ευθύ και βαθύ, μη προσχωσιγενές φυσικό υδατόρευμα	0.03
Φυσικό υδατόρευμα με μαιάνδρους	0.035
Πρανή με βλάστηση	0.04
Ορεινά υδατορεύματα με βραχώδεις κοίτες	0.05

Πρέπει να σημειωθεί πάντως ότι η μέθοδος μέτρησης παροχής κατά Manning ως εμπειρική εξίσωση δεν μπορεί, στη γενική περίπτωση, να χρησιμοποιηθεί ιδιαίτερα αξιόπιστα, μιας και οι συνθήκες ροής κατά τη διάρκεια των υψηλών παροχών είναι συνθήκες μη μόνιμης ροής.

### 3.7 Εναλλακτικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης

Η τυπική χωρική κλίμακα της υδρολογίας (και κυρίως της τεχνικής υδρολογίας) είναι η κλίμακα της λεκάνης απορροής (ή υδρολογικής λεκάνης). Η λεκάνη απορροής στη συγκεκριμένη διατομή ενός υδατορεύματος (συνήθως φυσικού, όπως ποταμού ή χειμάρρου, αλλά και τεχνητού, όπως συλλεκτήρα ομβρίων ή αντιπλημμυρικής τάφρου) είναι εκείνη και μόνο η γεωγραφική περιοχή που τα νερά της συνεισφέρουν στην απορροή που περνά από τη δεδομένη διατομή του υδατορεύματος. Το όριο της λεκάνης απορροής ορίζεται από την γεωμορφολογία της περιοχής (υψομετρικές καμπύλες), το ποτάμιο ή, όπως αλλιώς λέγεται, υδρογραφικό δίκτυο και ονομάζεται υδροκρίτης. Είναι προφανές ότι δεν υπάρχει μια μοναδική λεκάνη απορροής για ένα υδατόρευμα, αλλά για κάθε σημείο του ορίζεται και η αντίστοιχη λεκάνη απορροής.

Από τον παραπάνω ορισμό προκύπτει σαφώς ότι η έκταση της λεκάνης απορροής δεν ορίζει μια σταθερή, ούτε ως τάξη μεγέθους, χωρική κλίμακα, αφού κυμαίνεται από π.χ. από 1 km<sup>2</sup> ή και λιγότερο (για ένα μικρό υδατόρευμα) μέχρι 7.16 × 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> (για τον Αμαζόνιο στην εκβολή του). Ωστόσο, η απομόνωση μιας λεκάνης απορροής ως περιοχής μελέτης των υδρολογικών διεργασιών έχει προφανή πλεονεκτήματα, δεδομένου ότι η βασική υδρολογική διεργασία της απορροής είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητη από τις υδρολογικές διεργασίες σε άλλες γειτονικές λεκάνες, ενώ συχνά (για όχι εξαιρετικά μεγάλα μεγέθη λεκανών υπάρχει και σχετική κλιματική ομοιογένεια στο εσωτερικό της λεκάνης απορροής).

Για μεγάλα μεγέθη λεκανών, ή για προβλήματα στα οποία ενδιαφέρει η λεπτομέρεια στη γεωγραφική μεταβλητότητα των υδρολογικών διεργασιών, η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε επί μέρους τμήματα. Αυτό γίνεται κατά κανόνα με τη χάραξη υπολεκανών, δηλαδή λεκανών απορροής σε χαρακτηριστικές διατομές του υδατορεύματος ανάντη της διατομής αναφοράς. Μπορεί ακόμη να γίνεται διαχωρισμός της λεκάνης σε κύτταρα (cells) κανονικού γεωμετρικού σχήματος, συνήθως τετραγωνικού, τα οποία προκύπτουν από την εφαρμογή ενός καννάβου (grid) ή πλέγματος (lattice) δεδομένης ισοδιάστασης. Οι τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις μιας λεκάνης, είτε ως μιας αδιαμέριστης ολότητας, είτε ως ενός αθροίσματος υπολεκανών, είτε ως μιας διαμερισμένης σε πολλά και σχετικά μικρά κύτταρα, είναι γνωστές στην υδρολογική βιβλιογραφία ως αδιαμέριστη (lumped), ημικατανεμημένη (semi-distributed) και κατανεμημένη (distributed) προσέγγιση, αντίστοιχα.

Στη μελέτη μας αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί εκτός από την αδρομερή προσέγγιση που η λεκάνη θεωρείται ως μια ολότητα με ομοιογενή χαρακτηριστικά και μια ημικατανεμημένη προσέγγιση, όπου η λεκάνη θα διασπαστεί σε δύο τμήματα, από τα οποία το ένα θα αποτελεί την καμένη λεκάνη και το άλλο την μη καμένη. Σε αυτή την περίπτωση βέβαια, υπάρχει η ανάγκη για διόδευση της πλημμυρικής παροχής διαμέσου του υδατορεύματος από την υπολεκάνη των καμένων στη λεκάνη των μη καμένων εκτάσεων. Περισσότερα για τη διόδευση στο υποκεφάλαιο που ακολουθεί

Χωρική ή γεωγραφική μεταβλητότητα παρουσιάζει και η βροχόπτωση. Αυτή η μεταβλητότητα επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, πολλοί από τους οποίους συνδέονται με το χαοτικό χαρακτήρα της εξέλιξης των ατμοσφαιρικών συστημάτων που τις παράγουν. Είναι παραδεκτό πάντως πως τους σημαντικότερους παράγοντες αποτελούν η γεινίαση με τη θάλασσα και η ορογραφία. Με τις μεθόδους άμεσης ολοκλήρωσης καθίσταται δυνατό να εκτιμηθεί η χωρικά μέση (ή επιφανειακή) βροχόπτωση μιας λεκάνης, ως γραμμικός συνδυασμός των σημειακών βροχοπτώσεων στα σημεία των βροχομετρικών σταθμών που

βρίσκονται μέσα ή πολύ κοντά στη λεκάνη. Επίσης με τις μεθόδους προσαρμογής επιφάνειας πριν την επιφανειακή ολοκλήρωση γίνεται αναπαράσταση της γεωγραφικής μεταβολής της βροχόπτωσης και ορίζεται έτσι η τιμή του ύψους βροχής σε οποιοδήποτε σημείο της περιοχής που ενδιαφέρει (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

### **3.8 Διόδευση πλημμύρας δια μέσου υδατορεύματος**

#### **3.8.1 Γενικά**

Διόδευση πλημμύρας ονομάζεται η τεχνική που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της χωροχρονικής εξέλιξης μιας πλημμύρας μέσω ενός επιφανειακού υδροφορέα (π.χ., υδατόρευμα, ταμιευτήρας, τμήμα υδρογραφικού δικτύου) (Τσακίρης, 1995). Γενικότερα, η διόδευση αναφέρεται στην επίδραση των χαρακτηριστικών ενός υδρογραφικού συστήματος στο σχήμα και την χρονική εξέλιξη μιας πλημμύρας. Επίσης, διόδευση πλημμύρας ονομάζεται αυτή καθαυτή η διέλευση μιας πλημμύρας μέσω ενός επιφανειακού υδροφορέα.

Η τεχνική της διόδευσης χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας. Η διαδικασία σχεδιασμού που συνήθως ακολουθείται είναι με δοκιμές. Δηλαδή δίνονται αρχικά μεγέθη σχεδιασμού με αποτέλεσμα τα χαρακτηριστικά του επιφανειακού υδροφορέα (π.χ., ταμιευτήρας) να είναι γνωστά. Ακολουθεί η διόδευση της πλημμύρας μελέτης (της πλημμύρας με την κατάλληλη περίοδο επαναφοράς για το συγκεκριμένο έργο) και τέλος ελέγχονται τα χαρακτηριστικά της εκροής σε σχέση με την ικανότητα του υδατορεύματος στην κατάντη θέση που μας ενδιαφέρει. Στην περίπτωση που η μέγιστη παροχή εκροής (αιχμή του υδρογραφήματος εκροής) είναι μεγαλύτερη της διοχετευτικής ικανότητας του ρεύματος στη θέση αυτή, δοκιμάζονται άλλα χαρακτηριστικά του υπό σχεδιασμό επιφανειακού υδροφορέα.

Η τεχνική της διόδευσης χρησιμοποιείται και στην πρόβλεψη και τον έλεγχο της πλημμύρας σε πραγματικό χρόνο (real time) και φθάνει και μέχρι τα συστήματα προειδοποίησης για την μείωση των δυσμενών επιπτώσεων από την πλημμύρα. Στην περίπτωση του πραγματικού χρόνου προβλέπουμε την εξέλιξη της πλημμύρας εκροής στη θέση που μας ενδιαφέρει για τις αμέσως επόμενες ώρες.

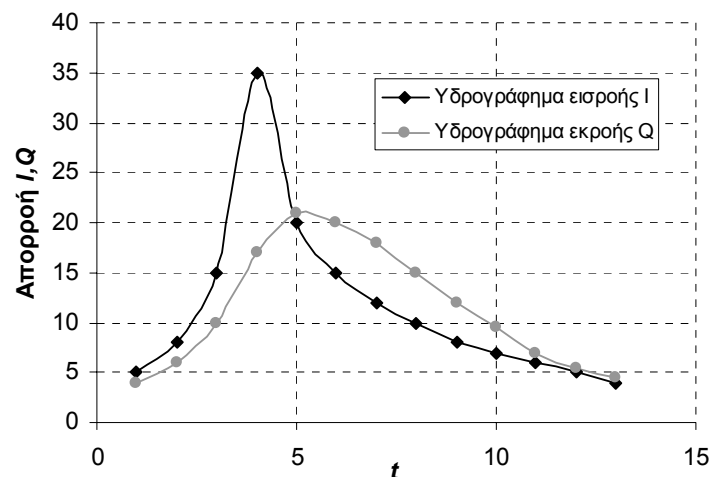
Επίσης η τεχνική της διόδευσης αποτελεί σημαντικό τμήμα των μοντέλων μετασχηματισμού των βροχοπτώσεων σε απορροές στην περίπτωση έλλειψης στοιχείων απορροής. Τέλος, χρησιμοποιείται για τη μεταφορά πληροφοριών απορροής από τη θέση ενός υδρομετρικού σταθμού στη θέση που μας ενδιαφέρει.

Με την διέλευση μιας πλημμύρας διαμέσου ενός επιφανειακού υδροφορέα (ενός τμήματος ποταμού ή ενός ταμιευτήρα) παρατηρείται μια μείωση της αιχμής της πλημμύρας που συνοδεύεται από μια καθυστέρηση. Αν για παράδειγμα διοδευθεί μια πλημμύρα μέσω ενός τμήματος φυσικού υδατορεύματος με υδρογράφημα εισροής που φαίνεται στο Σχ. 3.5 στο υδρογράφημα εκροής παρατηρείται μια μείωση της αιχμής και μια χρονική επιβράδυνση εμφάνισης της πλημμύρας. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι στα φυσικά υδατορεύματα υπάρχει αποθηκευτικότητα που δημιουργεί αυτή την πτώση στην αιχμή του υδρογραφήματος εκροής.

Στη γενική περίπτωση διόδευσης πλημμύρας μέσω ενός υδροφορέα (τμήμα φυσικού υδατορεύματος ή ταμιευτήρας), και υπό την προϋπόθεση ότι οι απώλειες νερού στον υδροφορέα κατά το χρονικό διάστημα της διόδευσης είναι αμελητέες, τα εμβαδά των

επιφανειών των υδρογραφημάτων εισροής (εισόδου) και εκροής (εξόδου) είναι ίσα. Η διαφορά των τεταγμένων των δύο υδρογραφημάτων κάθε χρονική στιγμή αντιπροσωπεύει την ανά μονάδα χρόνου αποθήκευση νερού στον υδροφορέα.

Η σύνθεση του υδρογραφήματος εισόδου με τη διόδευση ώστε να παραχθεί το υδρογράφημα εξόδου δεν είναι μια απλή διαδικασία και συνηθέστερα χρησιμοποιούνται προγράμματα Η/Υ για το σκοπό αυτό, όπως το HEC-HMS, που αναλύεται παρακάτω και χρησιμοποιήθηκε και στη δική μας εφαρμογή.



Σχήμα 3.5: Τυπικός μετασχηματισμός του υδρογραφήματος εισροής σε υδρογράφημα εκροής λόγω της διόδευσης

Δύο είναι οι χρησιμοποιούμενες μεθοδολογίες διόδευσης:

- η Υδρολογική, και
- η Υδραυλική.

Η υδρολογική μεθοδολογία διόδευσης βασίζει την πρόβλεψη της εξέλιξης μιας πλημμύρας στην εξίσωση της συνέχειας και σε μια συνάρτηση της χωρητικότητας του συστήματος. Αν ο φορέας διαμέσου του οποίου γίνεται η διόδευση είναι ταμιευτήρας απαιτείται μια συνάρτηση που συνδέει την παροχή εκροής με την αποθήκευση του φορέα.

Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν δεδομένα της πλημμύρας εισόδου και προβλέπουν τα χαρακτηριστικά της πλημμύρας εξόδου. Οι μέθοδοι αυτές δεν δίνουν πληροφορίες για την πλήρη χωροχρονική εξέλιξη της πλημμύρας και δεν απαιτούν γνώσεις των χαρακτηριστικών του φορέα (κλίσεις, διατομές κ.λ.π.).

Στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται το υδρογράφημα πλημμύρας σε μια διατομή ενός ποταμού όταν είναι γνωστό το υδρογράφημα σε μία διατομή ανάντη. Σε αντίθεση με τη διόδευση μέσω ταμιευτήρα, η σχέση αποθήκευσης εκροής δεν είναι μονοσήμαντη και η μέγιστη εκροή δεν συμπίπτει εν γένει με τη μέγιστη αποθήκευση.

Για τον υπολογισμό της διόδευσης μέσω τμήματος υδατορεύματος η τυπική μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η μέθοδος Muskingum. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η σχέση αποθήκευσης – εισροής - εκροής εκφράζεται με μια γραμμική σχέση της μορφής

$$S_t = K[xI + (1 - x)Q] \quad (3.52)$$

όπου  $x$  είναι το βάρος συμμετοχής της εισροής,  $1 - x$  το βάρος συμμετοχής της εκροής στην

αποθήκευση του τμήματος του ποταμού, και  $K$  είναι ο μέσος χρόνος διαδρομής της αιχμής της πλημμύρας δια μέσου του τμήματος υδατορεύματος (travelling time).

Με διακριτοποίηση των μεταβλητών στο χρόνο προκύπτει

$$S_{r,i+1} - S_{r,i} = K[0.5x(I_{i+1} + I_i) + 0.5(1-x)(Q_{i+1} + Q_i)] \quad (3.53)$$

και τελικά

$$Q_{i+1} = C_0 I_{i+1} + C_1 I_i + C_2 Q_i \quad (3.54)$$

όπου

$$C_0 = \frac{-Kx + 0.5\Delta t}{K(1-x) + 0.5\Delta t}, \quad C_1 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{K(1-x) + 0.5\Delta t}, \quad C_2 = \frac{(1-x)k - 0.5\Delta t}{k(1-x) + 0.5\Delta t}$$

Η διαδικασία υπολογισμών στηρίζεται στην Εξίσωση 3.54. Με βάση την εξίσωση αυτή, και με γνωστές τις αρχικές συνθήκες, δηλαδή την παροχή ανάντη και κατόντη κατά τη χρονική στιγμή  $i$ , υπολογίζεται κάθε φορά η επόμενη τιμή της παροχής εκροής  $Q_{i+1}$ . Οι τιμές των παραμέτρων  $x$  και  $K$  θεωρούνται δεδομένες. Για τον υπολογισμό των  $x$  και  $K$  χρησιμοποιούνται υδρογραφήματα εισροής και εκροής του υπό μελέτη τμήματος του ποταμού (<http://utopia.duth.gr>).

Η υδραυλική μεθοδολογία διόδευσης βασίζει τη μαθηματική αναπαράσταση της εξέλιξης της πλημμύρας στην χρησιμοποίηση των εξισώσεων ασταθούς ροής σε ανοικτούς αγωγούς (εξισώσεις Saint Venant). Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας δίνουν όλες τις πληροφορίες κατά τη διέλευση μιας πλημμύρας μέσω ενός υδρογραφικού δικτύου, χρησιμοποιούν όμως στοιχεία που σπάνια είναι γνωστά και οι παραδοχές που γίνονται για την απλοποίηση και την επίλυση των εξισώσεων ανατρέπουν σε κάποιο βαθμό την ακρίβεια και την αξιοπιστία των μεθόδων αυτών.

Οι κύριες μέθοδοι υδραυλικής διόδευσης είναι η μέθοδος κινηματικού κύματος, η μέθοδος του κύματος διάχυσης και η μέθοδος Muskingum-Cunge, η οποία και θα χρησιμοποιηθεί στη μελέτη μας. Αυτή περιγράφεται παρακάτω.

### 3.8.2 Η μέθοδος Muskingum-Cunge

Με τη μέθοδο αυτή υπολογίζεται η διάχυση της απορροής μέσω κατάλληλης θεώρησης της μεταβολής της παραμέτρου  $x$  της μεθόδου Muskingum. Ο Cunge (<http://utopia.duth.gr>) συμπέρανε ότι η μέθοδος Muskingum είναι μια γραμμική επίλυση της εξίσωσης κινηματικού κύματος, όπου η μείωση της αιχμής του πλημμυρικού κύματος οφείλεται στην αριθμητική διάχυση του αριθμητικού σχήματος. Για την επιβεβαίωση αυτής της παρατήρησης η εξίσωση κινηματικού κύματος διακριτοποιείται σε επίπεδο  $x - t$  με άνισα κατανομημένες χρονικές παραγώγους μέσω του συντελεστού βάρους  $x$  και κεντρικές χωρικές διαφορές, ως εξής

$$\frac{x(Q_i^{k+1} - Q_i^k) + (1-x)(Q_{i+1}^{k+1} - Q_{i+1}^k)}{\Delta t} + c \frac{(Q_{i+1}^k - Q_i^k) + (Q_{i+1}^{k+1} - Q_i^k)}{2\Delta x} = 0 \quad (3.55)$$

Η εξίσωση 3.55 δίνει

$$Q_{i+1}^{k+1} = C_0 Q_i^{k+1} + C_1 Q_i^k + C_2 Q_{i+1}^k \quad (3.56)$$

όπου  $i$  = χωρικό βήμα, και  $k$  = χρονικό βήμα.



$$C_0 = \frac{C\lambda - 2x}{2(1-x) + C\lambda}, C_1 = \frac{C\lambda - 2x}{2(1-x) + C\lambda}, C_2 = \frac{2(1-x) - C\lambda}{2(1-x) + C\lambda}$$

Ισχύει ότι  $K = \frac{\Delta x}{C}$  και  $\lambda = \frac{\Delta t}{\Delta x}$

Η ποσότητα  $C = \frac{5}{3} \frac{Q}{A_w} \frac{\Delta t}{\Delta x}$  λέγεται αριθμός Courant.

Ο αριθμός C παίζει σημαντικό ρόλο στην αριθμητική επίλυση των υπερβολικών διαφορικών εξισώσεων. Η εξίσωση 3.55 επίσης είναι ταυτόσημη με την 3.54.

Όταν  $x = 0.5$  και  $C = 1$  η Εξ. 3.54 είναι 3ης τάξεως ακριβείας και αντιστοιχεί στην αναλυτική λύση της εξίσωσης του κινηματικού κύματος.

Για  $x = 0.5$  και  $C \neq 1$  είναι 2ης τάξεως και παρουσιάζει μόνο αριθμητική διασπορά.

Για  $x \leq 0.5$  και  $C \neq 1$  είναι 1ης τάξεως και παρουσιάζει διασπορά και διάχυση.

Για  $x \leq 0.5$  και  $C = 1$  είναι 1ης τάξεως και παρουσιάζει αριθμητική διάχυση.

Η παράμετρος  $x$  υπολογίζεται βάσει φυσικών χαρακτηριστικών του τμήματος ( $L = \Delta x$ ,  $S_0$ ,  $c$ ,  $q_0$ ) από τη σχέση

$$x = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{q_0}{S_0 c \Delta x} \right) \quad (3.57)$$

όπου  $S_0$  = κλίση πυθμένα,  $L$  = μήκος υδατορεύματος,  $c$  = ταχύτητα διάδοσης κύματος,  $q_0$  = παροχή ανά μονάδα μήκους από το υδρογράφημα εισροής.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου Muskingum-Cunge σε σχέση με τη μέθοδο Muskingum είναι ότι οι παράμετροι  $x$  και  $K$  καθορίζονται από τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του αγωγού ενώ στη μέθοδο Muskingum από προηγούμενες μετρήσεις απορροών. Επίσης η μέθοδος Muskingum-Cunge εξετάζει τη ροή σε επίπεδο κόμβου ενός πλέγματος, αρκεί φυσικά να υπάρχει η ανάλογη πληροφορία για τα υδραυλικά στοιχεία του αγωγού, ενώ η μέθοδος Muskingum μελετά τμήματα αγωγών και οι παράμετροι αφορούν μέσες τιμές των τμημάτων αυτών.

Τελικά, η μέθοδος Muskingum – Cunge θεωρείται κατάλληλη για ασταθείς ροές σε φυσικά ρεύματα χωρίς σημαντική αποθήκευση. Στη μορφή που θα χρησιμοποιηθεί στη μελέτη, με τη βοήθεια του προγράμματος HEC-HMS, επιλέγεται μια μορφή διατομής (πρισματική, τραπεζοειδής, κυκλική), και εισάγονται παράμετροι όπως η τραχύτητα, η κλίση και το μήκος του υδατορεύματος. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να εκτιμηθούν από χάρτες, αν και στην περίπτωση της εργασίας τα περισσότερα μεγέθη υπολογίζονται ύστερα από επεξεργασία με ΓΣΠ.

### 3.9 Το λογισμικό HEC-HMS

Το λογισμικό HEC-HMS είναι ένα σύστημα υδρολογικής μοντελοποίησης που έχει αναπτυχθεί από το αμερικανικό σώμα μηχανικών του στρατού. Το πρόγραμμα προσομοιώνει τη βροχόπτωση, την απορροή και τις διαδικασίες διόδευσης φυσικές ή ελεγχόμενες. Το λογισμικό παρέχει τις εξής δυνατότητες: (Hydrologic Modelling System - Technical Manual, 2000):

1. Επιλογές εξειδίκευσης της βροχόπτωσης, που μπορούν να περιγράψουν ένα παρατηρηθέν, ένα ιστορικό γεγονός βροχόπτωσης, ή ένα υποθετικό γεγονός βροχόπτωσης βασισμένο στη συχνότητα εμφάνισης.
2. Μοντέλα εκτίμησης υδρολογικών απωλειών δεδομένης της βροχόπτωσης και των χαρακτηριστικών της λεκάνης.
3. Μοντέλα υπολογισμού άμεσης απορροής.
4. Υδρολογικά μοντέλα διόδευσης που μπορούν να υπολογίσουν την αποθήκευση και την ενέργεια του νερού καθώς αυτό κινείται διαμέσου του υδατορεύματος.
5. Μοντέλα που προσομοιώνουν φυσικές συνενώσεις κόμβων ή διακλαδώσεις του υδρογραφικού δικτύου.
6. Εργαλεία βαθμονόμησης μοντέλων.

Το πρόγραμμα δίνει επίσης τις δυνατότητες προσομοίωσης κατανεμημένων μοντέλων απορροής για χρήση με κατανεμημένα μοντέλα βροχόπτωσης, όπως τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα από μετεωρολογικό ραντάρ και επίσης ένα μοντέλο υπολογισμού εδαφικής υγρασίας που χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την απόκριση του υδατορεύματος σε ξηρές ή υγρές συνθήκες.

Χρησιμοποιώντας το παρόν λογισμικό στην μελέτη μας έγιναν δύο προσεγγίσεις. Μία αδρομερής κατά την οποία η λεκάνη εξετάστηκε σαν ολόκληρη και υπολογίστηκαν οι παροχές της πλημμύρας στην έξοδο και μια ημικατανεμημένη κατά την οποία πραγματοποιήθηκε διόδευση της πλημμύρας από την υπολεκάνη των καμένων στην μη καμένη υπολεκάνη και υπολογίστηκε η συνολική πλημμυρική παροχή στην τελική έξοδο. Το πρόγραμμα δίνει τις δυνατότητες κατασκευής ενός μοντέλου βροχόπτωσης με το οποίο εισάγεται η βροχόπτωση σχεδιασμού και ενός μοντέλου λεκάνης, με το οποίο εισάγονται χαρακτηριστικά της λεκάνης, και παράμετροι στα αντίστοιχα μοντέλα (απωλειών, άμεσης απορροής και διόδευσης), ώστε η βροχόπτωση να μετατραπεί τελικώς σε πλημμυρική παροχή.

## 4 Το ρέμα Γιαννούλας (Αγ. Γεωργίου)

---

### 4.1 Γενικά

Ο χείμαρρος Γιαννούλας, με εμβαδόν συνολικής λεκάνης απορροής 110 km<sup>2</sup> (εμβαδόν ορεινής λεκάνης της μελέτης μας 57.6 km<sup>2</sup>), είναι ο δεύτερος σημαντικότερος χείμαρρος της περιοχής του Θριάσιου Πεδίου, μετά τον Σαρανατόταμο. 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](http://www.minenv.gr))

Η Πάρνηθα, με έκταση 300 000 στρεμμάτων (στην Αττική), είναι ο μεγαλύτερος βιότοπος της Αττικής. Έχει σημαντικότερο περιβαλλοντικό ρόλο, ειδικά στη σύνδεση αστικού και περιαστικού πρασίνου σε ολόκληρη την Αττική. (<http://floraattica.blogspot.com>). Χάρη στη διάταξη και το είδος των πετρωμάτων της (ασβεστολιθικά) έχει περισσότερες από 40 πηγές χωρίς τις κρήνες. 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](http://www.parnitha-np.gr))



Σχήμα 4.1: Φωτογραφία από τη θέση του ρέματος Γιαννούλας στην περιοχή κάτω από τη μονή Κλειστών

Το ρέμα της Γιαννούλας (μπορεί να το συναντήσουμε 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. Χειμώνα και άνοιξη έχει πολλούς μικρούς και μεγάλους καταρράκτες. Το καλοκαίρι ξεραίνεται. Στη φωτογραφία του Σχήματος 4.1 φαίνεται το ρέμα στην περιοχή κάτω από τη μονή Κλειστών και είναι φθινοπωρινή (πριν αρχίσουν οι βροχές).

Το ρέμα της Γιαννούλας στην αρχαιότητα ονομαζόταν φαράγγι του Κελαδώνα. 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 2002. ([www.focusmag.gr](http://www.focusmag.gr))

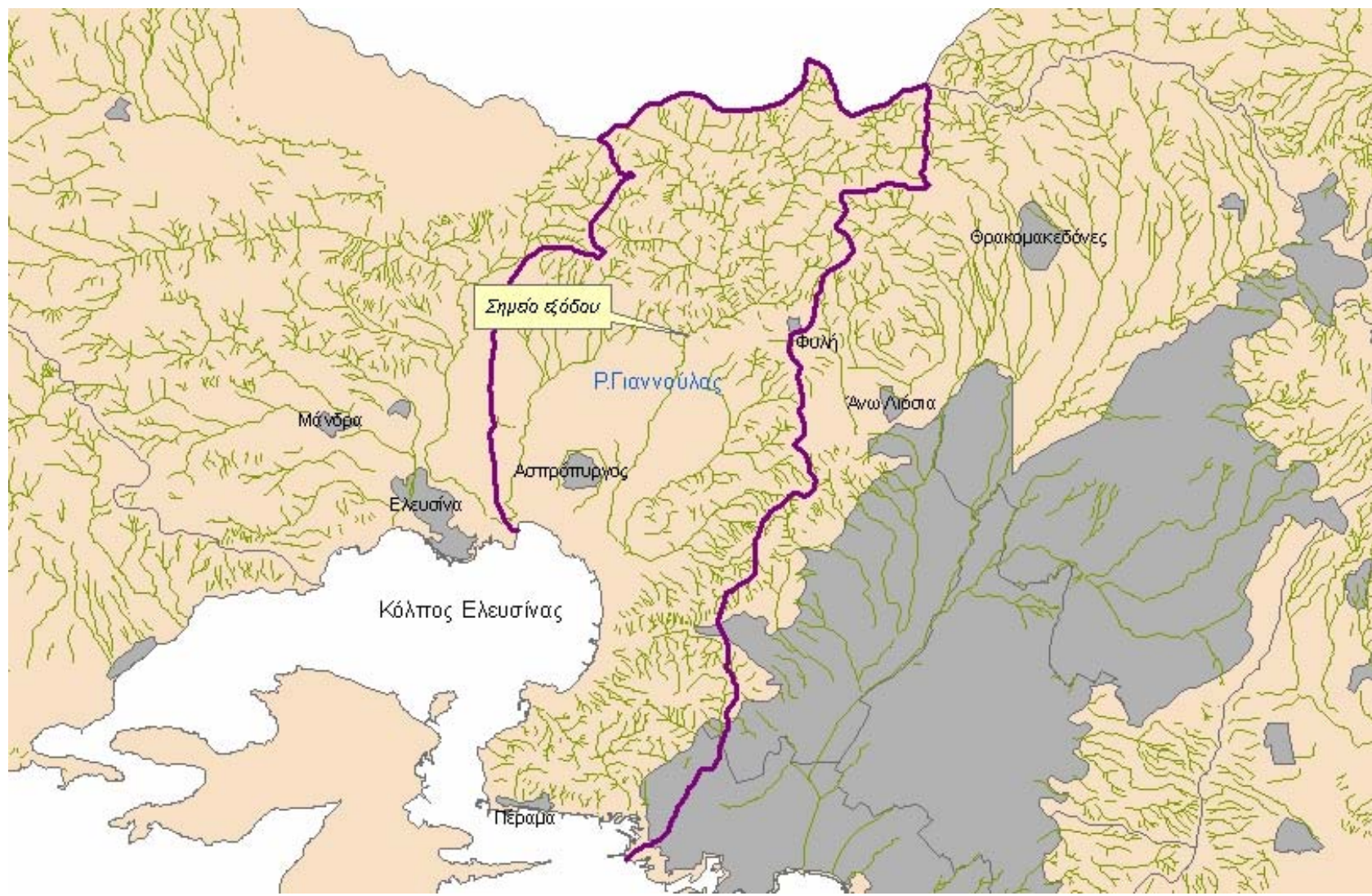
Από τη μελέτη του προγράμματος Corine που προμηθευθήκαμε σε μορφή ΓΣΠ από το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων και του δασικού χάρτη της περιοχής για τη λεκάνη απορροής του ρέματος (φύλλο χάρτη Αθήνα-Ελευσίς), διαπιστώθηκε ότι οι κύριες χρήσεις της λεκάνης είναι στα βόρεια της λεκάνης δασικές 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 της 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).

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 3.

Η ορεινή κοίτη του ρέματος θεωρείται αρκετά καλά διαμορφωμένη και, όπως ελέγχθη, 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 Σ.Γ. 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 Σ.Γ. 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](http://www.kathimerini.gr))



Σχήμα 4.2: Η συνολική λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλας (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης, μετά από επεξεργασία)

## 4.2 Αντιπλημμυρικά έργα πεδινής κοίτης

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 διόδος 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 διεύθετησης 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 διεύθετησης 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 διεύθετησης της κοίτης. Η διεύθετηση 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 Χαλυουργίας. Πραγματοποιήθηκαν επίσης έργα συμβολής του χειμάρρου Αγ. Γεωργίου και των ρεμάτων Μαύρης Ώρας και Διυλιστηρίων, καθώς και η διεύθετηση 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 διόδος 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 χείμαρρου Γιαννούλας εκτελέστηκε επί συνολικού μήκους 1835 m. (ΥΠΕΧΩΔΕ, 1998)

Σκοπός των έργων ήταν η αντιμετώπιση του προβλήματος της αντιπλημμυρικής προστασίας της ευρύτερης ζώνης του χείμαρρου Αγ. Γεωργίου, από το σημείο υπερχειλίσεως 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 παροχетеυτική τους ικανότητα και τα μεγέθη των πλημμυρικών αιχμών να φθάσουν τα επίπεδα των εκτιμηθεισών παροχών σχεδιασμού (έως 230 m<sup>3</sup>/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.

Το ρέμα προκαλεί, έτσι κι αλλιώς, πλημμύρες στο Θριάσιο Πεδίο της Ελευσίνας, αλλά με ραγδαίες 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 έχει 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](http://www.thriassio.gr))

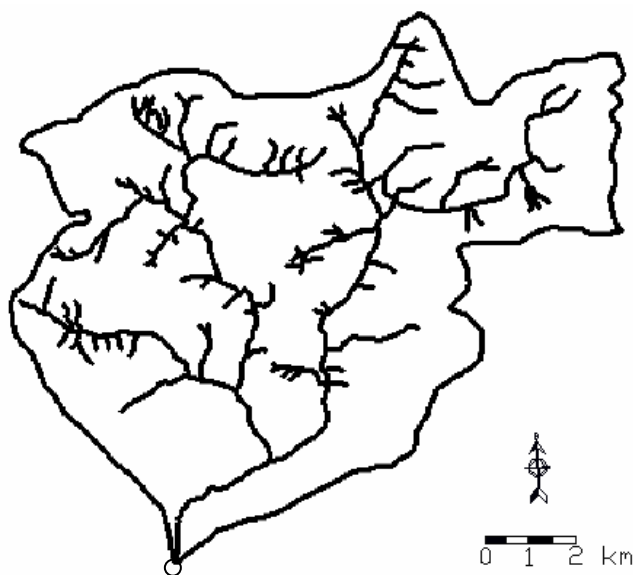
### 4.3 Η ορεινή λεκάνη του ρέματος

Πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι, για τις ανάγκες της εργασίας, η λεκάνη του ρέματος θεωρήθηκε στο σημείο εξόδου που φαίνεται στο σχήμα 4.2, καθώς η συνολική λεκάνη καταλαμβάνει μεγαλύτερη έκταση όπως είδαμε πριν και το ρέμα εκβάλλει στον κόλπο της Ελευσίνας. Η συνολική έκταση της ορεινής λεκάνης ύστερα από επεξεργασία με ΓΣΠ βρέθηκε 57.6 km<sup>2</sup>. Από το σημείο εξόδου και μετά, αρχίζει η πεδιάδα του Ασπροπύργου με έντονη αστικοποίηση και η εξαγωγή πλημμυρικών μεγεθών στην τελική έξοδο του ρέματος θα ήταν ένα διαφορετικό πρόβλημα, ένα πρόβλημα εκτίμησης της απορροής σε μια έντονα «διαταραγμένη» από ανθρωπογενείς δραστηριότητες λεκάνη. Έτσι, η μελέτη μας περιορίζεται στην ορεινή λεκάνη. Το σημείο εξόδου αυτής επιλέχθηκε με κριτήρια:

- το σημείο όπου υπάρχει μεγάλη αλλαγή (μείωση) κλίσης, και
- το σημείο από το οποίο και μετά παρατηρούνται έντονα φαινόμενα αστικοποίησης.

Έτσι επιλέχθηκε ως στόμιο εξόδου το σημείο στο οποίο το ρέμα εισέρχεται με έντονη κλίση στην πεδιάδα δίπλα στο οποίο περνάει ο επαρχιακός δρόμος της περιοχής του Ασπρόπυργου (βλ. φωτογραφία Σχήματος Α.2 στο Παράρτημα 3). Το υψόμετρο του σημείου εξόδου της ορεινής λεκάνης του ρέματος είναι 134.1 m.





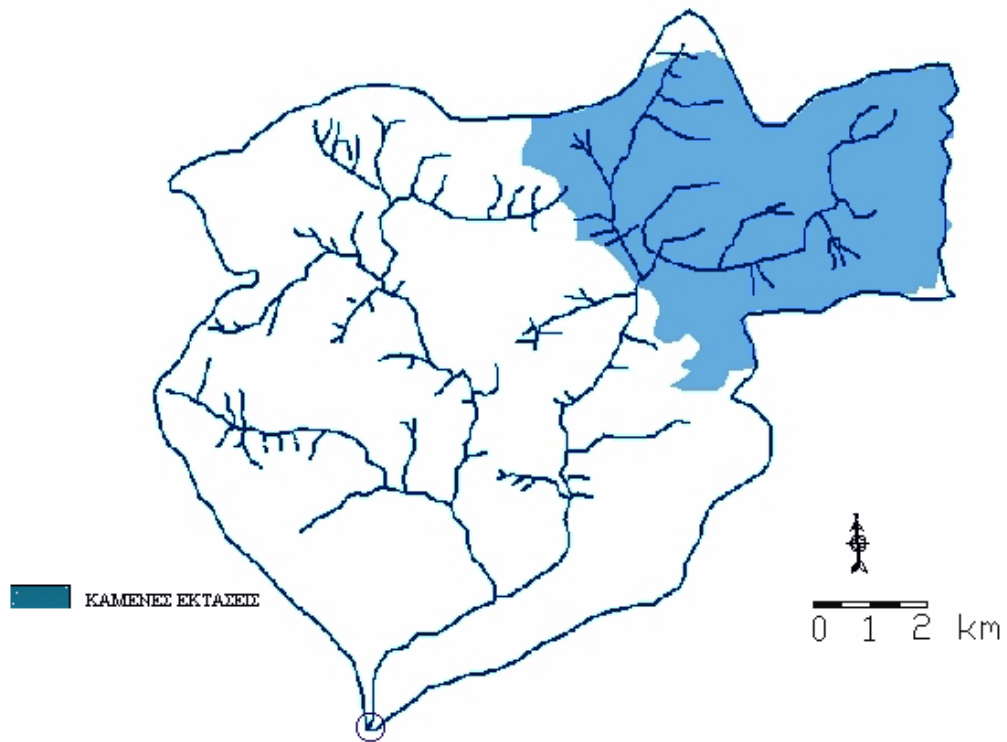
Σχήμα 4.3: Το ρέμα Γιαννούλας και η ορεινή λεκάνη απορροής του

#### 4.4 Οι πυρκαγιές του 2007

Το καλοκαίρι του 2007, η Πάρνηθα ήταν από τα μέρη της Ελλάδας που επλήγησαν περισσότερο από πυρκαγιές. Περίπου 36 200 στρέμματα δασικών και μη εκτάσεων κάηκαν στο βουνό, και ένα μεγάλο μέρος του εθνικού δρυμού Πάρνηθας καταστράφηκε. Η κεφαλληνιακή ελάτη, που ήταν η κυριαρχούσα βλάστηση στα ορεινά του βουνού υπέστη κάψιμο περίπου 55%, καθώς κάηκαν περίπου 20 000 στρέμματα σε σύνολο 35 000 στρεμμάτων.

Όσον αφορά τη λεκάνη μελέτης μας, το ΥΠΕΧΩΔΕ ανακοίνωσε ότι 13 383 στρέμματα αυτής έχουν καεί. Η περιοχή μελέτης μας είναι η ορεινή λεκάνη συνολικού εμβαδού 57 600 στρεμμάτων, οπότε ένα ποσοστό 23% της λεκάνης έχει υποστεί τις επιδράσεις της φωτιάς. Ακριβής χαρτογράφηση των καμένων της Πάρνηθας δεν έχει μέχρι αυτή τη στιγμή πραγματοποιηθεί. Γι' αυτό, παραθέτουμε στο παρακάτω σχήμα μια περιγραμματική σκιαγράφιση των καμένων μέσα στη λεκάνη μας, βάσει αεροφωτογραφιών που προμηθευθήκαμε από τη ΓΥΣ και παρατίθενται στο Παράρτημα 5. Εξαιτίας του φόβου ότι το ρέμα να προκαλέσει πλημμύρες λόγω της μεγάλης καμένης του έκτασης, το ΥΠΕΧΩΔΕ προχώρησε σε καθαρισμό του ρέματος και στην κατασκευή δύο φραγμάτων ανάσχεσης ([www.minenv.gr](http://www.minenv.gr)).

Οι χρήσεις γης στο τμήμα που κάηκε ήταν δάση κωνοφόρων, μικτά δάση, σκληροφυλλική βλάστηση και μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις. Στο παράρτημα 3 παρατίθενται φωτογραφίες του ρέματος στο σημείο εξόδου και στην πεδινή λεκάνη, καθώς το δύσβατο της περιοχής στην ορεινή λεκάνη και η απόσταση του ρέματος από τον δρόμο, δεν επέτρεψαν τη λήψη ικανοποιητικών φωτογραφιών σε αυτήν.



Σχήμα 4.4: Λεκάνη απορροής ρέματος Γιαννούλας και καμένες εκτάσεις

## 5 Επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων

---

### 5.1 Βροχομετρικά δεδομένα

#### 5.1.1 Ο αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός Ζωγράφου και τα πρωτογενή δεδομένα

Για την εξαγωγή όμβριων καμπυλών χρησιμοποιήθηκαν βροχομετρικά δεδομένα από τον βροχογράφο του μετεωρολογικού σταθμού της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Αναζητήθηκαν δεδομένα από βροχογράφο μιας που αυτά μας χρειάζονται για την εξαγωγή μέγιστων ετήσιων υψών για μικρές διάρκειες βροχόπτωσης. Απλά βροχομετρικά ύψη -που μετρούνται συνήθως μια φορά την ημέρα στον ελλαδικό χώρο- δεν μας δίνουν εικόνα των δυσμενέστερων τιμών βροχόπτωσης που είναι απαραίτητα για την μελέτη πλημμυρικών φαινομένων. Στον χώρο μελέτης μας εξάλλου, την Πάρνηθα, δεν υπάρχει, εξάλλου, εγκατάσταση βροχογράφων, άρα η επιλογή των βροχομετρικών δεδομένων έγινε αναγκαστικά από γειτονικούς σταθμούς. Οι αποκλίσεις ωστόσο δεν θεωρούνται πολύ μεγάλες, μιας που οι αποστάσεις είναι σχετικά μικρές και το βροχομετρικό καθεστώς των περιοχών είναι σχεδόν το ίδιο.

Τα δεδομένα πάρθηκαν από το Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ που διαχειρίζεται τον μετεωρολογικό σταθμό του Ζωγράφου. Ο αυτόματος αυτός μετεωρολογικός σταθμός ορίζεται ως ένας σταθμός, του οποίου τα όργανα πραγματοποιούν, και μεταδίδουν ή καταγράφουν παρατηρήσεις αυτόματα. Οι μετρήσεις μετατρέπονται σε κωδική μορφή -εάν αυτό είναι απαιτούμενο- είτε απευθείας, είτε από τον σταθμό συλλογής των δεδομένων.

Οι αυτόματοι μετεωρολογικοί σταθμοί (ΑΜΣ) χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις για την ανάπτυξη του βασικού δικτύου σταθμών με συμβατικά όργανα μετρήσεων. Αυτό γίνεται όταν ζητούνται δεδομένα από θέσεις στις οποίες είτε υπάρχει δυσκολία πρόσβασης είτε αυτές βρίσκονται σε αφιλόξενες περιοχές είτε, σε επανδρωμένους σταθμούς, λαμβάνοντας μετρήσεις εκτός του κανονικού ωραρίου του προσωπικού.

Η χρήση ΑΜΣ καθιστά δυνατή τη δημιουργία ενός δικτύου για λήψη αξιόπιστων μετεωρολογικών παρατηρήσεων και τη δημιουργία υποδομής για πρόσβαση και επεξεργασία των μετρήσεων οποιαδήποτε ώρα του 24ώρου. Παράλληλα, με την εγκατάσταση σύγχρονων μετεωρολογικών σταθμών, δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για λήψη μετρήσεων παραμέτρων που αυτή την στιγμή δεν μετρούνται (όπως, π.χ., μέτρηση όζοντος, συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα και οξειδίων του αζώτου), που διευκολύνουν τις μελέτες των χερσαίων και θαλάσσιων οικοσυστημάτων (Τσουμάνη, 1994).

Τα δεδομένα πάρθηκαν από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του ΕΜΠ στο Ζωγράφου που λειτουργεί από το 1994 και κατασκευάστηκε με τις προδιαγραφές της ΕΜΥ. Επίσης έχει κατασκευαστεί και συμβατικός μετεωρολογικός κλωβός. Οι παράμετροι που μετρούνται από το σταθμό αυτό είναι πολλές: θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ταχύτητα ανέμου, διεύθυνση ανέμου, ύψος βροχής, ατμοσφαιρική πίεση κ.α.

Το ενδιαφέρον μας εστιάστηκε προφανώς στα βροχομετρικά ύψη και πιο συγκεκριμένα στα δεδομένα που προήλθαν από τον συμβατικό μετεωρολογικό κλωβό, μιας που χρειάζονταν στοιχεία από βροχογράφο για την αναζήτηση των μέγιστων υψών και όχι απλά βροχομετρικά ύψη. Για τη μέτρηση του ύψους βροχής στο σταθμό χρησιμοποιείται βροχογράφος με πλωτήρα που αποτελείται από μια χοάνη, το δοχείο όπου βρίσκεται ο πλωτήρας και το σύστημα καταγραφής των μετρήσεων. Το όμβριο νερό οδηγείται μέσω της χοάνης στο δοχείο του πλωτήρα, ο οποίος κινείται κατακόρυφα με την αντίστοιχη ανύψωση της στάθμης του νερού και θέτει σε κίνηση τον καταγραφέα με τη βοήθεια κατάλληλου μηχανισμού μοχλών πάνω σε ταινία περιστρεφόμενου τυμπάνου. Ο καταγραφέας διαθέτει ακίδα εφοδιασμένη με μελάνη. Όταν γεμίζει το δοχείο, η εκκένωσή του γίνεται απότομα και σε μικρό χρονικό διάστημα (μικρότερο από 15 s) μέσω διάταξης σίφωνα. Οι μετρήσεις του βροχογράφου καταγράφονται σε μηνιαία ταινία χρονικού βήματος 30 min, γραμμογραφημένη με κλίμακα μέτρησης του ύψους βροχής 0.1 mm.



Σχήμα 5.1: Γενική άποψη του ΑΜΣ Ζωγράφου και του συμβατικού μετεωρολογικού κλωβού (Πηγή: Κοζάνης et al, 1995)

Τοποθεσία σταθμού: Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα, περίπου 4.5 km ανατολικά της Πλατείας Συντάγματος, στους δυτικούς πρόποδες του Υμηττού.

Συντεταγμένες σταθμού:  $\varphi = 37^{\circ}58'25.7''$  N,  $\lambda = 23^{\circ}47'14.9''$  E (WGS-84),  $X = 481185$ ,  $Y = 4202642$  (ΕΓΣΑ 87), υψόμετρο εδάφους 219 m

Οι αισθητήρες βροχόπτωσης είναι οι παρακάτω:

1. [sensor\_id = 2] Αισθητήρας βροχόπτωσης (Aanderaa 3064), Έναρξη λειτουργίας: 1993-09-30, Παύση λειτουργίας: 1999-12-08
2. [sensor\_id = 8] Αισθητήρας βροχόπτωσης (Environmental Instruments ARG100), Έναρξη λειτουργίας: 1998-11-16, Παύση λειτουργίας: Λειτουργεί ακόμα
3. [sensor\_id=11] Αισθητήρας βροχόπτωσης (Pronamic Rain-O-Matic), Έναρξη λειτουργίας: 2000-04-19, Παύση λειτουργίας: Λειτουργεί ακόμα

Ο τρέχων κύριος αισθητήρας είναι ο ARG100, ενώ όταν υπάρχει τεχνικό πρόβλημα χρησιμοποιείται ο Ronamic εφαρμόζοντας κατάλληλη διόρθωση. Η βροχόπτωση που καταγράφει ο Rain-O-Matic είναι το 86.9% της βροχόπτωσης που καταγράφει ο ARG100. Η τιμή αυτή προήλθε από γραμμική παλινδρόμηση με μηδενικό σταθερό όρο στις μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης και έδωσε συντελεστή προσδιορισμού 0.991. Συνεπώς, για να προκύψει η τιμή που θα έδινε ο ARG100 γίνεται πολλαπλασιασμός με 1.15.

### **5.1.2 Επεξεργασία δεδομένων**

Ο νοτιοανατολικός μετεωρολογικός σταθμός του Εργαστηρίου Υδρολογίας στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου όπως προείπαμε λειτουργεί από το 1993. Από την έναρξη της λειτουργίας του έως σήμερα έχει συγκεντρωθεί ένα δείγμα δεκαεσσάρων υδρολογικών ετών από το 1993-94 έως το 2006-07.

Τα δεκάλεπτα δεδομένα για την κατάρτιση των χρονοσειρών μεγίστων υψών βροχόπτωσης καθώς και των όμβριων καμπυλών, προέρχονται αποκλειστικά από πρωτογενή δεδομένα του σταθμού.

Οι τιμές ύψους βροχόπτωσης δεκάλεπτων συναθροίζονται σε ωριαίες, ημερήσιες και μηνιαίες τιμές. Εάν υπάρχουν ελλείψεις στο δείγμα των δεκάλεπτων τιμών, τότε αυτές αξιολογούνται κατάλληλα: Εάν μπορεί να τεκμηριωθεί πως την ημερομηνία που παρουσιάστηκε η έλλειψη δεν υπήρξε βροχόπτωση τότε τίθεται η τιμή μηδέν. Αν η έλλειψη βρίσκεται κατά τη διάρκεια επεισοδίου βροχόπτωσης, εάν το επεισόδιο είναι ισχυρό ή υπάρχει μεγάλος αριθμός ελλείψεων τότε τίθεται ως ελλείπουσα τιμή η αντίστοιχη ημερήσια βροχόπτωση. Στη συνέχεια επιχειρείται να συμπληρωθεί η έλλειψη χρησιμοποιώντας είτε τον εφεδρικό βροχογράφο, είτε τις τιμές που δίνει ο βορειοδυτικός σταθμός του εργαστηρίου στην Πολυτεχνειούπολη και, ως έσχατη λύση, χρησιμοποιούνται μετρήσεις του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών ή της EMY.

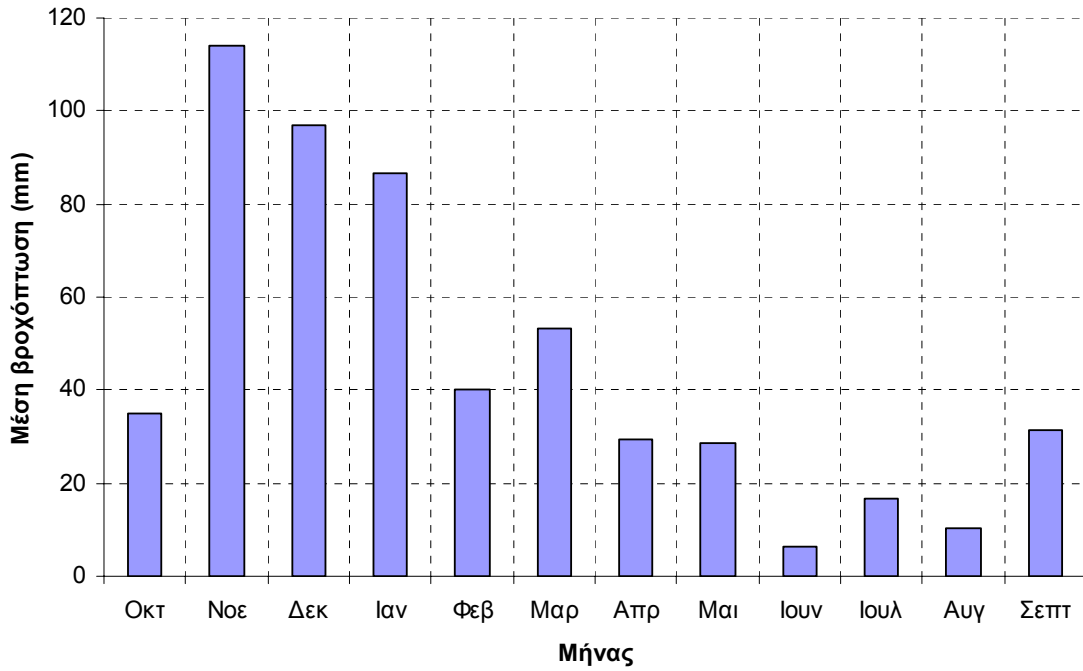
Στον Πίνακα 5.1 απεικονίζονται τελικά οι μηνιαίες τιμές της βροχόπτωσης στον νοτιοανατολικό σταθμό της Πολυτεχνειούπολης για τα υδρολογικά έτη 1993-94 έως 2005-06 (συνολικό μήκος δείγματος: 13 έτη).

Πίνακας 5.1: Μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης στον νοτιοανατολικό σταθμό της Πολυτεχνειούπολης (mm), συνολικές ετήσιες τιμές και μηνιαία στατιστικά χαρακτηριστικά

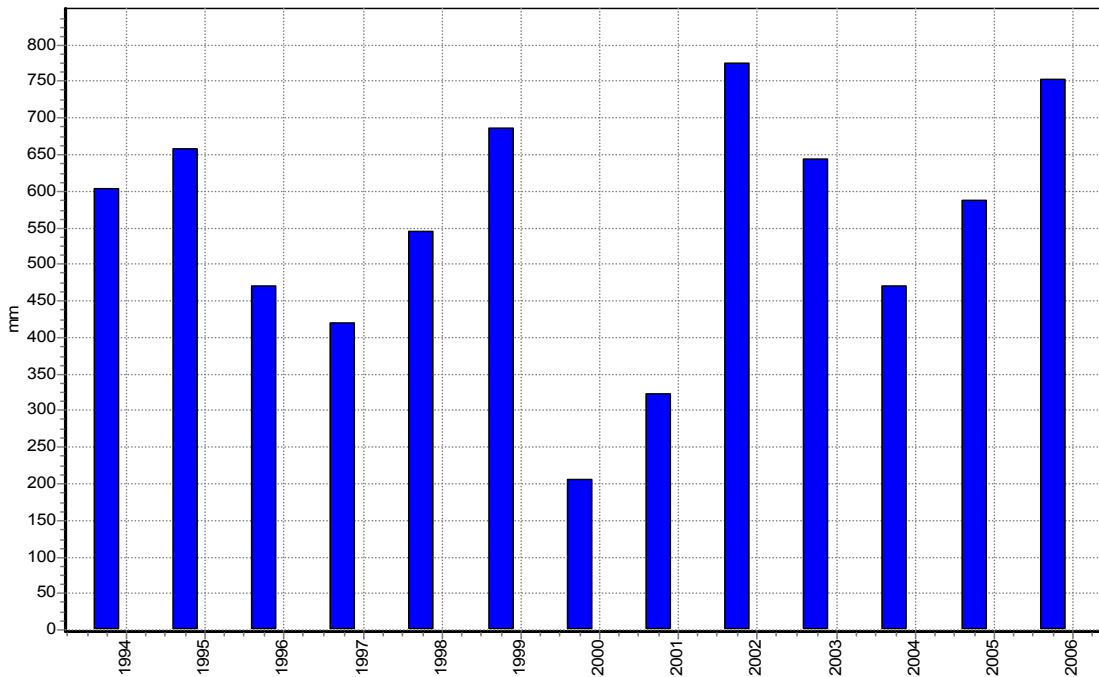
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Year
<b>1993-94</b>	0.00	207.10	23.60	140.30	22.90	45.10	48.50	79.17	21.23	15.00	0.00	0.00	<b>602.9</b>
<b>1994-95</b>	193.70	46.60	142.80	117.90	4.10	66.69	12.10	0.00	1.50	61.20	10.20	0.40	<b>657.1</b>
<b>1995-96</b>	8.10	75.50	90.50	105.40	79.60	20.30	36.70	14.50	0.00	0.00	8.90	30.90	<b>470.4</b>
<b>1996-97</b>	30.30	30.20	123.50	98.30	5.50	7.80	54.20	10.20	2.50	0.00	56.80	0.00	<b>419.3</b>
<b>1997-98</b>	55.94	91.60	134.50	47.40	39.80	105.8	11.70	55.30	0.00	0.00	0.00	2.60	<b>544.6</b>
<b>1998-99</b>	14.80	172.90	31.20	38.40	24.80	197.2	13.60	91.80	0.40	47.20	9.40	45.20	<b>686.9</b>
<b>1999-00</b>	21.60	42.20	74.00	14.80	13.60	11.00	11.40	4.20	12.40	0.00	0.00	0.00	<b>205.2</b>
<b>2000-01</b>	15.60	106.80	26.80	47.60	49.40	8.40	51.40	1.20	1.00	13.20	1.40	0.40	<b>323.2</b>
<b>2001-02</b>	1.00	173.80	116.60	44.60	14.40	87.20	52.60	56.20	0.00	38.40	43.40	146.00	<b>774.2</b>
<b>2002-03</b>	33.80	136.60	199.40	99.20	72.40	26.80	45.60	21.60	0.00	0.00	2.00	7.20	<b>644.6</b>
<b>2003-04</b>	29.20	52.40	130.00	172.80	25.11	16.00	24.60	19.20	0.60	0.00	0.00	0.00	<b>469.9</b>
<b>2004-05</b>	35.20	51.60	141.40	106.80	81.40	28.80	3.00	19.00	7.80	38.40	4.00	69.20	<b>586.6</b>
<b>2005-06</b>	13.40	293.80	26.40	94.80	87.80	71.60	16.20	0.00	37.20	4.00	0.00	108.36	<b>753.5</b>
<b>Mean</b>	34.82	113.93	96.98	86.79	40.06	53.28	29.35	28.64	6.51	16.72	10.47	31.56	549.1
<b>Stdev</b>	50.18	79.05	56.52	45.39	30.66	53.89	19.14	31.33	11.21	21.8	18.21	48.27	
<b>VarCf.</b>	1.44	0.69	0.58	0.52	0.77	1.01	0.65	1.09	1.72	1.3	1.74	1.53	
<b>Count</b>	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	
<b>Miss</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>Max</b>	193.7	293.8	199.4	172.8	87.8	197.2	54.2	91.8	37.2	61.2	56.8	146	
<b>Min</b>	0	30.2	23.6	14.8	4.1	7.8	3	0	0	0	0	0	
<b>UpLim</b>	185.36	351.1	266.54	222.95	132.0	214.9	86.79	122.62	40.14	82.12	65.09	176.36	
<b>Highs</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται οι συνολικές ετήσιες τιμές καθώς και οι μέσες τιμές, οι τιμές της τυπικής απόκλισης, οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές καθώς και οι πολύ υψηλές τιμές (Highs) που υπερβαίνουν την τιμή (μέση τιμή) + 3(τυπική απόκλιση) που για κανονική τιμή θα αντιστοιχούσε σε πιθανότητα υπέρβασης 99.87% .

Στο Σχήμα 5.2. παρουσιάζεται η χρονοσειρά των μέσων μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης για την περίοδο 1993-94 έως 2005-06 με την μορφή γραφήματος. Επιπλέον, στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η χρονοσειρά των ετησίων συνολικών βροχοπτώσεων για τα υδρολογικά έτη 1993-94 έως 2005-06.



Σχήμα 5.2: Μέσες μηνιαίες τιμές βροχοπτώσεις στον νοτιοανατολικό σταθμό της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου μεταξύ των υδρολογικών ετών 1993-94 και 2005-06).



Σχήμα 5.3: Ετήσιες τιμές βροχόπτωσης στον νοτιοανατολικό σταθμό Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου μεταξύ των υδρολογικών ετών 1993-94 και 2005-06.

Από την εμπειρική αξιολόγηση των παραπάνω δεδομένων που αφορούν το δείγμα βροχοπτώσεων μεταξύ 1993-94 και 2005-06 εξάγονται τα εξής συμπεράσματα (Κοζάνης et al, 1995):

1. Η μέση ετήσια τιμή βροχόπτωσης είναι 549.1 mm.
2. Το 78 % των βροχοπτώσεων κατά μέσο όρο (425.9 mm) εμφανίζεται στην υγρή περίοδο (Οκτώβριος – Μάρτιος). Το υπόλοιπο 22 % κατά μέσο όρο (123.3 mm) εμφανίζεται στην ξηρή περίοδο (Απρίλιος – Σεπτέμβριος).
3. Αν η κατανομή των βροχοπτώσεων κατά τις παραπάνω περιόδους ήταν ομοιόμορφη, θα είχαμε 71 mm περίπου κατά μέσο όρο για τους υγρούς μήνες και 20 mm περίπου κατά μέσο όρο για τους ξηρούς μήνες (μέσος όρος περίπου 46 mm/μήνα για το σύνολο του έτους).
4. Η μεγαλύτερη μηνιαία βροχόπτωση παρουσιάστηκε το Νοέμβριο του 2005 (τιμή 293.8 mm) ενώ η μεγαλύτερη ετήσια το 2001-02 (τιμή 774.2 mm). Μάλιστα, κατά το Νοέμβριο του 2005, 213.8 mm συγκεντρώθηκαν μέσα σε τρεις περίπου ημέρες (μεταξύ 22 και 25 Νοεμβρίου) σε δύο διακριτά επεισόδια βροχόπτωσης 117.2 και 96.6 mm.
5. Μηδενικές τιμές βροχόπτωσης παρουσιάζονται σε αρκετούς μήνες, κυρίως μεταξύ Ιουνίου και Αυγούστου.
6. Η ελάχιστη ετήσια τιμή παρουσιάστηκε το 1999-00 (τιμή 205.2 mm).
7. Παρουσιάζεται μεγάλη διακύμανση στις μηνιαίες τιμές.
8. Ο μήνας με την μεγαλύτερη μέση τιμή βροχοπτώσεων είναι ο Νοέμβριος με 113.93 mm κατά μέσο όρο και σχετικά χαμηλή μεταβλητότητα (συντελεστής μεταβλητότητας 0.69).
9. Ο μήνας που παρουσιάζεται να έχει την μικρότερη μέση τιμή βροχοπτώσεων είναι ο Ιούνιος με 6.51 mm. Δεν μπορούν ωστόσο να βγουν ασφαλή συμπεράσματα από αυτήν την τιμή καθώς όλοι οι μήνες του καλοκαιριού έχουν χαμηλή τιμή βροχόπτωσης και μεγάλη μεταβλητότητα.
10. Το μήκος του δείγματος είναι αρκετά μικρό για να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την εμμονή στις ετήσιες τιμές βροχόπτωσης.
11. Εκτίμηση ακραίων γεγονότων βροχόπτωσης

Η εκτίμηση των ακραίων γεγονότων βροχόπτωσης γίνεται με κύριο σκοπό την κατάρτιση όμβριων καμπυλών.

Με επεξεργασία των βροχομετρικών δεδομένων (από βροχογράφος, ανά 10 λεπτά) από το 1994-2007, βρέθηκαν αρχικά τα μέγιστα ετήσια ύψη βροχόπτωσης, που παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα. Για την εύρεση των μέγιστων ετήσιων υψών βροχόπτωσης και για την κατάρτιση των όμβριων καμπυλών παρακάτω, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα «Υδρογνώμων» από το οποίο προήλθε και ο πίνακας 5.2.



Πίνακας 5.2: Μέγιστα ύψη βροχής της περιόδου 1993-2007 για διάρκειες 10 min, 20 min, 30 min, 1 h, 2 h, 6 h, 12 h, 24 h. (Πρόγραμμα Υδρογνώμων)

10 min max	20 min max	30 min max	1 h max	2 h max	6 h max	12 h max	24 h max
78.96	58.68	50.92	29.15	18.77	12.29	6.7	4.63
101.94	85.05	71.71	66.25	41.11	16.67	13.51	6.96
44.88	33.84	33.3	44.86	14.64	8.38	4.24	2.16
64.8	47.4	46.2	34.8	22.1	10.95	5.64	3.14
105.48	68.64	55.72	29.94	14.97	7.05	3.67	2.04
109.2	90.6	79.6	61.4	34	11.53	7.37	3.71
60	37.8	29.6	18.8	9.9	3.37	2.5	1.33
57.6	36	30.4	18.2	11.7	5.33	3.28	2.03
116.4	93	78.4	53.2	27.4	9.13	5.37	4.03
46.8	40.8	34	28	20	8.23	5.22	2.71
63.6	51	37.2	29.4	16.5	6.57	4.73	2.78
50.4	41.4	34	23.2	12.9	5.93	3.75	2.34
82.8	63.45	56.08	34.94	23.1	11.83	8.37	4.88
35.88	29.67	24.84	20.24	12.88	8.28	4.79	2.62

Από την εμπειρική αξιολόγηση των παραπάνω αριθμητικών στοιχείων που αφορούν το δείγμα βροχοπτώσεων μεταξύ 1993-94 και 2006-07 εξάγονται επίσης τα εξής συμπεράσματα:

- Το μέγιστο δεκάλεπτο που καταγράφηκε είναι 116.40 mm/h και παρουσιάστηκε τον Μάιο του 2002.
- Το μέγιστο εικοσιτετράωρο που καταγράφηκε είναι 6.96 mm/h (167 συνολικά χιλιοστά βροχόπτωσης) και παρουσιάστηκε τον Οκτώβριο του 1994.
- Σε διάρκειες μεγαλύτερες των 24 h, κατά το Νοέμβριο του 2005 συγκεντρώθηκαν 213.8 mm μέσα σε τρεις περίπου ημέρες (μεταξύ 22 και 25 Νοεμβρίου) σε δύο διακριτά επεισόδια βροχόπτωσης (117.2 και 96.6 mm).

## 5.2 Γεωγραφικά δεδομένα

### 5.2.1 Γενικά

Η προσομοίωση των φυσικών διεργασιών που επιχειρείται στην παρούσα εργασία απαιτεί την χρήση κατάλληλης γεωγραφικής πληροφορίας. Αυτή λήφθηκε με διάφορα πακέτα λογισμικού όπως είναι το ARC/INFO. Βάση της πρωτογενούς πληροφορίας αποτελούν το ψηφιακά μοντέλα εδάφους (ανύψωσης).

Πιο συγκεκριμένα, στη μελέτη μας ήταν απαραίτητη η δημιουργία και η επεξεργασία ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους έτσι ώστε να εξαχθούν μορφομετρικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του ρέματος της Γιαννούλας και του αντίστοιχου υδρογραφικού δικτύου, η ακριβής γνώση των οποίων είναι απαραίτητη για την εξαγωγή στη συνέχεια χρόνων συγκέντρωσης απορροής αλλά και αδρομερών εκτιμήσεων της παροχής στο σημείο εξόδου.

### 5.2.2 Ψηφιακά μοντέλα εδάφους (ανύψωσης)

Το λογισμικό ARC/INFO μπορεί να πραγματοποιήσει τη μοντελοποίηση ενός δικτύου απορροής είτε αυτόματα μέσω του Arc Toolbox είτε μέσα από το περιβάλλον GRID. Το GRID είναι ένα περιβάλλον το οποίο μπορεί να επεξεργαστεί ψηφιακά μοντέλα εδάφους (Digital Terrain Models, DTM, ή Digital Elevation Models). Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους μπορούν να αποδώσουν τη μεταβολή του ανάγλυφου της γήινης επιφάνειας και όπως είδαμε και πρωτύτερα το ανάγλυφο είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες στη δημιουργία ενός υδρογραφικού δικτύου. Με τα εργαλεία που παρέχει το περιβάλλον GRID μπορεί, με τις απαραίτητες παραδοχές, να προσομοιώσει την κίνηση του νερού πάνω στη γήινη επιφάνεια, που αντιπροσωπεύεται από τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους και να καταλήξει στη δημιουργία λεκανών απορροής και υδατορευμάτων.

Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους είναι αρχεία τα οποία αναπαριστούν μία συνεχή επιφάνεια, συνήθως την γήινη επιφάνεια. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι δημιουργίας ψηφιακών μοντέλων εδάφους είναι η μέθοδος του δικτύου τριγώνων και η μέθοδος του κανάβου. Με τη μέθοδο δικτύου τριγώνων κατασκευάζεται ένα δίκτυο τριγωνικών επιφανειών, με κορυφές γνωστά σημεία, που προσεγγίζουν την επιφάνεια που είναι υπό μελέτη. Με τη μέθοδο του κανάβου τοποθετείται ένας κανονικός κανάβος στα σημεία της περιοχής που είναι υπό μελέτη και με χρήση τεχνικών παρεμβολής προσδιορίζονται οι τιμές των υψομέτρων στα σημεία τομής του κανάβου. Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους που έχουν προκύψει με τη μέθοδο του κανάβου θα τα αναφέρουμε στη συνέχεια ως grids. Στο σχήμα 5.4 βλέπουμε ένα τμήμα ΨΜΕ σε μορφή κανάβου. Οι τιμές σε κάθε φατνίο (cell) αντιστοιχούν στις τιμές ανύψωσης που αντιστοιχούν στο υψόμετρο της περιοχής μελέτης.

78	72	69	71	58	49
74	57	56	49	460	50
69	53	44	37	38	48
64	58	55	22	31	24
68	61	47	21	16	19
74	53	34	12	11	12

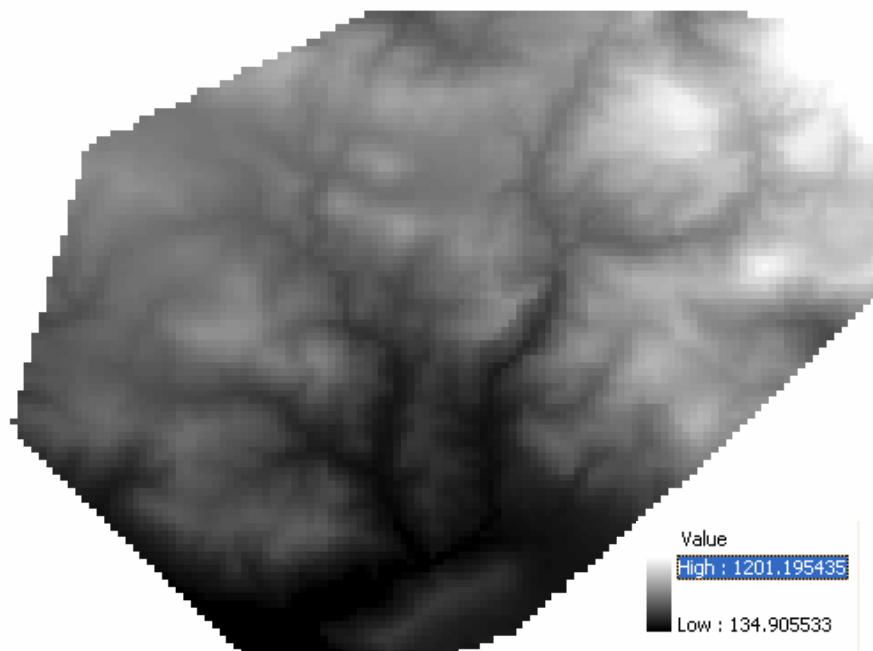
Σχήμα 5.4: Τμήμα ΨΜΕ σε μορφή κανάβου

Η ακρίβεια των ψηφιακών μοντέλων εδάφους είναι πολύ σημαντική. Όσο πιο ακριβή είναι τα δεδομένα από τα οποία προέκυψε ένα ΨΜΕ, τόσο πιο ορθή είναι η απόδοση της επιφάνειας που προέρχεται από αυτό. Η ακρίβεια ενός ΨΜΕ εξαρτάται βασικά από την ανάλυση (απόσταση μεταξύ των σημείων του δείγματος της επιφάνειας που είναι υπό μελέτη). Άλλοι παράγοντες που επιδρούν στην ακρίβεια είναι ο τύπος των δεδομένων (data type), αν είναι integer ή floating point, και ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία της επιφάνειας από την οποία δημιουργήθηκε το αρχικό ψηφιακό μοντέλο (Τζαλαβρά, 1998).

Στην περίπτωση που τα ΨΜΕ χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό υδρογραφικών δικτύων, τα σφάλματα τους είναι συνήθως βυθίσματα ή κορυφές. Τα βυθίσματα περιβάλλονται από περιοχές που έχουν υψηλότερες τιμές ανύψωσης. Αυτές οι περιοχές χαρακτηρίζονται σαν εσωτερικές λεκάνες αποστράγγισης. Μερικές μπορεί να είναι φυσικές λεκάνες σε καρστικές περιοχές αλλά άλλες περιοχές είναι ελαττώματα στο ΨΜΕ. Οι κορυφές περιβάλλονται από περιοχές που έχουν μικρότερες τιμές ανύψωσης. Αυτές είναι συνήθως φυσικά χαρακτηριστικά και δεν έχουν αρνητική επίδραση στον υπολογισμό της κατεύθυνσης της ροής του νερού. Τέτοια σφάλματα και ειδικότερα τα βυθίσματα πρέπει να αφαιρεθούν πριν από τον προσδιορισμό των επιφανειακών χαρακτηριστικών, όπως οι λεκάνες απορροής και τα υδατορεύματα. Τα βυθίσματα μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητες παρενέργειες στον προσδιορισμό της κατεύθυνσης της ροής και, γι' αυτό, πρέπει να αφαιρεθούν.

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους για τη μελέτη μας, το προμηθευθήκαμε από τη Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού. Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται το ΨΜΕ για το ρέμα της Γιαννούλας. Παρατηρούμε ότι το υψόμετρο της λεκάνης κυμαίνεται από 135-1200 m. Ο προσδιορισμός του μέσου υψομέτρου της λεκάνης προκύπτει εύκολα από τα Statistics του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και είναι  $H_{\text{μέσο}} = 712.33$  m.

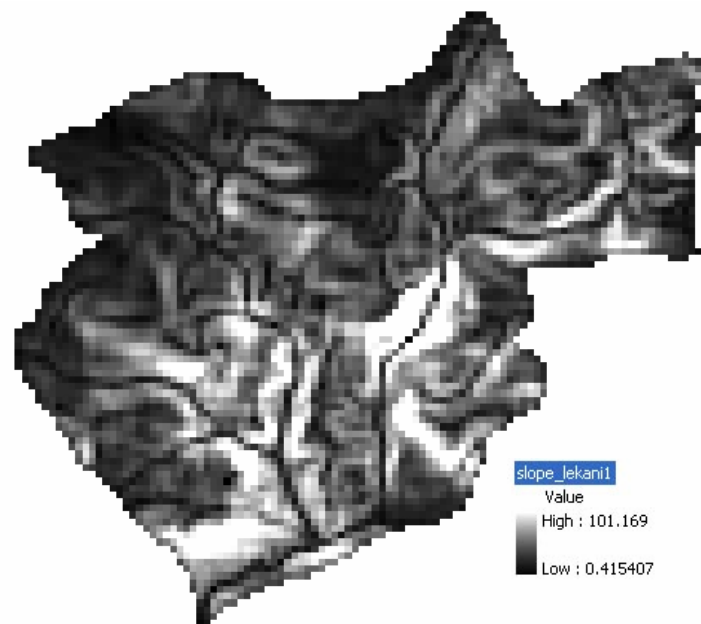
Η μέση κλίση της λεκάνης προκύπτει επίσης εύκολα από το path: Spatial Analyst → Slope → Percent rise και από τα Statistics του χάρτη κλίσεων που δημιουργείται προκύπτει ότι η μέση κλίση της λεκάνης είναι 25.8%. Στο Σχήμα 5.6 παρατίθεται ο χάρτης κλίσεων για τη λεκάνη της Γιαννούλας, αφού πρώτα με την εντολή latticeclip το αρχικό ψηφιακό μοντέλο έχει πάρει την ακριβή μορφή της λεκάνης απορροής.



Σχήμα 5.5: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους για τη λεκάνη απορροής του χειμάρρου Γιαννούλας (Πηγή: ΓΥΣ, 2007)

Ο αριθμός των βυθισμάτων είναι συνήθως μεγαλύτερος στα ψηφιακά μοντέλα εδάφους που έχουν προκύψει από περιοχές με έντονο ανάγλυφο και έτσι έχουν και την ανάλογη ανάλυση. Άλλος λόγος που προκαλεί βυθίσματα είναι η αποθήκευση των δεδομένων των υψομέτρων

σε μορφή integer. Αυτό προκαλεί προβλήματα συνήθως σε περιοχές που έχουν χαμηλό κάθετο ανάγλυφο. Πολλές φορές το 1% των φατνίων σε ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους που έχει ανάλυση 30 μέτρων είναι βυθίσματα.



Σχήμα 5.6: Χάρτης κλίσεων για τη λεκάνη της Γιαννούλας

### 5.2.3 Εξαγωγή υδρολογικών χαρακτηριστικών

Άπαξ και κατασκευαστεί το ΨΜΕ από ψηφιοποίηση όλων των στοιχείων (ισουψείς, υψομετρικά σημεία, τριγωνομετρικά σημεία, ρέματα, όριο περιοχής κάλυψης) και αποδοθεί σε μορφή κανάβου, απαιτείται μια διόρθωσή του για χονδροειδή σφάλματα και βυθίσματα. Ως βύθισμα θεωρείται ένα ή περισσότερα φατνία γύρω από το οποίο όλα τα φατνία έχουν υψηλότερο υψόμετρο. Τα βυθίσματα πρέπει να διορθωθούν ώστε να μην απομονώνουν τμήματα της λεκάνης. Η απαλοιφή των βυθισμάτων γίνεται με τις εντολές:

Arc: Fill<dtm>

Arcgis: ArcToolbox → Spatial Analyst → Hydrology → Fill

Ο αριθμός των βυθισμάτων σε ένα ΨΜΕ συνήθως αυξάνεται για ΨΜΕ χαμηλότερης ανάλυσης. Ο εντοπισμός των χονδροειδών σφαλμάτων γίνεται με την απόδοση των υψομέτρων σε μια συνεχή παλέτα ή με μοντέλο σκίασης του ΨΜΕ με το path:

ArcMap → 3d Analyst → Hillshade ή

Spatial Analyst → Surface Analysis → Hillshade

Η ροή σε μία επιφάνεια ορίζεται από την πιο απότομη κατεύθυνση με κλίση προς τα κάτω. Όταν είναι γνωστή η κατεύθυνση της ροής για κάθε φατνίο, τότε είναι δυνατόν να προσδιοριστεί πόσα φατνία ρέουν σε ένα δεδομένο φατνίο. Αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των υδροκριτών και των δικτύων των ρευμάτων.

Στη συνέχεια η πορεία εργασιών της υδρολογικής ανάλυσης είναι η εξής:

- ΨΜΕ
- Κάναβος κατεύθυνσης απορροής

- Κάναβος συγκεντρωτικής ροής
- Υδρολογικό δίκτυο (ψηφιδωτή μορφή)
- Υδρολογικό δίκτυο (διανυσματική μορφή) – Μήκος υδρολογικού δικτύου
  
- ΨΜΕ
- Λεκάνη απορροής (ψηφιδωτή μορφή)
- Λεκάνη απορροής (διανυσματική μορφή) – Εμβαδόν λεκάνης απορροής

Αναλυτικότερα:

Κατεύθυνση ροής: Για να παραχθούν τα υδρολογικά χαρακτηριστικά μιας φυσικής επιφάνειας που αντιπροσωπεύεται από ένα ΨΜΕ πρέπει καταρχάς να προσδιοριστεί η κατεύθυνση της ροής του νερού στο ΨΜΕ. Η κατεύθυνση της ροής του νερού στο φυσικό περιβάλλον είναι η κίνηση του νερού από ένα σημείο με δεδομένο υψόμετρο προς ένα άλλο σημείο που έχει μικρότερο υψόμετρο. Στα ΨΜΕ η κατεύθυνση της ροής μπορεί να προσδιοριστεί για κάθε φατνίο. Το κάθε ένα φατνίο δηλαδή, μπορεί να αποκτήσει μία συγκεκριμένη τιμή που αντιπροσωπεύει την κατεύθυνση του νερού στην γήινη επιφάνεια. Γνωρίζοντας τις τιμές αυτές μπορεί να προσδιοριστεί πόσα φατνία, ανάλογα με την τιμή τους, συγκλίνουν σε ένα συγκεκριμένο φατνίο, διαδικασία που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ζητούμενων φυσικών χαρακτηριστικών. Ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης της ροής στο λογισμικό ARC/INFO πραγματοποιείται με τη βοήθεια της συνάρτησης flowdirection από το Arc Toolbox-Hydrology (version 9.2). Αυτή η συνάρτηση χρησιμοποιεί για δεδομένο εισαγωγής ένα ΨΜΕ που αντιπροσωπεύει μια επιφάνεια και σαν αποτέλεσμα εξάγει έναν κάναβο που δείχνει την κατεύθυνση της ροής γύρω από κάθε φατνίο. Από την συνάρτηση προκύπτουν 8 τιμές που αντιστοιχούν σε 8 κατευθύνσεις της ροής και σχετίζονται με τα 8 γειτονικά φατνία από τα οποία η ροή θα μπορούσε να κατευθυνθεί.

Η πορεία επακριβώς είναι η εξής:

Arc Info Workstation: Arc → Grid

Grid: flowgrid = flowdirection (dtm ns)

Arcgis: Arc Toolbox → Spatial Analyst Tools → Hydrology → Flow Direction

Κάναβος συσσωρευμένης ροής: Επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός του μεγέθους της συσσωρευμένης ροής. Η συσσωρευμένη ροή σαν μέγεθος υποδεικνύει σε πια σημεία της γήινης επιφάνειας συσσωρεύεται το νερό. Η συσσωρευμένη ροή στην πιο απλή της μορφή υπολογίζεται σαν τον αριθμό των φατνίων που συγκλίνουν σε κάθε φατνίο που η θέση του πάνω στο grid αντιστοιχεί σε περιοχές που έχουν το χαμηλότερο υψόμετρο σε σχέση με τα γειτονικά του στη γήινη επιφάνεια. Στο περιβάλλον GRID του ARC/INFO η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με τη συνάρτηση flowaccumulation. Η σύνταξη της συνάρτησης είναι η εξής:

Arc → Grid

Grid: acumgrid = flowaccumulation (flowgrid)

Ενώ σε Arcgis

Arcgis: Arc Toolbox → Spatial Analyst Tools → Hydrology → Flow Accumulation

Στην συνάρτηση αυτή flow\_dir είναι το grid που έχει τις πληροφορίες για την κατεύθυνση της ροής του νερού και έχει προκύψει από στην συνάρτηση flowdirection. Το grid που προκύπτει είναι το flow\_acc και περιέχει τις πληροφορίες για τη ροή που συσσωρεύεται σε διάφορα σημεία της επιφάνειας που είναι υπό μελέτη. Εφαρμόζοντας την συνάρτηση στο grid της κατεύθυνσης της ροής προέκυψε το grid της συσσωρευμένης ροής.

Τα φατνία που έχουν συσσωρευμένη ροή είναι περιοχές που συγκεντρώνουν τη ροή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό ρευμάτων. Τα φατνία που έχουν τιμή για τη συσσωρευμένη ροή μηδέν είναι τοπογραφικά υψώματα και χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση των κορυφογραμμών.

Ο υπολογισμός των σημείων στα οποία συσσωρεύεται η ροή μπορεί να προκύψει χρησιμοποιώντας και άλλα δεδομένα εκτός από τη μορφολογία του εδάφους. (Σκοπελίτη και Στάμου, 2005)

Προσδιορισμός υδρολογικού δικτύου: Από την συνάρτηση flowaccumulation προκύπτει ένα grid το οποίο υποδεικνύει σε ποια σημεία του εδάφους συσσωρεύεται η ροή του νερού. Στο grid, αυτή η συσσωρευμένη ροή όπως είδαμε, είναι ο αριθμός των υπερκείμενων φατνίων που η κατεύθυνση της ροής τους συγκλίνει στο φατνίο που έχει το χαμηλότερο υψόμετρο. Το υδρογραφικό δίκτυο μπορεί να προκύψει από αυτό το grid χρησιμοποιώντας αλγεβρικές εκφράσεις του ARC/INFO επιλέγοντας τα φατνία στα οποία η τιμή της συσσωρευμένης ροής είναι μεγαλύτερη από μία συγκεκριμένη τιμή που αποτελεί ένα κάτω όριο. Στην πραγματικότητα, επιλέγονται τα φατνία εκείνα που αντιστοιχούν στα σημεία της γήινης επιφάνειας στα οποία συγκεντρώνονται μεγάλες ποσότητες νερού ικανές να δημιουργήσουν τους κλάδους των υδρογραφικών δικτύων.

Η εξαγωγή του υδρολογικού δικτύου γίνεται από το path:

Arc → Grid

Grid: stream = con (acumgrid > 5000,1)

όπου 5000 = αριθμός φατνίων, το όριο που τέθηκε ύστερα από δοκιμές για τη συσσωρευμένη ροή , 1 = τα φατνία με αυτή την τιμή θα αντιπροσωπεύουν το υδρολογικό δίκτυο, κελιά δηλαδή με τιμές μεγαλύτερες των 5000 φατνίων θα πάρουν την τιμή 1 στο νέο grid που θα δημιουργηθεί ενώ τα υπόλοιπα θα πάρουν την τιμή 0

Ενώ σε Arcgis

Arcgis: Arc Toolbox → Spatial Analyst Tools → Reclassify

Η ιεράρχηση του υδρολογικού δικτύου στη συνέχεια κατά Shreve ή κατά Strahler γίνεται από τις σχέσεις:

Arc → Grid

Grid: streamord = streamorder (srtstream, flowgrid , strahler)

Ενώ σε Arcgis

Arcgis: Arc Toolbox → Spatial Analyst Tools → Hydrology → Stream Order

Τα grid που προκύπτουν από τις διαδικασίες που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους είναι αρχεία μωσαϊκά (raster). Τα αρχεία αυτά μπορούν να μετατραπούν σε διανυσματικά (vector) αρχεία με τη χρήση των εντολών streamline και gridline από το

command line του Arc Info. Η εντολή streamline είναι ένα πρόγραμμα που είχε σχεδιαστεί πρωταρχικά για τη διανυσματοποίηση υδρογραφικών δικτύων, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για κάθε άλλο grid αρχείο που αντιπροσωπεύει ένα μωσαϊκό γραμμικό δίκτυο στον οποίο είναι γνωστή η κατεύθυνση του. Η εντολή gridline χρησιμοποιείται επίσης για την διανυσματοποίηση μωσαϊκών γραμμικών αρχείων αλλά δεν απαιτεί τη γνώση της κατεύθυνσης του δικτύου. Χρησιμοποιώντας την εντολή streamline είναι δυνατόν δύο γειτονικά γραμμικά χαρακτηριστικά που έχουν την ίδια τιμή να διανυσματοποιηθούν σαν δύο παράλληλες γραμμές, αντί να ενωθούν σε μία γραμμή όπως θα προέκυπτε με τη χρήση της εντολής gridline. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τη χρήση ενός grid που έχει τις τιμές για την κατεύθυνση του δικτύου που είναι υπό μελέτη. Πιο συγκεκριμένα, για την εξαγωγή του υδρολογικού δικτύου σε διανυσματική μορφή ακολουθείται το path:

Arc → Grid

Grid: streamv = streamline (streamord, flowgrid, class, 1.25)

όπου 1.25 είναι η τιμή διακριτικής ικανότητας για παρόμοια διαδικασία.

Ενώ σε Arcgis

Arcgis: Arc Toolbox → Spatial Analyst Tools → Hydrology → Stream to feature

Arc Toolbox → Conversion Tools → To Coverage

Arc Toolbox → Data Management Tools → Topology (line)

Ο υπολογισμός του μήκους ενός υδατορεύματος μπορεί να γίνει ακολουθώντας την εξής διαδικασία:

Arc

Statistics streamv.aat streamvall.inf

Sum length

end

Ενώ σε Arcgis

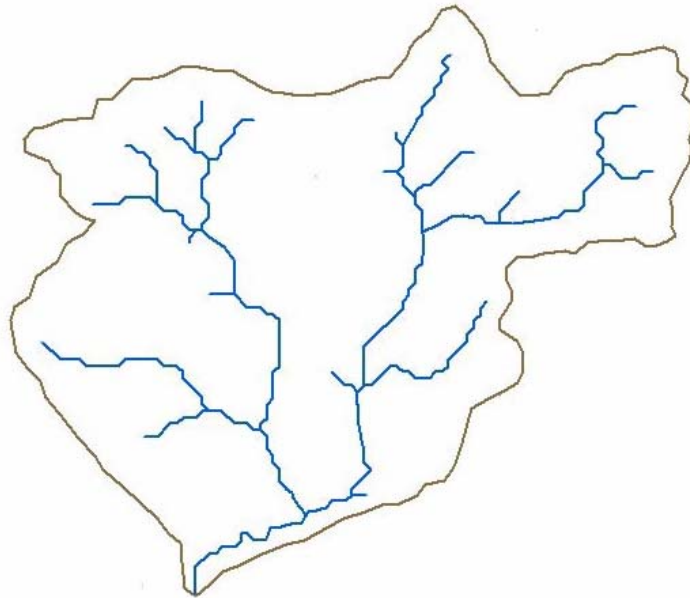
Arcmap: Επιλογή coverage streamv

Open attribute table

Επιλογή πεδίου → Statistics → Sum Length

Επιλογή πεδίου → Summarize → Sum Length

Κατ' αυτόν τον τρόπο βρήκαμε το μέγιστο μήκος υδατορεύματος στην περιοχή μελέτης μας που ήταν 12.269 km. Το υδρογραφικό δίκτυο που εξήχθη για το ρέμα της Γιαννούλας φαίνεται στο Σχήμα 5.7



Σχήμα 5.7: Υδρογραφικό δίκτυο ρέματος Γιαννούλα

Λεκάνες απορροής: Οι λεκάνες απορροής μπορούν να προσδιοριστούν στο περιβάλλον GRID του ARC/INFO με τη χρήση των συναρτήσεων basin και watershed είτε από το Arc Toolbox στην έκδοση 9.2. Το κύριο δεδομένο εισαγωγής που χρησιμοποιούν αυτές οι συναρτήσεις είναι το grid της κατεύθυνσης της ροής που προέκυψε από το εργαλείο flowdirection όπως αναφέραμε πρωτύτερα.

Πιο συγκεκριμένα:

Arc → Grid

Grid: basingrid = basin (flowgrid)

Ενώ σε Arcgis

Arcgis: Arc Toolbox → Spatial Analyst Tools → Hydrology → Basin

Ο υπολογισμός του εμβαδού της λεκάνης μας πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία:

Arc

Gridpoly basingrid basinpoly 1.25

Statistics basinpoly.pat basinpoly.inf

Max area

end

list basinpoly.inf

Ενώ σε Arcgis

Arc Toolbox → Spatial Analyst Tools → Convert → Raster to features → Shape file

Arc Toolbox → Conversion Tools → To Coverage

Arc Toolbox → Data Management Tools → Topology (poly)



Arcmap: Επιλογή πολυγώνου λεκάνης (Identify)

Open attribute table → Επιλογή πεδίου → Statistics → Max area

Έτσι με αυτή τη διαδικασία υπολογίστηκε το εμβαδόν της λεκάνης του ρέματος Γιαννούλας και βρέθηκε ίσο με 57.6 km<sup>2</sup>.

Στην ημικατανεμημένη προσέγγιση που πραγματοποιήθηκε μέσω του HEC-HMS, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της λεκάνης της Γιαννούλας «διασπάστηκε» σε δύο υπολεκάνες, την καμένη και την μη καμένη και υπολογίστηκαν τα χαρακτηριστικά της κάθε υπολεκάνης. Η καμένη λεκάνη, αν και εμπεριείχε και μικρές περιοχές στα άκρα που δεν είχαν καεί, εκτιμήθηκε σαν ολικώς καμένη για τις ανάγκες της προσέγγισης. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε μέσω του Arc-Info Workstation για τη διαμέριση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της συνολικής λεκάνης σε δύο υποτομήματα ήταν η εξής:

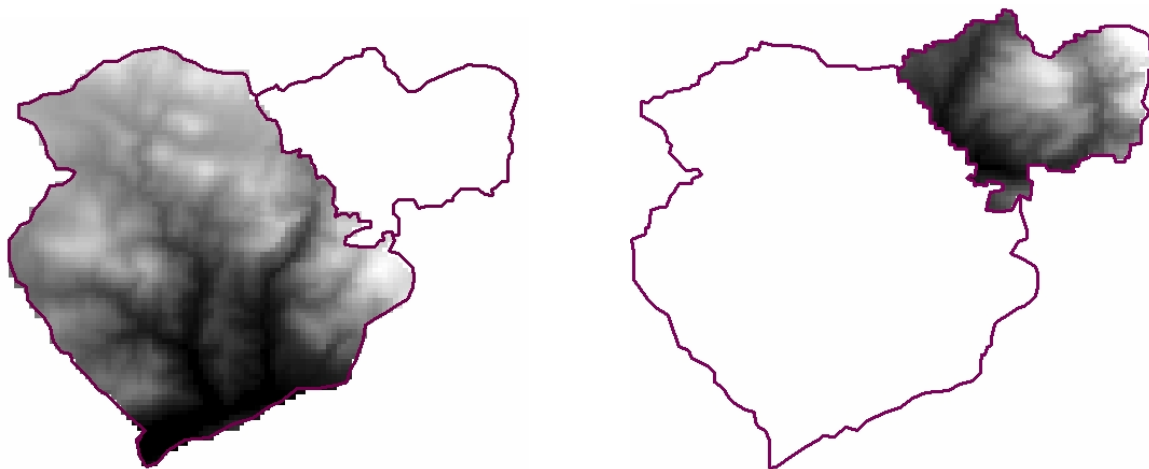
Arc: w "drive name":\ "pathname of shapefile"

Arc: shapearc "Shapefile name" "coverage name"

Arc: build "coverage name"

Arc: latticeclip "coverage name" new lattice name"

Τα δύο ψηφιακά μοντέλα εδάφους που δημιουργήθηκαν, της καμένης και της μη καμένης λεκάνης, φαίνονται στο Σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8: Ψηφιακά μοντέλα εδάφους καμένης και μη καμένης λεκάνης

Για την μη καμένη λεκάνη, τα χαρακτηριστικά που προέκυψαν μετά από νέα επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους ήταν  $L = 8932$  m,  $A = 44.127$  m,  $S_m = 26.62\%$  και  $H_{\text{μέσο}} = 648$  m.

Για την καμένη λεκάνη τα χαρακτηριστικά που προέκυψαν μετά από νέα επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους ήταν  $L = 3337$  m,  $A = 13.383$  m,  $S_m = 23.83\%$  και  $H_{\text{μέσο}} = 942$  m.

Μέσω του Arc/Info λοιπόν κατέστη δυνατόν να μετρήσουμε με ακρίβεια μεγέθη όπως την έκταση της λεκάνης, το μέγιστο μήκος υδατορεύματος της λεκάνης, τη μέση κλίση της λεκάνης κ.α. που ήταν απαραίτητα για τη συνέχεια της εργασίας μας. Αυτό φανερώνει τις μεγάλες δυνατότητες που έχουν τα ΓΣΠ στην ανάλυση υδρολογικών δεδομένων γενικότερα.

## 6 Εφαρμογή της μεθοδολογίας – Αποτελέσματα

### 6.1 Γενικά

Το θεωρητικό υπόβαθρο που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, σε συνδυασμό με τα δεδομένα που ελήφθησαν από την πρωτογενή επεξεργασία, αποτελούν τη βάση της μεθοδολογίας που ακολουθείται στις επόμενες ενότητες για την εκτίμηση του πλημμυρικού καθεστώτος της ορεινής λεκάνης του ρέματος της Γιαννούλας στην Πάρνηθα πριν και μετά τις πυρκαγιές. Στις παρακάτω παραγράφους το θέμα μελετάται με δύο προσεγγίσεις. Κριτήριο διαχωρισμού των προσεγγίσεων είναι η χωρική μεταβλητότητα των διεργασιών. Η πρώτη προσέγγιση είναι η αδρομερής στην οποία η λεκάνη είναι μια χωρική ενότητα με ενιαία υδρολογικά μεγέθη. Η δεύτερη προσέγγιση είναι η ημικατανεμημένη κατά την οποία η λεκάνη διασπάται σε δύο τμήματα με διαφορετικά υδρολογικά μεγέθη και χαρακτηριστικά (Ναλμπάντης, 2007). Για την αδρομερή προσέγγιση, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο στο Excel με το οποίο καθίσταται δυνατόν, από τα αρχικά δεδομένα βροχόπτωσης, να δημιουργηθούν υδρογραφήματα σχεδιασμού για διάφορες περιόδους επαναφοράς. Η ίδια επεξεργασία των δεδομένων γίνεται και με το λογισμικό HEC-HMS για την αδρομερή προσέγγιση για λόγους επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων. Με το HEC-HMS αντιμετωπίστηκε και η ημικατανεμημένη προσέγγιση που είναι, κατά την άποψή μας, ακριβέστερη.

### 6.2 Κατάρτιση όμβριων καμπυλών

Οι όμβριες καμπύλες καταρτίζονται σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτείνεται στο οικείο υποκεφάλαιο της μεθοδολογίας. Εφαρμόζεται η μέθοδος ενοποίησης των διαρκειών σύμφωνα με την οποία τα διαφορετικά δείγματα εντάσεων για διάφορες διάρκειες  $d$  ενοποιούνται σε ένα κοινό δείγμα. Εφαρμόστηκε η γενική εξίσωση 3.11 στην οποία ο αριθμητής  $a(T)$  δίνεται από την αντίστροφη συνάρτηση κατανομής των ακραίων υψών ή εντάσεων με παραμέτρους σύμφωνα με τα στατιστικά χαρακτηριστικά του ενοποιημένου δείγματος. Ο παρονομαστής  $b(d)$  δίνει το μέτρο μεταβολής της έντασης σύμφωνα με την διάρκεια  $d$  και περιλαμβάνει δύο παραμέτρους  $\eta$  και  $\theta$  σε μία σχέση του τύπου  $b(d) = (d + \theta)^\eta$  επιτρέποντας, έτσι, την περιγραφή της κλίσης των καμπυλών. Η ανάλυση του δείγματος των μέγιστων βροχοπτώσεων έγινε με το λογισμικό «Υδρογνώμων» και ειδικότερα με το υποσύστημα «Όμβρος» και έδωσε τις παραμέτρους του Πίνακα 6.1  $\eta$  και  $\theta$ .

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικές παράμετροι όμβριων καμπυλών  $\eta$  και  $\theta$ .

Παράμετρος όμβριων καμπυλών « $\eta$ »	0.789
Παράμετρος όμβριων καμπυλών « $\theta$ »	0.291

Αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η στατιστική κατανομή GEV (General Extreme Value), η οποία, όπως προείπαμε, θεωρείται ότι δίνει τις δυσμενέστερες τιμές βροχομετρικών υψών, με σταθερό συντελεστή σχήματος  $\kappa = 0.15$  (περίπτωση κατανομής AT-2) και εκτίμηση των υπόλοιπων παραμέτρων με τις  $L$ -ροπές. Η χρήση της εν λόγω κατανομής έχει αποδειχθεί

(Κουτσογιάννης, 1997) ότι είναι από τις πιο αντιπροσωπευτικές και δίνει μια αρκετά ακριβή εκτίμηση των όμβριων καμπυλών. Τα αριθμητικά αποτελέσματα απεικονίζονται στον Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2: Στατιστικά χαρακτηριστικά ενοποιημένου δείγματος και στατιστικές παράμετροι σύμφωνα με την κατανομή GEV μεγίστων.

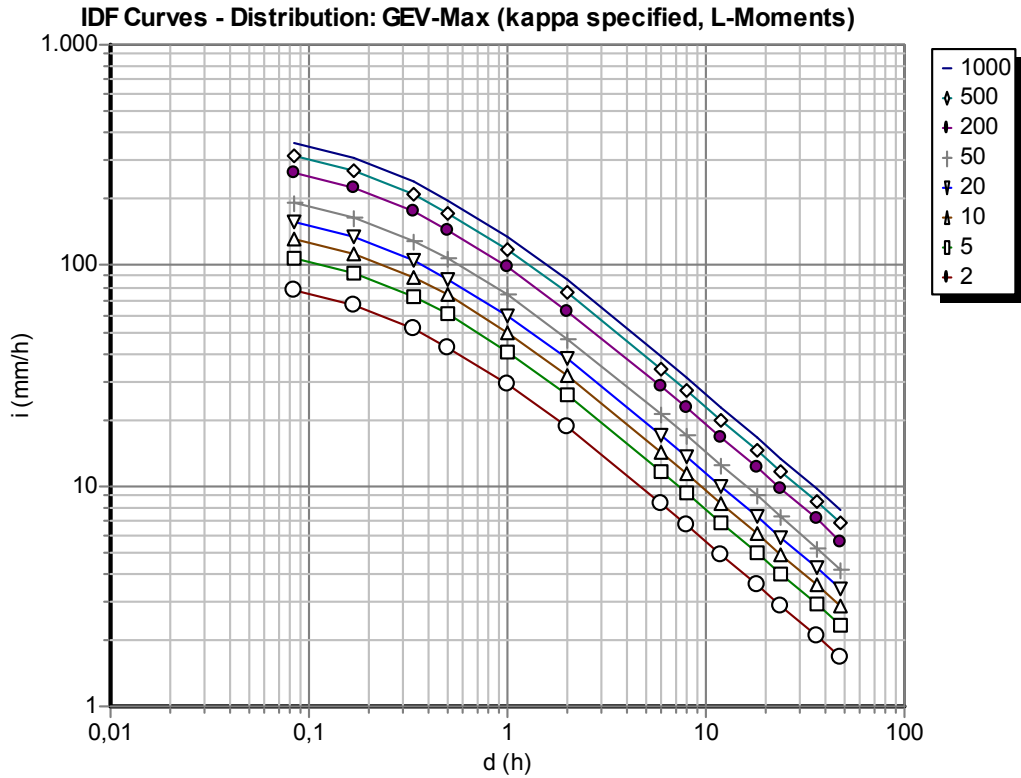
Μέση τιμή	39.5
Τυπική απόκλιση	16.4
Συντελεστής ασυμμετρίας	1.1
L-ροπή 1	39.5
L-ροπή 2	8.91
L-ροπή 3	2.09
Παράμετρος σχήματος «κ»	0.15
Παράμετρος κλίμακας «λ»	10,97
Παράμετρος θέσης «ψ»	2.85

Η γενική μορφή ενιαίας έκφρασης εξίσωσης όμβριων καμπυλών σύμφωνα με την κατανομή GEV-μεγίστων δίνεται από την εξίσωση (3.27). Αντικαθιστώντας τις παραμέτρους  $\eta$  και  $\theta$  με τις αριθμητικές τιμές του Πίνακα 6.1 καθώς και τις στατιστικές παραμέτρους  $\kappa$ ,  $\lambda$  και  $\psi$  με τις αριθμητικές τιμές του Πίνακα 6.2 προκύπτει η ενιαία εξίσωση όμβριων καμπυλών για τον νοτιοανατολικό μετεωρολογικό σταθμό της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου:

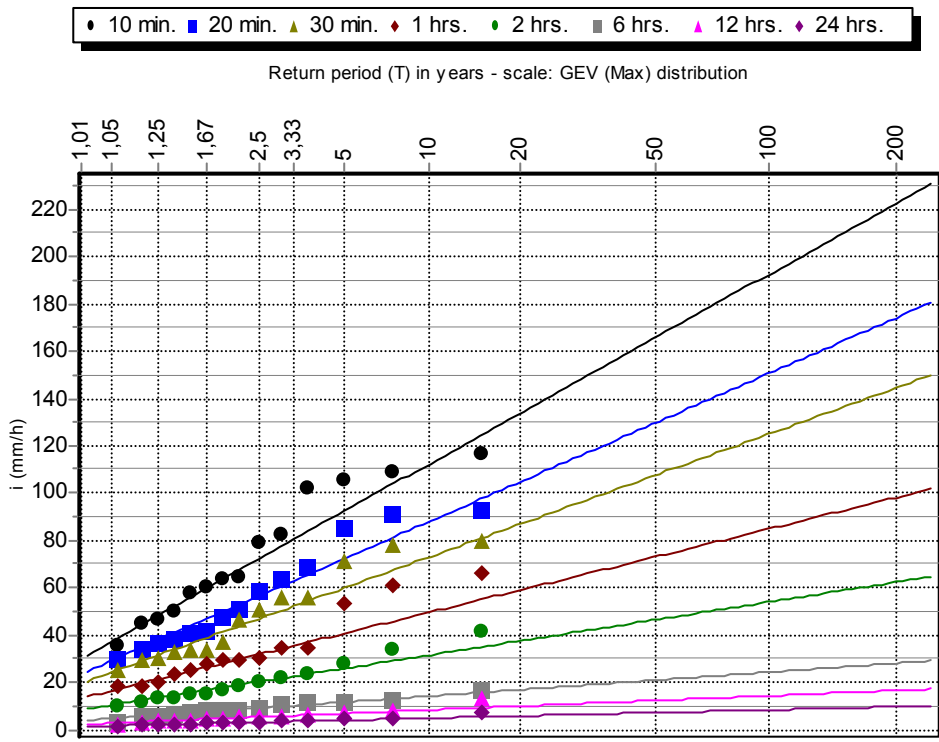
$$i = \frac{31.26 + 73.13 \left[ \left( -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{-0.15} - 1 \right]}{(d + 0.291)^{0.789}} \quad (6.1)$$

Η παραπάνω σχέση δίνει την ένταση συναρτήσει της διάρκειας επεισοδίου βροχόπτωσης και περιόδου επαναφοράς.

Χρησιμοποιώντας το υποσύστημα «Όμβρος» του Υδρογνώμονα και με εφαρμογή της σχέσης 6.1 παράγονται διάφορες όμβριες καμπύλες για τις προκαθορισμένες περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 και 10000 έτη που φαίνονται στο Σχήμα 6.1. Η προσαρμογή των τιμών της μέγιστης βροχόπτωσης (εμπειρική κατανομή) στην θεωρητική κατανομή (GEV – μεγίστων) απεικονίζεται στο σχήμα 6.2, από όπου φαίνεται ότι όσο μικρότερη η περίοδος επαναφοράς, τόσο καλύτερα προσαρμόζεται η κατανομή GEV-μεγίστων στα δείγματα μέγιστης έντασης βροχόπτωσης.



Σχήμα 6.1: Όμβριες καμπύλες για διάφορες περιόδους επαναφοράς (2 – 1000 έτη).



Σχήμα 6.2: Προσαρμογή της κατανομής GEV-μεγίστων στα δείγματα μέγιστης έντασης βροχόπτωσης 10, 20, 30 λεπτών 1, 2, 6, 12 και 24 ωρών.

### 6.3 Κατάρτιση υετογράμματος σχεδιασμού

Με βάση όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3 και με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ, κατασκευάζεται το υετόγραμμα σχεδιασμού για κάθε επιθυμητή διάρκεια. Οι παλιότερες μέθοδοι υδρολογικού σχεδιασμού γενικά, δεν λάμβαναν υπόψη τη χρονική κατανομή της βροχόπτωσης. Για να αποκτηθεί το υδρογράφημα σχεδιασμού όμως χρειάζεται και αξιόπιστο υετόγραμμα σχεδιασμού. Η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ είναι μια εύκολη και σχετικά αξιόπιστη μέθοδος παραγωγής υετογράμματος σχεδιασμού και αυτή επιλέγεται για την προσέγγισή μας, όπου η έλλειψη ιστορικών δεδομένων δεν μας επιτρέπει να έχουμε καλύτερη γνώση της κατανομής της βροχόπτωσης.

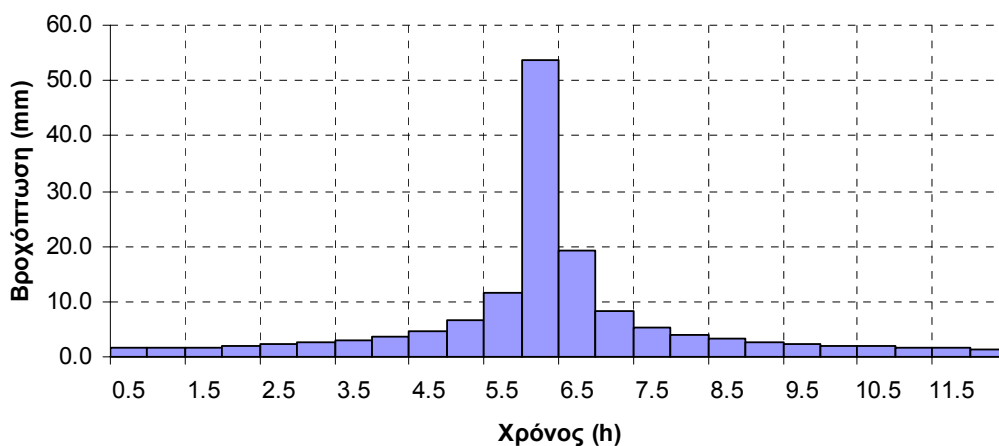
Πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι η περίοδος επαναφοράς που επιλέγεται για την εξαγωγή των όμβριων καμπυλών και για τα αποτελέσματα των επόμενων παραγράφων είναι των 50 ετών ( $T = 50$ ), που είναι και από τις συνηθέστερες περιόδους επαναφοράς σε μελέτες υδραυλικών έργων γενικότερα. Στα Παραρτήματα 1 και 2, παρατίθενται υετογράμματα και υδρογραφήματα σχεδιασμού και για άλλες περιόδους επαναφοράς (από 10-10000 έτη), για πληρέστερη προσέγγιση του θέματος.

Τα χρονικά βήματα  $\Delta t$  που εξετάζονται είναι των 30 και 15 λεπτών, τα οποία, για την εξεταζόμενη λεκάνη, θεωρούνται τα πλέον κατάλληλα για την παραγωγή τελικών πλημμυρικών υδρογραφημάτων. Το βασικό κριτήριο επιλογής αυτού του χρονικού βήματος είναι το γεγονός ότι στο μοναδιαίο υδρογράφημα να ισχύει γενικά η εμπειρική σχέση  $\Delta t \leq 0.2 \times T_p$  (Nalbantis et al., 1994).

Στους Πίνακες 6.3 και 6.4 φαίνεται η εφαρμογή της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ. Η ένταση υπολογίζεται από την όμβρια καμπύλη για κάθε μια από τις διάρκειες  $\Delta t$ ,  $2\Delta t$ ,  $3\Delta t$ ,..., (στήλη 2) και το αντίστοιχο ύψος βροχόπτωσης βρίσκεται σαν γινόμενο της έντασης βροχόπτωσης και της διάρκειας (στήλη 3). Οι τιμές της στήλης 4 προκύπτουν από διαδοχικές αφαιρέσεις της στήλης 3 που δίνουν το ύψος βροχόπτωσης για κάθε διάστημα που μελετάται (στην περίπτωση μας 0.5 h και 0.25 h). Οι τιμές της στήλης 4 αναδιανέμονται όπως φαίνεται στη στήλη 6 και η μεγαλύτερη τιμή βροχόπτωσης ανά χρονική διάρκεια (53.8 mm για βήμα 30 λεπτών και 36.3 mm για βήμα 15 λεπτών) τοποθετείται στο κεντρικό μπλοκ του υετογράμματος. Η αμέσως επόμενη μεγαλύτερη τιμή κατανέμεται δεξιά του κεντρικού μπλοκ, η επόμενη μεγαλύτερη τιμή αριστερά του κεντρικού μπλοκ κ.ο.κ. Έτσι, για περίοδο σχεδιασμού  $T = 50$  χρόνια, καταλήξαμε στα υετογράμματα σχεδιασμού διάρκειας 12 h (που είναι μια τυπική μεγάλη διάρκεια επεισοδίου βροχόπτωσης για τη λεκάνη μας) για διαστήματα μεταξύ των βροχοπτώσεων μισής ώρας και ενός τετάρτου, τα οποία και παρατίθενται στα σχήματα 6.3 και 6.4 αντίστοιχα. Στην ημικατανεμημένη προσέγγιση που πραγματοποιείται μέσω του προγράμματος HEC-HMS, ως υετόγραμμα σχεδιασμού θεωρείται μόνον το υετόγραμμα των 15 λεπτών, καθώς το χρονικό βήμα μισής ώρας δεν ικανοποιεί τον περιορισμό να είναι κάτω από 1/5 του χρόνου ανόδου του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος.

Πίνακας 6.3: Υετόγραμμα σχεδιασμού για  $T = 50$  σε διαστήματα 30 λεπτών με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ

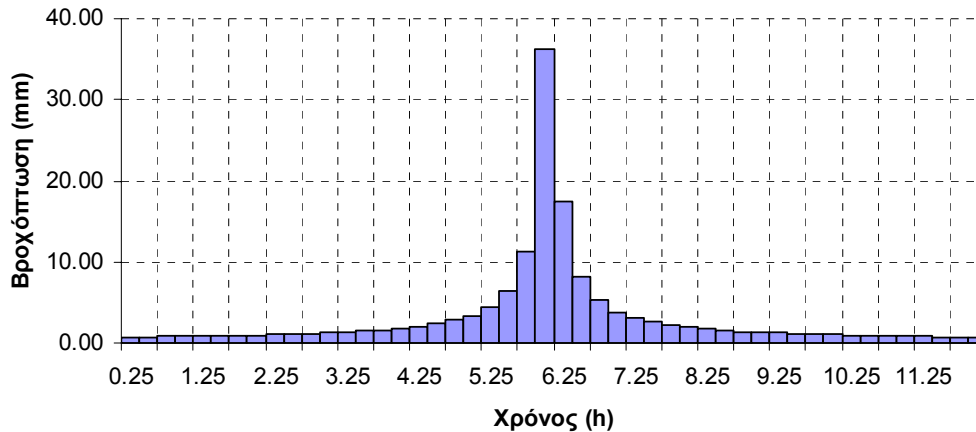
Διάρκεια (h)	Ένταση (mm/h)	Αθρ.βροχ (mm)	Βροχ.ανά διαστ. (mm)	Χρόνος (h)	Βροχ. (mm)
0	236.86	0.00			
0.5	107.61	53.80	53.80	0 έως 0.5	1.5
1	73.11	73.11	19.31	0.5 έως 1	1.6
1.5	56.47	84.71	11.59	1 έως 1.5	1.8
2	46.50	93.00	8.29	1.5 έως 2	2.0
2.5	39.79	99.48	6.48	2 έως 2.5	2.2
3	34.94	104.82	5.34	2.5 έως 3	2.5
3.5	31.25	109.38	4.56	3 έως 3.5	2.9
4	28.34	113.37	3.98	3.5 έως 4	3.5
4.5	25.98	116.91	3.55	4 έως 4.5	4.6
5	24.02	120.12	3.20	4.5 έως 5	6.5
5.5	22.37	123.04	2.93	5 έως 5.5	11.6
6	20.96	125.74	2.70	5.5 έως 6	53.8
6.5	19.73	128.24	2.50	6 έως 6.5	19.3
7	18.65	130.58	2.34	6.5 έως 7	8.3
7.5	17.70	132.77	2.19	7 έως 7.5	5.3
8	16.86	134.84	2.07	7.5 έως 8	4.0
8.5	16.09	136.80	1.96	8 έως 8.5	3.2
9	15.41	138.66	1.86	8.5 έως 9	2.7
9.5	14.78	140.43	1.77	9 έως 9.5	2.3
10	14.21	142.13	1.69	9.5 έως 10	2.1
10.5	13.69	143.75	1.62	10 έως 10.5	1.9
11	13.21	145.31	1.56	10.5 έως 11	1.7
11.5	12.77	146.81	1.50	11 έως 11.5	1.6
12	12.35	148.25	1.44	11.5 έως 12	1.4



Σχήμα 6.3. Υετόγραμμα σχεδιασμού ( $T = 50$  και χρονικό βήμα 0.5 h) πριν τις πυρκαγιές για τη λεκάνη μελέτης

Πίνακας 6.4: Υετόγραμμα σχεδιασμού για  $T = 50$  σε διαστήματα 15 λεπτών με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ

Διάρκεια (h)	Ένταση (mm/h)	Αθρ.βροχ (mm)	Βροχ.ανά διαστ. (mm)	Χρόνος (h)	Βρόχ. (mm)
0	236.86	0.00			
0.25	145.22	36.30	36.30	0-0.25	0.73
0.5	107.61	53.80	17.50	0.25-0.5	0.76
0.75	86.64	64.98	11.18	0.5-0.75	0.79
1	73.11	73.11	8.13	0.75-1	0.82
1.25	63.58	79.48	6.37	1-1.25	0.86
1.5	56.47	84.71	5.23	1.25-1.5	0.90
1.75	50.94	89.14	4.44	1.5-1.75	0.94
2	46.50	93.00	3.86	1.75-2	0.99
2.25	42.85	96.42	3.42	2-2.25	1.05
2.5	39.79	99.48	3.07	2.25-2.5	1.11
2.75	37.19	102.27	2.79	2.5-2.75	1.19
3	34.94	104.82	2.56	2.75-3	1.27
3.25	32.98	107.19	2.36	3-3.25	1.37
3.5	31.25	109.38	2.20	3.25-3.5	1.49
3.75	29.72	111.44	2.05	3.5-3.75	1.64
4	28.34	113.37	1.93	3.75-4	1.82
4.25	27.10	115.19	1.82	4-4.25	2.05
4.5	25.98	116.91	1.73	4.25-4.5	2.36
4.75	24.96	118.55	1.64	4.5-4.75	2.79
5	24.02	120.12	1.56	4.75-5	3.42
5.25	23.16	121.61	1.49	5-5.25	4.44
5.5	22.37	123.04	1.43	5.25-5.5	6.37
5.75	21.64	124.42	1.37	5.5-5.75	11.18
6	20.96	125.74	1.32	5.75-6	36.30
6.25	20.32	127.01	1.27	6-6.25	17.50
6.5	19.73	128.24	1.23	6.25-6.5	8.13
6.75	19.17	129.43	1.19	6.5-6.75	5.23
7	18.65	130.58	1.15	6.75-7	3.86
7.25	18.16	131.69	1.11	7-7.25	3.07
7.5	17.70	132.77	1.08	7.25-7.5	2.56
7.75	17.27	133.82	1.05	7.5-7.75	2.20
8	16.86	134.84	1.02	7.75-8	1.93
8.25	16.46	135.83	0.99	8-8.25	1.73
8.5	16.09	136.80	0.97	8.25-8.5	1.56
8.75	15.74	137.74	0.94	8.5-8.75	1.43
9	15.41	138.66	0.92	8.75-9	1.32
9.25	15.09	139.56	0.90	9-9.25	1.23
9.5	14.78	140.43	0.88	9.25-9.5	1.15
9.75	14.49	141.29	0.86	9.5-9.75	1.08
10	14.21	142.13	0.84	9.75-10	1.02
10.25	13.95	142.95	0.82	10-10.25	0.97
10.5	13.69	143.75	0.80	10.25-10.5	0.92
10.75	13.45	144.54	0.79	10.5-10.75	0.88
11	13.21	145.31	0.77	10.75-11	0.84
11.25	12.98	146.07	0.76	11-11.25	0.80
11.5	12.77	146.81	0.74	11.25-11.5	0.77
11.75	12.56	147.54	0.73	11.5-11.75	0.74
12	12.35	148.25	0.72	11.75-12	0.72



Σχήμα 6.4. Υετόγραμμα σχεδιασμού ( $T = 50$  και χρονικό βήμα  $0.25$  h) πριν τις πυρκαγιές για την λεκάνη μελέτης

## 6.4 Υπολογισμός περισσέυματος βροχόπτωσης

Τα βροχομετρικά ύψη που σχηματίστηκαν όπως περιγράφηκε παραπάνω απαιτείται τώρα να μετατραπούν σε περισσέυματα βροχόπτωσης. Η μετατροπή αυτή είναι αναγκαία καθώς τα περισσέυματα βροχόπτωσης ευθύνονται για τα πλημμυρικά φαινόμενα.

Από τις μεθόδους που είδαμε στο Κεφάλαιο 3 για τον προσδιορισμό των απωλειών και του περισσέυματος βροχόπτωσης προτιμήθηκε η μέθοδος SCS. Η μέθοδος αυτή ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπως η δική μας που δεν υπάρχουν μετρήσεις για τις διάφορες απώλειες. Η υπηρεσία SCS υπολογίζει το ύψος του περισσέυματος βροχόπτωσης από μια δεδομένη βροχόπτωση με τη βοήθεια τριών μεταβλητών: του ύψους βροχής, της αρχικής κατάστασης υγρασίας του εδάφους και μιας παραμέτρου του υδρολογικού συμπλόκου εδάφους – καλύμματος που εκφράζεται με τον αριθμό καμπύλης (Curve Number) CN.

Έγινε η παραδοχή ότι οι αρχικές απώλειες είναι 20% των συνολικών απωλειών, δηλαδή της διαφοράς μεταξύ βροχής ( $h$ ) και περισσέυματος βροχόπτωσης ( $h_r$ ).

Για την αδρομερή προσέγγιση ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

Ο αριθμός καμπύλης CN, προσεγγίστηκε από πίνακες του National Handbook της SCS που παρατίθενται στον Maidment (1993), όπως και στον Πίνακα 3.3. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στην επιλογή της ομάδας εδάφους της περιοχής, η οποία καθορίζει και τον ακριβή CN. Στοιχεία αντλήθηκαν από εδαφοτομές που μας δόθηκαν από το Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών και από χάρτη του ΙΓΜΕ (φύλλο Αθήνα-Ελευσίς) (βλ. Παράρτημα 3). Η ανάλυση των εδαφοτομών για τον προσδιορισμό του τύπου εδάφους έγινε βάσει του «τριγώνου» κατάταξης εδαφών της εδαφολογίας. Επίσης, πληροφορία πάρθηκε από ερευνητικές γεωτρήσεις που έχουν γίνει παλιότερα στην περιοχή για λογαριασμό της ΕΥΔΑΠ, σε συνδυασμό με τα γραφόμενα σε παλιότερες υδραυλικές – υδρολογικές μελέτες του ΥΠΕΧΩΔΕ για διευθετήσεις του ρέματος. Όλα αυτά δείχνουν ότι το έδαφος που κυριαρχεί στη λεκάνη είναι ο τύπος εδάφους B, δηλαδή με μέσους ρυθμούς διήθησης όπως αμμώδης πηλός, όμως η ύπαρξη σημαντικού ποσοστού αργίλου σε κάποια σημεία στη μορφή αργιλοάμμου ή αργιλοπηλού μας αναγκάζει να λάβουμε υπόψη και τον τύπο εδάφους C.



Αποφασίστηκε ο τύπος εδάφους να είναι βάσει των εδαφοτομών κατά 67% τύπος Β και 33% τύπος C. Για τον προσδιορισμό, όμως, του ακριβούς αριθμού καμπύλης, είναι απαραίτητη και η γνώση των χρήσεων γης της περιοχής. Από το Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων μας δόθηκαν από το πρόγραμμα Corine και σε μορφή ΓΣΠ οι χρήσεις γης. Σε συνδυασμό με δασικό χάρτη (φύλλο Αθήνα-Ελευσίς) διαπιστώθηκε ότι οι χρήσεις γης της ορεινής λεκάνης προ της πυρκαγιάς ήταν κατά προσέγγιση οι εξής:

- Δασική 54%
- Θαμνώδεις-δασώδεις εκτάσεις 35%
- Βοσκότοποι 6%
- Καλλιέργειες 5%

Έτσι, με αυτά τα δεδομένα, ο αριθμός CN για κατηγορία προγενέστερης υγρασίας τύπου II υπολογίστηκε με τη διαδικασία που προτείνεται από τον Chow (1988) και η οποία φαίνεται στον Πίνακα 6.5. (σημειώνεται ότι ως κατάσταση υδρολογικών συνθηκών επιλέχθηκε η μέτρια ως μια μέση κατάσταση). Το ποσοστό χρήσης γης κάθε κατηγορίας της λεκάνης που αντιστοιχεί σε κάθε τύπο εδάφους, πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό CN που της αντιστοιχεί. Τα αθροίσματα για κάθε τύπο εδάφους προστίθενται και μεταξύ τους και η διαίρεση με 100 δίνει το σταθμισμένο μ.ο. του αριθμού καμπύλης CN πριν τις πυρκαγιές.

Πίνακας 6.5. CN πριν τις πυρκαγιές

Χρήση γης	Υδρολογικός τύπος εδάφους					
	B			C		
	Ποσοστό (%)	CN	CN × (%)	Ποσοστό (%)	CN	CN × (%)
Δασική	36.018	60	2161.08	17.982	73	1312.686
Θαμνώδης	23.345	56	1307.32	11.655	70	815.85
Βοσκότοποι	4.002	69	276.138	1.998	79	157.842
Καλλιέργειες	3.335	76	253.46	1.665	83	138.195
	66.7		3997.998	33.3		2424.573
		Σταθμισμένος M.O.			CN = 64.22571	

Υπολογίστηκε λοιπόν ο αριθμός CN πριν τις πυρκαγιές για τύπο προγενέστερης υγρασίας II (CN<sub>II</sub>) CN = 64.22.

Μετά τις πυρκαγιές, όπως φαίνεται και από τη βιβλιογραφία, ο αριθμός καμπύλης αυξάνεται για την ίδια χρήση γης. Η αύξηση αυτή είναι λογική μιας και η απώλεια της φυτοκάλυψης μειώνει την περατότητα του εδάφους, με αποτέλεσμα το περίσσειμα βροχόπτωσης να είναι μεγαλύτερο για τις ίδιες συνθήκες. Ο αριθμός CN λοιπόν σε μελέτες όπως η δική μας που σκοπό έχουν να εκτιμήσουν πλημμυρικές παροχές λόγω αλλαγής της μορφής του εδάφους από φωτιές, έχει μεγάλη σημασία και επηρεάζει καθοριστικά τους υπολογισμούς. Στις προσεγγίσεις που περιγράφονται πιο κάτω, εκτιμάται η αύξηση της πλημμυρικής παροχής μέσω μετρήσεων στο πεδίο.

Για τον υπολογισμό στη συνέχεια των περισσευμάτων βροχόπτωσης, από την σχέση 3.38 υπολογίζεται το μέγεθος S, δηλαδή η δυναμικά μέγιστη κατακράτηση και από την 3.35 καθίσταται δυνατόν να υπολογιστούν τα περισσεύματα βροχόπτωσης για κάθε διάστημα Δt.

Οι υπολογισμοί φαίνονται στους παρακάτω πίνακες 6.6 και 6.7 για διαστήματα 30 και 15 λεπτών αντίστοιχα. Στη στήλη 2 φαίνονται οι τιμές βροχόπτωσης όπως υπολογίστηκαν από

το υετόγραμμα σχεδιασμού στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Στη στήλη 3 φαίνεται η αθροιστική βροχόπτωση, ενώ η στήλη 4 προκύπτει από την εφαρμογή της σχέσης 3.35 όπως ειπώθηκε και παραπάνω. Ειδικά για τις τιμές της στήλης 3 από χρόνο 0 – 5 h, επειδή  $h < 0.2S = 29.06$  mm για 30 λεπτά, οι αντίστοιχες τιμές στη στήλη 4 είναι μηδέν. Το ζητούμενο περίσσευμα βροχόπτωσης (στήλη 5), υπολογίζεται από διαδοχικές αφαιρέσεις των τιμών του αθροιστικού περισσεύματος.

Οι απώλειες ισούνται με τη διαφορά της αθροιστικής βροχόπτωσης μείον το αθροιστικό περίσσευμα δηλαδή 55.03 mm.

Πίνακας 6.6: Υπολογισμός περισσευμάτων βροχόπτωσης για βήμα 30 λεπτών

Χρόνος (h)	Βροχόπτωση (mm)	Αθρ. Βροχ (mm)	Αθρ.Περίσσευμα (mm)	Περίσσευμα (mm)
0.00	0.00	0.00		
0.50	1.50	1.50	6.26	
1.00	1.62	3.12	5.45	
1.50	1.77	4.90	4.64	
2.00	1.96	6.86	3.83	
2.50	2.19	9.05	3.03	
3.00	2.50	11.55	2.25	
3.50	2.93	14.48	1.50	
4.00	3.55	18.02	0.81	
4.50	4.56	22.58	0.24	
5.00	6.48	29.06	0.00	0.99
5.50	11.59	40.66	0.99	20.08
6.00	53.80	94.46	21.08	11.10
6.50	19.31	113.77	32.18	5.18
7.00	8.29	122.06	37.37	3.45
7.50	5.34	127.41	40.82	2.63
8.00	3.98	131.39	43.45	2.15
8.50	3.20	134.59	45.59	1.83
9.00	2.70	137.29	47.42	1.60
9.50	2.34	139.63	49.02	1.43
10.00	2.07	141.70	50.44	1.29
10.50	1.86	143.56	51.73	1.18
11.00	1.69	145.25	52.92	1.09
11.50	1.56	146.81	54.01	1.02
12.00	1.44	148.25	55.03	
SUM	148.25			55.03

Πίνακας 6.7: Υπολογισμός περισσευμάτων βροχόπτωσης για βήμα 15 λεπτών

Χρόνος (h)	Βροχόπτωση (mm)	Αθρ. Βροχ (mm)	Αθρ.Περίσσευμα (mm)	Περίσσευμα (mm)
0.00	0.00	0.00		
0.25	0.73	0.73	6.67	
0.50	0.76	1.49	6.27	
0.75	0.79	2.27	5.87	
1.00	0.82	3.09	5.46	
1.25	0.86	3.95	5.06	
1.50	0.90	4.85	4.66	
1.75	0.94	5.79	4.26	
2.00	0.99	6.78	3.86	
2.25	1.05	7.83	3.46	
2.50	1.11	8.94	3.07	
2.75	1.19	10.13	2.68	
3.00	1.27	11.40	2.29	
3.25	1.37	12.78	1.91	
3.50	1.49	14.27	1.54	
3.75	1.64	15.91	1.19	
4.00	1.82	17.74	0.85	
4.25	2.05	19.79	0.54	
4.50	2.36	22.15	0.28	
4.75	2.79	24.94	0.08	
5.00	3.42	28.35	0.00	0.14
5.25	4.44	32.79	0.14	0.64
5.50	6.37	39.15	0.77	2.19
5.75	11.18	50.33	2.97	14.06
6.00	36.30	86.64	17.03	9.43
6.25	17.50	104.14	26.46	4.81
6.50	8.13	112.27	31.27	3.22
6.75	5.23	117.49	34.48	2.43
7.00	3.86	121.35	36.91	1.97
7.25	3.07	124.42	38.88	1.66
7.50	2.56	126.97	40.54	1.44
7.75	2.20	129.17	41.98	1.28
8.00	1.93	131.10	43.25	1.15
8.25	1.73	132.83	44.40	1.05
8.50	1.56	134.39	45.45	0.97
8.75	1.43	135.82	46.42	0.90
9.00	1.32	137.14	47.32	0.84
9.25	1.23	138.37	48.16	0.79
9.50	1.15	139.52	48.94	0.74
9.75	1.08	140.60	49.69	0.70
10.00	1.02	141.62	50.39	0.67
10.25	0.97	142.59	51.06	0.64
10.50	0.92	143.51	51.70	0.61
10.75	0.88	144.38	52.31	0.59
11.00	0.84	145.22	52.90	0.56
11.25	0.80	146.03	53.46	0.54
11.50	0.77	146.80	54.00	0.52
11.75	0.74	147.54	54.52	0.51
12.00	0.72	148.25	55.03	
SUM		148.25		55.03

Για την ημικατανεμημένη προσέγγιση τα περισσεύματα βροχόπτωσης προκύπτουν αυτόματα από το πρόγραμμα, ύστερα από την εισαγωγή δεδομένων όπως οι αρχικές απώλειες και ο αριθμός CN. Ως αρχικές απώλειες τίθεται πάντα 0.2S. Πριν τις πυρκαγιές ο σταθμισμένος μέσος όρος του CN της υπολεκάνης 1 προκύπτει CN = 64.12 (ποσοστά χρήσεων γης πλέον 45.5% θαμνώδης, 40.5% δασική, 8% βοσκότοποι, 6% καλλιέργειες) και της υπολεκάνης 2 προκύπτει CN = 64.3 (πάντα 67% τύπου B και 33% τύπου C) ως πλήρως δασική. Μετά τις πυρκαγιές, το CN της δασικής καμένης έκτασης αυξάνεται και προκύπτει νέος σταθμισμένος μέσος όρος που εισάγεται στο λογισμικό με ταυτόχρονη μεταβολή του  $t_c$ , για να εξαχθούν οι τελικές πλημμυρικές παροχές. Περισσότερα θα αναφερθούν στα υποκεφάλαια 6.6 και 6.7.

## 6.5 Προσδιορισμός συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος

Με χρήση του συνθετικού μοναδιαίου αδιάστατου υδρογραφήματος της SCS υπάρχει η δυνατότητα να εξαχθεί το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα βάσει μόνον των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της λεκάνης. Το υδρογράφημα της μεθόδου αυτής είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις όπως η δική μας όπου τα δεδομένα απορροής είναι περιορισμένα.

Στην αδρομερή προσέγγιση χρειάζεται να εξαχθεί το συνθετικό υδρογράφημα της συνολικής λεκάνης για χρονικό βήμα 15 και 30 λεπτών. Στην ημικατανεμημένη προσέγγιση εξάγεται το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα για κάθε μια από τις λεκάνες (καμένη και μη καμένη). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε μιας από τις λεκάνες υπολογίστηκαν όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 5. Το χρονικό βήμα σε αυτή την περίπτωση θα είναι 15 λεπτά, καθώς για μεγαλύτερο βήμα το λογισμικό HEC-HMS εξάγει σφάλμα, μιας που πρέπει το χρονικό βήμα να είναι μικρότερο του 1/5 του χρόνου ανόδου του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος.

Πρώτο βήμα είναι ο προσδιορισμός του χρόνου συγκέντρωσης  $t_c$ . Αυτός μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση Giandotti (3.43), που είναι από τις συχνότερα χρησιμοποιούμενες σχέσεις εύρεσης του χρόνου συγκέντρωσης στον ελλαδικό χώρο. Ο χρόνος συγκέντρωσης είναι εύκολο να υπολογιστεί δεδομένου ότι, από την επεξεργασία που έγινε με ΓΣΠ όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, προσδιορίστηκαν μεγέθη όπως το μέγιστο μήκος υδατορεύματος στη λεκάνη και η μέση κλίση (%). Στον πίνακα 6.8 παρατίθενται συγκεντρωτικά τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν ύστερα από την επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους βάσει των οποίων υπολογίζονται οι αντίστοιχοι χρόνοι συγκέντρωσης. Υπενθυμίζεται ότι το υψόμετρο της ορεινής λεκάνης κυμαίνεται από 134-1201 m.

Πίνακας 6.8 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και χρόνοι συγκέντρωσης λεκανών για τις δύο προσεγγίσεις

Προσέγγιση	A (km <sup>2</sup> )	L (km)	S <sub>m</sub> (m/m)	H <sub>μέσο</sub> (m)	t <sub>c</sub> (h)
Αδρομερής					
Συνολική λεκάνη	57.6	12.269	0.258	712m	2.52
Ημικατανεμημένη					
Καμένη λεκάνη	13.383	3.337	0.238	942	2.2
Μη καμένη λεκάνη	44.217	8.932	0.266	648	1.46

Ο χρόνος υστέρησης υπολογίζεται ως  $t_p = 0.6t_c$ .

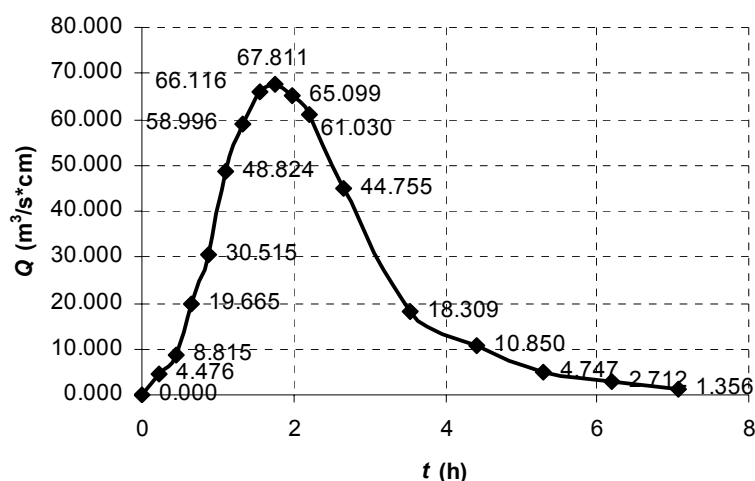
Από την (3.47) βρίσκεται ο χρόνος ανόδου του συνθετικού υδρογραφήματος  $T_p$ .

Από την (3.46) βρίσκεται η παροχή αιχμής  $Q_p$ , με συντελεστή  $C_u = 2.08$  σταθερό.

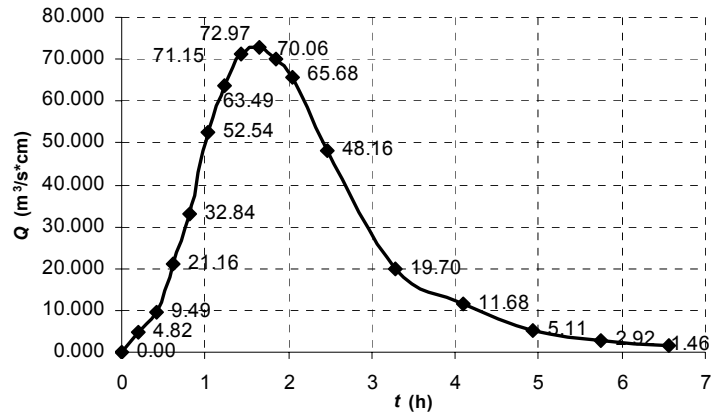
Στον Πίνακα 6.9 φαίνονται οι χρόνοι ανόδου και οι παροχές αιχμής για όλες τις περιπτώσεις της εφαρμογής μας.

Προσέγγιση	$T_p$ (h)	$Q_p$ (m <sup>3</sup> /s*cm)
Αδρομερής		
Συνολική λεκάνη (βήμα 30 λεπτών)	1.76	67.81
(βήμα 15 λεπτών)	1.64	72.97
Ημικατανεμημένη		
Καμένη λεκάνη	1.00	119.69
Μη-καμένη λεκάνη	1.44	82.91

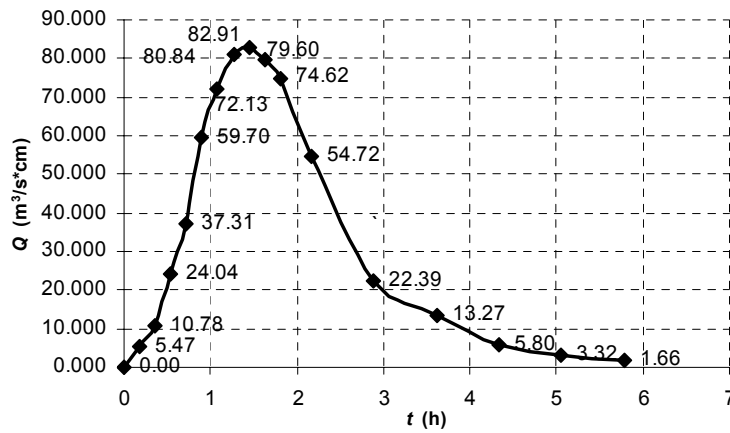
Στο μοναδιαίο υδρογράφημα, η παροχή εκφράζεται από το λόγο της παροχής  $Q$  προς την παροχή αιχμής  $Q_p$ , και ο χρόνος από το λόγο του χρόνου  $t$  προς το χρόνο ανόδου του μοναδιαίου υδρογραφήματος  $T_p$ . Πολλαπλασιάζοντας τις τιμές στον οριζόντιο άξονα με  $T_p$  και τις τιμές στον κάθετο άξονα με  $Q_p$  το αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα του σχήματος 3.4 μετατρέπεται στις απαιτούμενες διαστάσεις. Το τελευταίο βήμα είναι η ψηφιοποίηση του διαστατοποιημένου πλέον υδρογραφήματος, ώστε βάσει του εκάστοτε χρονικού διαστήματος  $t_r$  να υπολογιστούν οι τιμές του μοναδιαίου υδρογραφήματος συναρτήσεως του χρόνου για την περίπτωση της εφαρμογής μας. Στα επόμενα σχήματα 6.5 ως 6.8 παρατίθενται τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα για την αδρομερή προσέγγιση (χρονικά βήματα 15 και 30 λεπτών) και για την ημικατανεμημένη (υπολεκάνες 1 και 2, χρονικό βήμα 15 λεπτών).



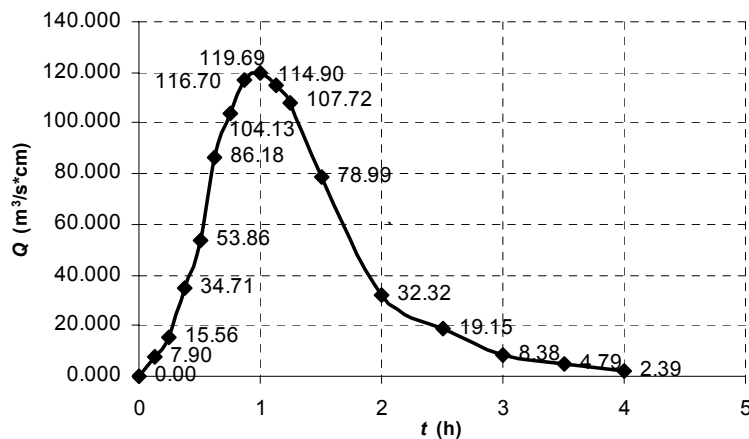
Σχήμα 6.5: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα για την αδρομερή προσέγγιση και χρονικό βήμα 30 λεπτών



Σχήμα 6.6: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα για την αδρομερή προσέγγιση και χρονικό βήμα 15 λεπτών



Σχήμα 6.7: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα για την ημικατανομημένη προσέγγιση (καμένη υπολεκάνη) και χρονικό βήμα 15 λεπτών



Σχήμα 6.8: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα για την ημικατανομημένη προσέγγιση (καμένη υπολεκάνη) και χρονικό βήμα 15 λεπτών

## 6.6 Προσδιορισμός Υδρογραφήματος Άμεσης Απορροής για πραγματικό γεγονός

Η διαδικασία υπολογισμών έχει ως βάση μια μέτρηση της πλημμυρικής στάθμης που πραγματοποιήσαμε στο πεδίο. Υπολογίζεται η πλημμυρική παροχή κατά Manning και, από τα βροχομετρικά ύψη για την ημερομηνία που έγιναν οι μετρήσεις, βρίσκεται το πραγματικό υετόγραμμα βάσει του οποίου κατασκευάζεται δοκιμαστικό υδρογράφημα άμεσης απορροής για αυτό το γεγονός βροχόπτωσης. Βρίσκοντας τον αριθμό καμπύλης απορροής που αντιστοιχεί στη «σύμπτωση» της μετρηθείσας παροχής στο πεδίο με την παροχή αιχμής του υδρογραφήματος άμεσης απορροής με ταυτόχρονη μεταβολή και του χρόνου συγκέντρωσης, και χρησιμοποιώντας το νέο CN για τον υπολογισμό υδρογραφήματος σχεδιασμού, καθίσταται δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα για το πλημμυρικό καθεστώς της λεκάνης μετά τις πυρκαγιές.

Αναλυτικότερα η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής:

Πραγματοποιήθηκε καταρχάς υπολογισμός της πλημμυρικής παροχής αιχμής στο πεδίο. Αυτή αντιστοιχεί σε πλημμυρικό γεγονός που εμφανίστηκε εξαιτίας μιας ισχυρής βροχόπτωσης της 9ης Δεκεμβρίου 2007. Οι μετρήσεις στο πεδίο περιλάμβαναν μέτρηση του πλάτους του υδατορεύματος, της κλίσης των πρανών ώστε να προσεγγιστεί η διατομή με τραπεζοειδή μορφή και του ύψους της στάθμης του νερού στο σημείο εξόδου του ρέματος από την ορεινή λεκάνη. Αυτό ήταν προσβάσιμο, όντας πλησίον επαρχιακού δρόμου του Ασπροπύργου. Στο σημείο εξόδου το υδατόρευμα διερχόταν διαμέσου οχετού κάτω από τον επαρχιακό δρόμο.

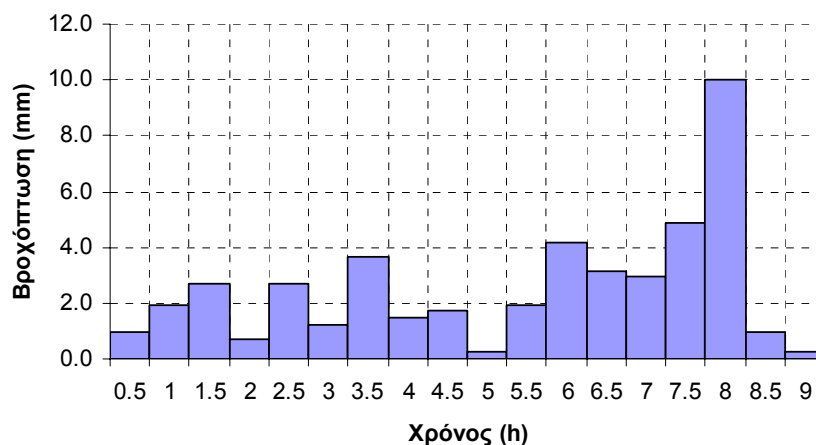
Για την εύρεση του ύψους της στάθμης του πλημμυρικού φαινομένου εκτιμήθηκαν λεγόμενα κατοίκων της περιοχής που ήταν αυτόπτες μάρτυρες την ημερομηνία αυτή, καθώς η ταχύτητα εμφάνισης του πλημμυρικού φαινομένου – σε μισή ή μία ώρα το φαινόμενο έχει τελειώσει- δεν μας επέτρεψαν να το παρατηρήσουμε ιδίως όμμασι, αλλά εντοπίστηκαν μόνο κάποια ίχνη στα πρανή και επί του οχετού. Το προσεγγιστικό ύψος που έφτασε τις πρωινές ώρες της 9ης Δεκεμβρίου η στάθμη του ρέματος ήταν από μαρτυρίες 50 cm.

Το γεγονός της 9ης Δεκεμβρίου ήταν ένα αρκετά ισχυρό νυχτερινό επεισόδιο ύψους 37.8 mm, όπως μετρήθηκε από τον ΑΜΣ Ζωγράφου. Η ολική ημερήσια βροχόπτωση την εν λόγω ημέρα ήταν 45 mm. Βρέθηκε επίσης η ημερήσια ολική βροχόπτωση από το σταθμό Τατοΐου, όπως μας δόθηκε από την ΕΜΥ για εκείνη την ημέρα. Στο σταθμό εκείνο το ολικό ύψος βροχόπτωσης ήταν 55 mm. Αυτό επέτρεψε την αναγωγή των υψών βροχόπτωσης ανά δεκάλεπτο από τον ΑΜΣ Ζωγράφου σε ύψη του Τατοΐου πολλαπλασιάζοντας με τον κατάλληλο συντελεστή. Αυτό έγινε για να προσεγγίσουμε όσο το δυνατόν καλύτερα το βροχομετρικό καθεστώς στην Πάρνηθα την εν λόγω ημέρα, μιας καθόσον ο σταθμός Τατοΐου βρίσκεται πλησιέστερα σε αυτήν.

Βάσει αυτών των δεδομένων κατασκευάστηκε το «πραγματικό» υετόγραμμα του γεγονότος, που θα χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του νέου αριθμού καμπύλης και σε επόμενο βήμα της πλημμυρικής παροχής μετά τις πυρκαγιές. Σημειωτέον ότι η εν λόγω βροχή ήταν βροχή περιόδου επαναφοράς  $T = 1.5$  έτη. Στον παρακάτω πίνακα 6.10 φαίνονται τα ύψη βροχόπτωσης ανά μισή ώρα καθώς και το εν λόγω υετόγραμμα (σχήμα 6.9):

Πίνακας 6.10: Πλημμυρικό γεγονός 9ης Δεκεμβρίου 2007: Πραγματικά ύψη βροχόπτωσης ανά μισή ώρα

Χρόνος (h)	Βροχόπτωση (mm)	Χρόνος (h)	Βροχόπτωση (mm)
0.5	1.0	5	0.2
1	2.0	5.5	2.0
1.5	2.7	6	4.1
2	0.7	6.5	3.2
2.5	2.7	7	2.9
3	1.2	7.5	4.9
3.5	3.7	8	10.0
4	1.5	8.5	1.0
4.5	1.7	9	0.2



Σχήμα 6.9: Πραγματικό υετόγραμμα για το πλημμυρικό γεγονός της 9ης Δεκεμβρίου 2007

Η πλημμυρική παροχή υπολογίστηκε βάσει της σχέσης του Manning (3.50), η οποία ενδείκνυται σε περιπτώσεις περιορισμένων δεδομένων όπως η δική μας. Έτσι, για πλάτος της κοίτης στο σημείο εξόδου της λεκάνης 7.5 m και πλημμυρική στάθμη 0.5 m όπως προαναφέρθηκε, υπολογίζεται η διατομή  $A_w = 6.23 \text{ m}^2$  και η περίμετρος  $P = 10.63 \text{ m}$ . Η υδραυλική ακτίνα προκύπτει σαν ο λόγος αυτών των δύο μεγεθών, συνεπώς  $R = 0.58 \text{ m}$ .

Η κλίση του πυθμένα και της γραμμής ενέργειας υπολογίστηκε από το μέσο όρο των τιμών που προέκυψαν από το χάρτη 1:50000 της ΓΥΣ και από την επεξεργασία με ΓΣΠ ως ο λόγος της διαφοράς του υψομέτρου του σημείου εξόδου και του υψομέτρου ενός σημείου σε σταση 1 km από την έξοδο προς την απόσταση αυτής. Προκύπτει ότι  $S_f = (215-134.1)/1000 = 0.08 \text{ m/m}$ .

Η τιμή του συντελεστή Manning εξαρτάται από το υλικό της κοίτης. Επιλέχθηκε η τιμή για πρηνή με βλάστηση στις όχθες, οπότε  $n = 0.040$ . Έτσι, εκτιμήθηκε η τιμή της παροχής αιχμής της πλημμύρας κατά Manning και βρέθηκε  $Q_p = 17.3 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Απαιτείται τώρα, από τα δεδομένα του πραγματικού υετογράμματος, να υπολογιστούν τα περισσεύματα βροχόπτωσης για αυτό το γεγονός, με τη γνωστή μεθοδολογία κατά SCS. Ο τύπος προηγούμενης εδαφικής υγρασίας για το γεγονός αυτό είναι AMC<sub>i</sub>, μιας και η βροχόπτωση τις 5 προηγούμενες ημέρες (4-8 Δεκεμβρίου) είναι μικρότερη από 13 mm.

Από τα περισσεύματα (πίνακας 6.11) και τις τεταγμένες του συνθετικού υδρογραφήματος, υπολογίζονται οι τεταγμένες του πραγματικού υδρογραφήματος άμεσης απορροής βάσει της σχέσης (3.40) και βρίσκεται η παροχή αιχμής μέσω του μοντέλου. Φαίνεται ότι για το πραγματικό υετόγραμμα βροχόπτωσης, το μεγαλύτερο ποσοστό της βροχής «καταναλώθηκε» με μορφή απωλειών.

Πίνακας 6.11: Περισσεύματα βροχόπτωσης με μέθοδο SCS για το γεγονός της 9ης Δεκεμβρίου

Χρόνος (h)	Βροχόπτωση (mm)	Αθρ. Βροχ (mm)	Αθρ.Περίσσευμα (mm)	Περίσσευμα (mm)
0	0	0.00	5.60	
0.5	0.976	0.98	5.07	
1	1.952	2.93	4.10	
1.5	2.684	5.61	2.96	
2	0.732	6.34	2.69	
2.5	2.684	9.03	1.81	
3	1.22	10.25	1.48	
3.5	3.66	13.91	0.70	
4	1.464	15.37	0.47	
4.5	1.708	17.08	0.27	
5	0.244	17.32	0.24	
5.5	1.952	19.28	0.09	
6	4.148	23.42	0.01	0.142
6.5	3.172	26.60	0.15	0.275
7	2.928	29.52	0.43	0.736
7.5	4.88	34.40	1.16	2.453
8	10.004	44.41	3.61	0.299
8.5	0.976	45.38	3.91	0.076
9	0.244	45.63	3.99	
SUM		45.63		3.981

Οι εκτάσεις που έχουν καεί όμως (23% της λεκάνης) δεν θα έχουν πλέον τον ίδιο αριθμό καμπύλης απορροής όπως πριν τις πυρκαγιές αλλά αυτός αναμένεται μεγαλύτερος. Το βασικό σημείο στην όλη διαδικασία είναι να εντοπιστεί ο αριθμός καμπύλης CN για τις καμένες εκτάσεις που δίνει περίπου ίδια πλημμυρική παροχή αιχμής του υδρογραφήματος άμεσης απορροής, από το πραγματικό υετόγραμμα βροχόπτωσης, με αυτή που μετρήθηκε στο πεδίο. Αλλάζει έτσι και ο σταθμισμένος μ.ο. του αριθμού CN για όλη τη λεκάνη στην αδρομερή προσέγγιση, ενώ η τιμή που θα βρεθεί θα χρησιμοποιηθεί αυτούσια στην καμένη υπολεκάνη στην ημικατανεμημένη προσέγγιση. Η εύρεση της τιμής του CN για τις καμένες εκτάσεις πραγματοποιείται, με δοκιμές στο Excel ώστε να προσεγγιστεί η παροχή των 17 m<sup>3</sup>/s που υπολογίστηκε στο πεδίο. Ταυτόχρονα με την αλλαγή του CN μεταβάλλεται και ο

χρόνος συγκέντρωσης  $t_c$  από τη σχέση 3.45. Αναλυτικά για κάθε προσέγγιση, η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

Αδρομερής προσέγγιση (Βήματα):

- Στη συνολική λεκάνη γνωρίζουμε το CN πριν τις πυρκαγιές (i) για τύπο εδαφικής υγρασίας II (AMC<sub>II</sub>). Είναι  $CN_{i,II} = 64.12$ .
- Γνωρίζουμε το χρόνο συγκέντρωσης της συνολικής λεκάνης (εδαφικής υγρασίας τύπου II) από τη σχέση Giandotti. Είναι  $t_{c,i,II} = 2.52$  h.
- Ο τύπος εδαφικής υγρασίας όμως του πραγματικού γεγονότος είναι ο τύπος I.
- Χρησιμοποιώ ένα δοκιμαστικό  $CN_{f,II}$  τύπου υγρασίας II (AMC<sub>II</sub>) μετά τις πυρκαγιές (f) και το μετατρέπω σε  $CN_{f,I}$  τύπου υγρασίας I (AMC<sub>I</sub>) από τη σχέση 3.32.
- Γνωρίζοντας τα  $CN_{f,I}$  και  $CN_{f,II}$  και τον χρόνο συγκέντρωσης  $t_{c,i,II}$  εδαφικής υγρασίας II, μπορούμε να βρούμε το  $t_{c,i,I}$  εδαφικής υγρασίας I από τη σχέση 3.38.
- Θέτω στο HEC-HMS το  $CN_{f,I}$  και το  $t_{c,i,I}$ . Με δοκιμαστικές τιμές λοιπόν του CN<sub>I</sub> (οπότε έχουμε κάθε φορά άλλο ζεύγος CN και  $t_c$ ) προσπαθούμε να προσεγγίσουμε την τιμή  $Q_p = 17.3$  m<sup>3</sup>/s που είναι η μετρηθείσα παροχή αιχμής στο πεδίο.
- Οι τιμές που προέκυψαν είναι:  $t_{c,i,I} = 2.42$  h και  $CN_{f,I} = 65.5$ .
- Το ζητούμενο που είναι η τιμή του CN τύπου εδαφικής υγρασίας II (AMC<sub>II</sub>) μετά τις πυρκαγιές, προκύπτει με την αδρομερή προσέγγιση  $CN_{f,II} = 81.8$ .

Ημικατανεμημένη προσέγγιση (Βήματα):

- Στην καμένη υπολεκάνη 1 γνωρίζουμε το CN πριν τις πυρκαγιές (i) για τύπο εδαφικής υγρασίας II (AMC<sub>II</sub>). Είναι  $CN_{1,i,II} = 64.33$ .
- Γνωρίζουμε το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης (εδαφικής υγρασίας τύπου II) από σχέση Giandotti. Είναι  $t_{c,1,i,II} = 1.46$  h.
- Ο τύπος εδαφικής υγρασίας όμως του πραγματικού γεγονότος είναι τύπος I.
- Χρησιμοποιώ ένα δοκιμαστικό  $CN_{1,f,II}$  τύπου υγρασίας II (AMC<sub>II</sub>) μετά τις πυρκαγιές (f) και το μετατρέπω σε  $CN_{1,f,I}$  τύπου υγρασίας I (AMC<sub>I</sub>), από τη σχέση 3.32.
- Γνωρίζοντας τα  $CN_{1,f,I}$  και  $CN_{1,f,II}$  και τον χρόνο συγκέντρωσης  $t_{c,1,i,II}$  εδαφικής υγρασίας II, μπορούμε να βρούμε το  $t_{c,1,i,I}$  εδαφικής υγρασίας I από τη σχέση 3.38.
- Θέτουμε στο HEC-HMS στα δεδομένα της υπολεκάνης 1, το  $CN_{1,f,I}$  και το  $t_{c,1,i,I}$ .
- Στην μη καμένη υπολεκάνη 2, γνωρίζουμε το CN πριν τις πυρκαγιές (i) για τύπο εδαφικής υγρασίας II (AMC = II). Είναι  $CN_{2,i,II} = 64.12$ . Γνωρίζουμε επίσης το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης (εδαφικής υγρασίας τύπου II) από σχέση Giandotti. Είναι  $t_{c,2,i,II} = 2.2$  h.
- Υπολογίζεται το  $CN_{2,i,I}$  από το  $CN_{2,i,II}$  μέσω της σχέσης 3.32.
- Μετατρέπεται και το  $t_{c,2,i,II}$  σε  $t_{c,2,i,I}$ , μέσω της 3.38
- Θέτουμε στο HEC-HMS στα δεδομένα της υπολεκάνης 2, το  $CN_{2,i,I}$  και το  $t_{c,2,i,I}$ .
- Με δοκιμαστικές τιμές λοιπόν του CN<sub>I</sub>,  $f, II$  (οπότε έχουμε κάθε φορά άλλο ζεύγος CN<sub>I</sub>,  $f, I$  και το  $t_{c,1,i,I}$ ) προσπαθούμε να προσεγγίσουμε την τιμή  $Q_p = 17.3$  m<sup>3</sup>/s που είναι η μετρηθείσα παροχή αιχμής στο πεδίο.

- Το ζητούμενο που είναι η τιμή του CN τύπου εδαφικής υγρασίας II ( $AMC_{II}$ ) μετά τις πυρκαγιές, προκύπτει με την ημικατανεμημένη προσέγγιση  $CN_{1,f,II} = 83.1$ .

Ο σχετικός πίνακας του πραγματικού υδρογραφήματος άμεσης απορροής με το συγκεκριμένο CN για την αδρομερή προσέγγιση παρατίθεται στο παράρτημα 2.

Η μετατροπή από CN τύπου I και εδαφικής υγρασίας  $AMC_I$  σε CN τύπου II και αντίστοιχα και του  $t_c$ , γίνεται για να είναι συμβατοί οι αριθμοί καμπύλης με τους υπόλοιπους υπολογισμούς μας που προϋποθέτουν εδαφική υγρασία τύπου II ( $AMC_{II}$ ). Με αυτούς τους αριθμούς CN λοιπόν για τις δυο προσεγγίσεις «ισοφαρίζεται» η παροχή αιχμής από τη μέτρηση ( $Q_p = 17.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Είναι φανερό ότι ο αριθμός καμπύλης απορροής είναι πολύ μεγαλύτερος από ότι πριν τις πυρκαγιές, δείγμα της επίδρασης που έχουν τα φαινόμενα φωτιάς στο έδαφος και στην αύξηση των απορροών γενικότερα.

Προφανώς όπως είπαμε αλλάζει τώρα και ο σταθμισμένος μ.ο. του CN στη συνολική λεκάνη (αδρομερή προσέγγιση), με τιμή μετά τις πυρκαγιές  $CN = 67.87$  όπως φαίνεται στον πίνακα 6.12.

Στην ημικατανεμημένη προσέγγιση η τιμή CN της καμένης υπολεκάνης είναι αυτή που υπολογίστηκε παραπάνω ( $CN = 83.1$ ) ενώ της μη καμένης παραμένει σταθερή και ίση με 64.12 όπως υπολογίστηκε στην παράγραφο 6.3.

Πίνακας 6.12 Σταθμισμένη τιμή του CN μετά τις πυρκαγιές (αδρομερής προσέγγιση)

Χρήση γης	Υδρολογικός τύπος εδάφους					
	B			C		
	%	CN	$CN \times (\%)$	%	CN	$CN \times (\%)$
Δασική	20.677	60	1240.62	10.323	73	753.579
Δασική καμένη	15.341	81.8	1254.894	7.659	77	589.743
Θαμνώδης	23.345	56	1307.32	11.655	70	815.85
Θαμνώδης καμένη	0	67	0	0	77	0
Βοσκότοποι	4.002	69	276.138	1.998	79	157.842
Καλλιέργειες	3.335	76	253.46	1.665	83	138.195
	66.7		4332.432	33.3		2455.209
		Σταθμισμένος M.O.			CN = 67.87641	

## 6.7 Προσδιορισμός υδρογραφήματος σχεδιασμού για διάφορες περιόδους επαναφοράς πριν και μετά τις πυρκαγιές

Έχοντας γνωστά πλέον τα περισεύματα βροχόπτωσης και τις τιμές των συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφήματων πριν και μετά τις πυρκαγιές, καθίσταται δυνατόν να υπολογιστούν οι τεταγμένες του υδρογραφήματος άμεσης απορροής, δηλαδή της γραφικής παράστασης της απορροής με το χρόνο για το ρέμα της Γιαννούλας για  $T = 50$  έτη. Τα σχετικά υδρογραφήματα, σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα υετογράμματα των βροχοπτώσεων που τις προκάλεσαν, περιέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο που εξελίσσεται μια πλημμύρα στη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής.

Αδρομερής προσέγγιση (μοντέλο στο Excel και στο HEC-HMS): Ο αριθμός καμπύλης (CN = 67.87) που βρέθηκε μετά τις πυρκαγιές εισάγεται στο μοντέλο στο Excel και στο HEC-HMS, ώστε βάσει του υετογράμματος σχεδιασμού που κατασκευάστηκε στην παράγραφο 6.2. να υπολογιστούν τελικώς οι πλημμυρικές παροχές μετά τις πυρκαγιές. Το υδρογράφημα άμεσης απορροής για σύνθετες βροχές προκύπτει, όπως προείπαμε, από τη σχέση (3.48) που είναι η διακριτή εξίσωση συνέλιξης για ένα γραμμικό σύστημα. Στη σχέση αυτή υπεισέρχεται το ύψος του περισσεύματος βροχόπτωσης και οι τιμές των τεταγμένων του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Η διαδικασία περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Λόγω της πληθώρας των πράξεων, η διαδικασία έγινε κάθε φορά με πινακοποίηση.

Στον Πίνακα 6.14 παρατίθεται το υδρογράφημα άμεσης απορροής στο Excel πριν τις πυρκαγιές για χρονικό βήμα 15 λεπτών. Γραφικά αυτό φαίνεται στο Σχήμα 6.10. Παρατηρούμε ότι η παροχή αιχμής του ρέματος πριν τις πυρκαγιές είναι  $Q_{p,πριν} = 253 \text{ m}^3/\text{s}$ , ποσότητα αρκετά σημαντική για ένα όχι ιδιαίτερα μεγάλο ρέμα όπως αυτό της Γιαννούλας. Οι μεγάλες κλίσεις από τις οποίες διέρχεται το ρέμα πάντως δικαιολογούν αυτή την πλημμυρική παροχή. Με βήμα 30 λεπτών  $Q_{p,πριν} = 231 \text{ m}^3/\text{s}$ , η μικρότερη αυτή τιμή είναι λογική μιας και στο βήμα 15 λεπτών οι παροχές είναι μεγαλύτερες, καθόσον μεγάλα  $\Delta t$  εξομαλύνουν το φαινόμενο.

Στον Πίνακα 6.15 παρατίθεται το υδρογράφημα άμεσης απορροής στο Excel μετά τις πυρκαγιές για χρονικό βήμα 15 λεπτών, και σχηματικά στο Σχήμα 6.11. Η παροχή αιχμής για βήμα 15 λεπτών γίνεται πλέον μετά τις πυρκαγιές  $Q_{p,μετά} = 295 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q_{p,μετά} = 271 \text{ m}^3/\text{s}$  για βήμα 30 λεπτών). Γίνεται έτσι φανερό ότι οι παροχές αυξάνουν στο σημείο εξόδου του ρέματος μετά τις πυρκαγιές. Η υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης φαίνεται να αλλάζει ύστερα από εκτεταμένο κάψιμο, λόγω της απώλειας της φυτοκάλυψης που αυξάνει την υδροφοβικότητα του εδάφους.

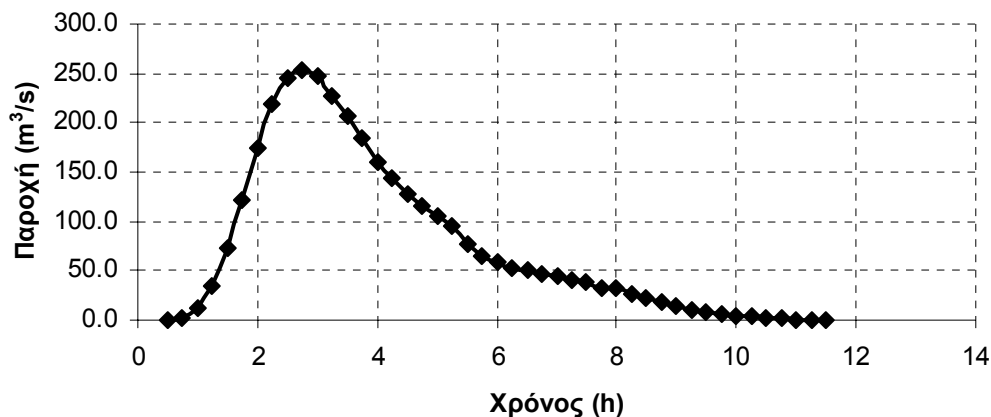
Μέσω του λογισμικού HEC-HMS, επαναλαμβάνεται για επιβεβαίωση η διαδικασία για τη αδρομερή προσέγγιση, με χρονικό βήμα 15 λεπτών. Τα αποτελέσματα πριν και μετά τις πυρκαγιές παρατίθενται στο Παράρτημα 2 και είναι, πρακτικά, όμοια με αυτά που εξήχθησαν από το μοντέλο και τους υπολογισμούς στο Excel, πράγμα που φανερώνει και την ορθότητα του μοντέλου που δημιουργήθηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Μικρές αποκλίσεις στην αιχμή οφείλονται στο γεγονός ότι με τον τρόπο που έγινε η κατασκευή των συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφήματων στο Excel, η παροχή αιχμής αναπόφευκτα «ξέφευγε» από την ψηφιοποίηση καθορισμένων χρονικών διαστημάτων. Έτσι  $Q_{p,πριν} = 255 \text{ m}^3/\text{s}$  και  $Q_{p,μετά} = 297 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Πίνακας 6.14: Υδρογράφημα άμεσης απορροής ( $T = 50$ ) πριν τις πυρκαγιές (βήμα 15 λεπτών)

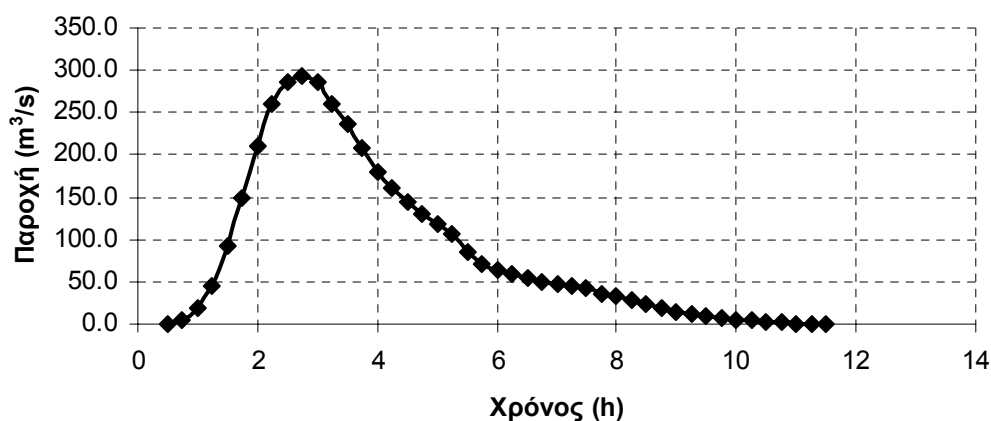
$U$	5	14.2	29.7	46.9	63.8	72.1	70.5	63	55	47	37.4	28.9	20	..	$R$
$h_r$															<b>0.0</b>
0.01	0.1														<b>0.1</b>
0.06	0.3	0.2													<b>0.5</b>
0.22	1.1	0.9	0.4												<b>2.4</b>
1.41	7.0	3.1	1.9	0.6											<b>1.7</b>
0.94	4.7	20.0	6.5	3.0	0.9										<b>35.1</b>
0.48	2.4	13.4	41.8	10.3	4.1	1.0									<b>72.9</b>
0.32	1.6	6.8	28.0	65.9	14.0	4.6	1.0								<b>121.9</b>
0.24	1.2	4.6	14.3	44.2	89.7	15.8	4.5	0.9							<b>177.2</b>
0.20	1.0	3.5	9.5	22.5	60.2	101.4	15.5	4.0	0.8						<b>219.3</b>
0.17	0.8	2.8	7.2	15.1	30.7	68.0	99.1	13.9	3.5	0.7					<b>246.7</b>
0.14	0.7	2.4	5.8	11.4	20.5	34.7	66.5	89.0	12.0	3.0	0.5				<b>252.5</b>
0.13	0.6	2.0	4.9	9.2	15.5	23.2	33.9	59.7	76.9	10.4	2.4	0.4			<b>247.2</b>
0.12	0.6	1.8	4.3	7.8	12.5	17.5	22.7	30.4	51.6	66.6	8.2	1.8	0.3		<b>230.2</b>
0.10	0.5	1.6	3.8	6.8	10.6	14.2	17.1	20.4	26.3	44.7	52.6	6.3	1.3	..	<b>206.4</b>
0.10	0.5	1.5	3.4	6.0	9.2	12.0	13.9	15.4	17.6	22.8	35.3	40.6	4.5	..	<b>183.8</b>
0.09	0.4	1.4	3.1	5.4	8.2	10.4	11.7	12.4	13.3	15.2	18.0	27.3	28.5	..	<b>159.8</b>
0.08	0.4	1.3	2.9	4.9	7.3	9.2	10.2	10.5	10.8	11.5	12.0	13.9	19.1	..	<b>143.0</b>
0.08	0.4	1.2	2.7	4.5	6.7	8.3	9.0	9.1	9.1	9.3	9.1	9.3	9.8	..	<b>128.0</b>
0.07	0.4	1.1	2.5	4.2	6.2	7.6	8.1	8.1	7.9	7.9	7.4	7.0	6.5	..	<b>116.0</b>
0.07	0.4	1.1	2.3	3.9	5.7	7.0	7.4	7.3	7.0	6.8	6.2	5.7	4.9	..	<b>105.6</b>
0.07	0.3	1.0	2.2	3.7	5.3	6.5	6.8	6.6	6.3	6.1	5.4	4.8	4.0	..	<b>95.6</b>
0.06	0.3	1.0	2.1	3.5	5.0	6.0	6.3	6.1	5.7	5.5	4.8	4.2	3.4	..	<b>77.8</b>
0.06	0.3	0.9	2.0	3.3	4.7	5.7	5.9	5.7	5.3	5.0	4.3	3.7	2.9	..	<b>65.8</b>
0.06	0.3	0.9	1.9	3.1	4.5	5.4	5.5	5.3	4.9	4.6	3.9	3.3	2.6	..	<b>58.8</b>
0.06	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
0.05	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	<b>0.0</b>

Πίνακας 6.15: Υδρογράφημα άμεσης απορροής ( $T = 50$ ) μετά τις πυρκαγιές βάσει του νέου CN από τις μετρήσεις (χρονικό βήμα 15 λεπτών)

$h_r$ (σε cm)	$U$	5	14.2	29.7	46.9	63.8	72.1	70.5	63.3	55	47	37.4	28.9	20	..	$R$
																<b>0.0</b>
<b>0.04</b>		0.2														<b>0.2</b>
<b>0.11</b>		0.5	0.6													<b>1.2</b>
<b>0.30</b>		1.5	1.6	1.3												<b>4.8</b>
<b>1.67</b>		8.4	4.3	3.2	2.1											<b>18.0</b>
<b>1.06</b>		5.3	23.7	9.0	5.1	2.8										<b>46.7</b>
<b>0.53</b>		2.7	15.0	49.6	14.2	7.0	3.2									<b>91.7</b>
<b>0.35</b>		1.8	7.5	31.5	78.4	19.3	7.9	3.1								<b>152.5</b>
<b>0.27</b>		1.3	5.0	15.8	49.7	106.6	21.8	7.7	2.8							<b>213.8</b>
<b>0.21</b>		1.1	3.8	10.5	24.9	67.6	120.5	21.4	6.9	2.4						<b>261.0</b>
<b>0.18</b>		0.9	3.0	7.9	16.6	33.9	76.4	117.8	19.2	6.0	2.1					<b>287.7</b>
<b>0.16</b>		0.8	2.6	6.4	12.5	22.5	38.3	74.7	105.8	16.6	5.2	1.7				<b>294.9</b>
<b>0.14</b>		0.7	2.2	5.4	10.1	17.0	25.5	37.5	67.0	91.4	14.4	4.1	1.3			<b>285.4</b>
<b>0.12</b>		0.6	2.0	4.6	8.5	13.7	19.2	24.9	33.6	57.9	79.2	11.3	3.2	0.9		<b>263.6</b>
<b>0.11</b>		0.6	1.8	4.1	7.3	11.5	15.5	18.7	22.4	29.1	50.2	62.5	8.8	2.2	..	<b>235.4</b>
<b>0.10</b>		0.5	1.6	3.7	6.5	10.0	13.0	15.1	16.8	19.3	25.2	39.6	48.3	6.1	..	<b>208.4</b>
<b>0.10</b>		0.5	1.5	3.4	5.8	8.8	11.3	12.7	13.6	14.5	16.7	19.9	30.6	33.9	..	<b>180.2</b>
<b>0.09</b>		0.5	1.4	3.1	5.3	8.0	10.0	11.0	11.4	11.7	12.6	13.2	15.4	21.5	..	<b>160.7</b>
<b>0.08</b>		0.4	1.3	2.9	4.9	7.2	9.0	9.8	9.9	9.9	10.2	9.9	10.2	10.8	..	<b>143.4</b>
<b>0.08</b>		0.4	1.2	2.7	4.5	6.7	8.2	8.8	8.8	8.6	8.6	8.0	7.7	7.2	..	<b>129.4</b>
<b>0.08</b>		0.4	1.1	2.5	4.2	6.2	7.5	8.0	7.9	7.6	7.4	6.7	6.2	5.4	..	<b>117.3</b>
<b>0.07</b>		0.4	1.1	2.4	4.0	5.8	7.0	7.4	7.2	6.8	6.6	5.9	5.2	4.4	..	<b>105.4</b>
<b>0.07</b>		0.3	1.0	2.3	3.8	5.4	6.5	6.8	6.6	6.2	5.9	5.2	4.5	3.7	..	<b>84.7</b>
<b>0.07</b>		0.3	1.0	2.1	3.6	5.1	6.1	6.4	6.1	5.7	5.4	4.7	4.0	3.2	..	<b>71.3</b>
<b>0.06</b>		0.3	0.9	2.0	3.4	4.8	5.8	6.0	5.7	5.3	5.0	4.2	3.6	2.8	..	<b>63.6</b>
<b>0.06</b>		0.3	0.9	2.0	3.2	4.6	5.5	5.6	5.4	4.9	4.6	3.9	3.3	2.5	..	<b>58.0</b>
<b>0.06</b>		..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	<b>53.7</b>
<b>0.06</b>		..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	<b>50.2</b>



Σχήμα 6.10: Υδρογράφημα άμεσης απορροής για  $T = 50$ , βάσει του μοντέλου πριν τις πυρκαγιές με χρονικό βήμα 15 λεπτών



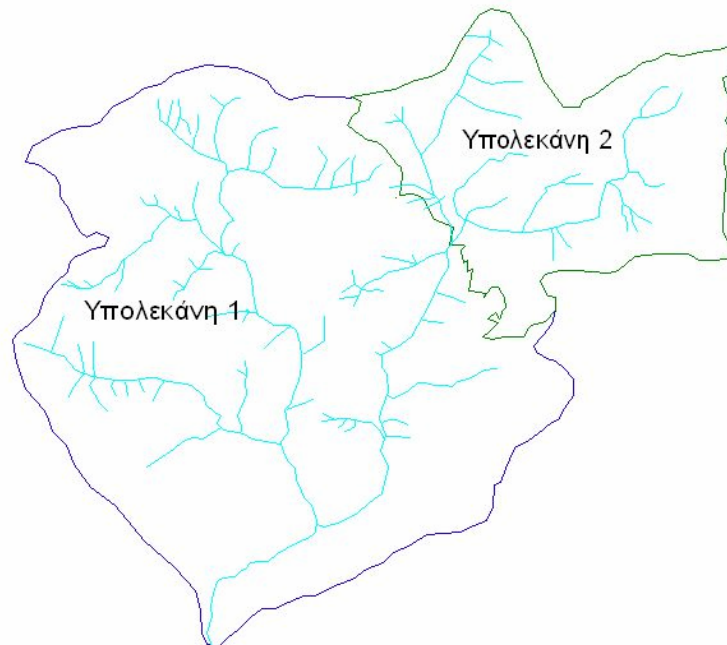
Σχήμα 6.11: Υδρογράφημα άμεσης απορροής για  $T = 50$ , βάσει των μετρήσεων στο πεδίο μετά τις πυρκαγιές (CN από μετρήσεις) – βήμα 15 λεπτών

Ημικατανεμημένη προσέγγιση (μοντέλο στο HEC-HMS): Δεδομένου ότι η καμένη έκταση είναι σχετικά «συμπαγής» (υπάρχουν ελάχιστοι θύλακες πρασίνου εντός της καμένης περιοχής), μας δίνεται η δυνατότητα να μελετήσουμε την καμένη περιοχή ξεχωριστά σαν μια υπολεκάνη, αγνοώντας κάποιες μικρές μη καμένες περιοχές στα όριά της. Έτσι, στην ανάλυση που πραγματοποιείται, γίνεται κατανομή μερικώς του χώρου, θεωρούμε δηλαδή την περιοχή μελέτης σαν δύο υπολεκάνες (βλ. Σχήμα 6.12): την λεκάνη που δεν έχει καεί (υπολεκάνη 1) και την καμένη λεκάνη (υπολεκάνη 2).

Η λογική αυτής της προσέγγισης έγκειται στον ακριβέστερο υπολογισμό των πλημμυρικών μεγεθών αλλά και στην επιβεβαίωση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε πρωτύτερα. Η πλημμυρική παροχή από την υπολεκάνη 2 διοδεύεται στην υπολεκάνη 1 και στο σημείο

εξόδου της κατάντη λεκάνης η παροχή θα προκύψει ως η σύνθεση των υδρογραφημάτων των δύο υπολεκανών.

Στην ημικατανεμημένη προσέγγιση, με δεδομένα εισόδου στο HEC-HMS, το υετόγραμμα σχεδιασμού για 15 min, τους αριθμούς CN για τις δύο υπολεκάνες, τους χρόνους συγκέντρωσης από το εδάφιο 6.5 και διοδεύοντας την παροχή της υπολεκάνης 2 στην υπολεκάνη 1, υπολογίζονται οι πλημμυρικές παροχές μετά τις πυρκαγιές.



Σχήμα 6.12 Υπολεκάνες μελέτης για την ημικατανεμημένη προσέγγιση

Έτσι, μέσω του προγράμματος υπολογίζεται η πλημμυρική παροχή από την υπολεκάνη 2 η οποία και διοδεύεται στην υπολεκάνη 1 για να εξαχθούν τελικώς τα υδρογραφήματα στην έξοδο της μη καμένης λεκάνης. Η διαδικασία πραγματοποιείται και πριν και μετά τις πυρκαγιές. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στο λογισμικό HEC-HMS είναι ίδιοι όπως στην αδρομερή προσέγγιση. Δηλαδή:

- Η μοντελοποίηση της βροχόπτωσης θα γίνει πάλι με τη μέθοδο του εικονικού υετογράμματος σχεδιασμού και των εναλλασσόμενων μπλοκ. Και η εικονική βροχόπτωση των 14 ετών και η βροχόπτωση της 9ης Δεκεμβρίου εισάγονται χειροκίνητα και κατασκευάζονται νέοι σταθμοί (precipitation gages) κατά το πρόγραμμα.
- Οι απώλειες και τα περισσεύματα βροχόπτωσης υπολογίζονται ξανά για την κάθε λεκάνη με τη μέθοδο SCS και με τα αντίστοιχα CN που υπολογίστηκαν στις παραπάνω παραγράφους. Ως αρχικές απώλειες τίθεται πάντα 0.2S.
- Ως μοναδιαίο υδρογράφημα λαμβάνεται ξανά το αδιάστατο υδρογράφημα της SCS, με τους αντίστοιχους χρόνους συγκέντρωσης που περιγράφονται παρακάτω.
- Η διόδευση γίνεται με την υδραυλική μέθοδο Muskingum-Cunge (τυπική παραλλαγή). Το μοντέλο αυτό διόδευσης ξεπερνά τους περιορισμούς του κλασσικού μοντέλου Muskingum, το οποίο παρόλο που είναι ευρέως διαδεδομένο και εύκολο στη χρήση εμπεριέχει παραμέτρους που δεν έχουν φυσική βάση και είναι δύσκολο να υπολογισθούν. Εκτός αυτού περιέχει υποθέσεις που συχνά παραβιάζονται στα φυσικά κανάλια. Το μοντέλο βασίζεται στην εισαγωγή δεδομένων όπως το μήκος, η τραχύτητα και η κλίση του καναλιού.



- Η εξατμισοδιαπνοή θεωρείται μηδενική όπως και η βασική απορροή.

Κατασκευάστηκε εν ολίγοις ένα μοντέλο για κάθε λεκάνη (basin model), και ένα μετεωρολογικό μοντέλο (met. model). Σημαντικό σημείο στην όλη διαδικασία ήταν η εύρεση των αριθμών CN μετά τις πυρκαγιές με αντίστοιχη μεταβολή του χρόνου  $t_c$ , με τη διαδικασία που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Από το «τρέξιμο» του προγράμματος πριν και μετά τις πυρκαγιές, προέκυψαν αποτελέσματα αύξησης των παροχών πριν και μετά τις πυρκαγιές, σε αναλογία με το αδρομερές μοντέλο.

Η παροχή αιχμής πριν τις πυρκαγιές είναι  $Q_{p,πριν} = 273 \text{ m}^3/\text{s}$  για χρονικό βήμα 15 λεπτών, τιμή λίγο μεγαλύτερη από την αδρομερή προσέγγιση.

Όπως προείπαμε ο αριθμός CN για τον οποίο μέσω του προγράμματος η παροχή αιχμής του γεγονότος της 9ης Δεκεμβρίου ισοσταθμίζει την παροχή των  $17.3 \text{ m}^3/\text{s}$  στο τελικό σημείο εξόδου βάσει της πλημμυρικής στάθμης των 50 cm, είναι  $CN_{II} = 83.1$ . Μετά τις πυρκαγιές στην μη καμένη υπολεκάνη, ο αριθμός CN που εισάγεται στους υπολογισμούς είναι ίδιος με πριν, δηλαδή 64.12.

Η πλημμυρική παροχή αιχμής μετά τις πυρκαγιές στην έξοδο από τον σταθμισμένο μ.ο. των παραμέτρων CN για χρονικό βήμα 15 λεπτών προκύπτει  $Q_{p,μετά} = 337 \text{ m}^3/\text{s}$  και μεγαλύτερη (περίπου κατά  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ ) από την τιμή παροχής αιχμής βάσει της αδρομερούς προσέγγισης.

Στον Πίνακα 6.16 παρατίθενται συγκεντρωτικά οι παροχές αιχμής και για τις δύο προσεγγίσεις. Τα αποτελέσματα του λογισμικού HEC-HMS παρατίθενται στους επόμενους πίνακες 6.17-6.18, και σε σχηματική μορφή στα σχήματα 6.13-6.14. Σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα της ημικατανεμημένης προσέγγισης μέσω του προγράμματος HEC-HMS επιβεβαιώνουν την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στα προηγούμενα εδάφια, μιας και οι τάξεις μεγέθους είναι παρεμφερείς. Ελαφρές διαφοροποιήσεις κρίνονται μάλλον αναμενόμενες μιας και οι δύο προσεγγίσεις στηρίζονται σε υπολογισμό μεγάλου πλήθους παραμέτρων. Με την ημικατανεμημένη προσέγγιση οι παροχές είναι μεν μεγαλύτερες, η ποσοστιαία αύξηση πάντως των πλημμυρικών παροχών της ημικατανεμημένης προσέγγισης προκύπτει σε σχετική αναλογία με την αντίστοιχη αύξηση της αδρομερούς προσέγγισης.

Πίνακας 6.16 Παροχές αιχμής πριν και μετά τις πυρκαγιές με την αδρομερή και την ημικατανεμημένη προσέγγιση

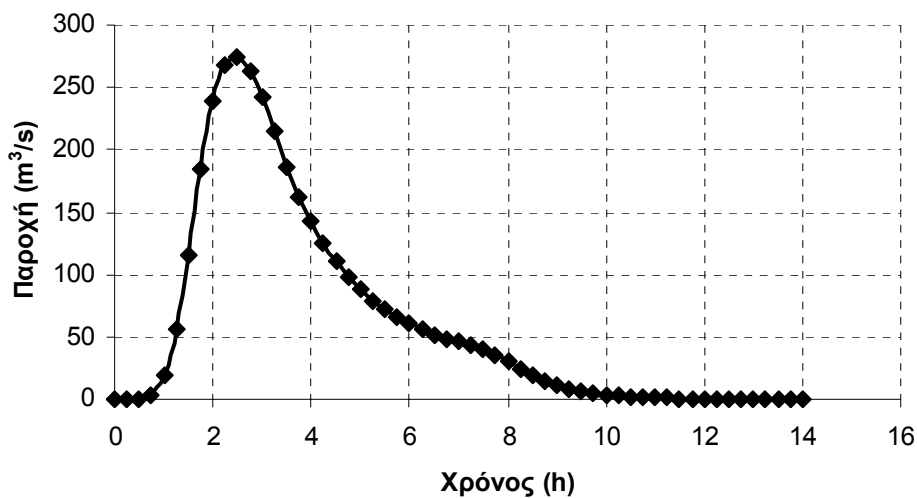
	$Q_{p,πριν} (\text{m}^3/\text{s})$	$Q_{p,μετά} (\text{m}^3/\text{s})$
Αδρομερής προσέγγιση (με Excel)	253	295
Αδρομερής προσέγγιση (με HEC-HMS)	255	297
Ημικατανεμημένη προσέγγιση (με HEC-HMS)	273	337

Πίνακας 6.17: Ημικατανεμημένη προσέγγιση - Παροχές εξόδου πριν τις πυρκαγιές ( $T = 50$  και βήμα 15 λεπτών)

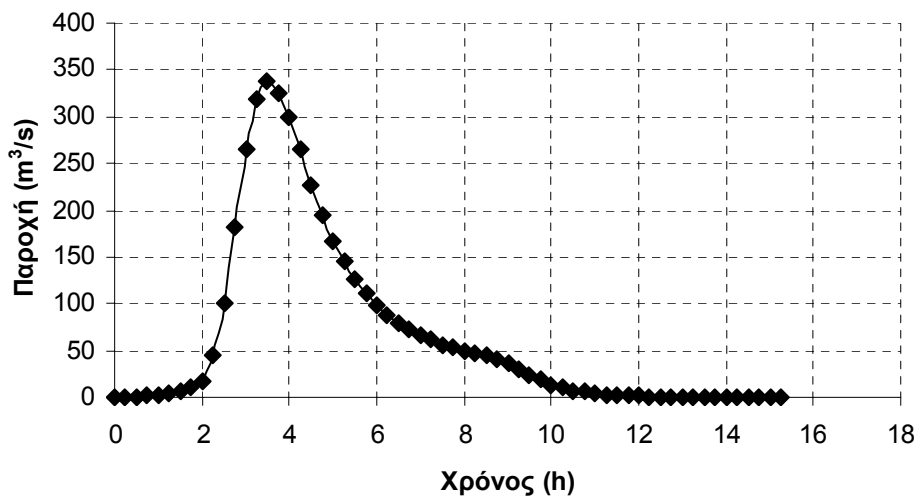
Χρόνος (h)	Είσοδος από υπολεκάνη 2 ( $m^3/s$ )	Διόδευση ( $m^3/s$ )	Έξοδος ( $m^3/s$ )
0	0	0	0
0.25	0.06	0.03	0.09
0.5	0.48	0.27	0.74
0.75	2.22	1.42	3.64
1	11.53	7.57	19.1
1.25	32.42	23.47	55.9
1.5	66.95	48.38	115.33
1.75	112.92	70.94	183.86
2	156.95	81.41	238.36
2.25	187.84	79.91	267.75
2.5	203.39	70.21	273.6
2.75	204.25	58.69	262.94
3	193.63	48.76	242.39
3.25	173.86	40.69	214.55
3.5	152.34	34.15	186.48
3.75	133.22	28.96	162.18
4	117.15	24.89	142.04
4.25	103.29	21.7	124.99
4.5	91.19	19.17	110.36
4.75	80.92	17.16	98.08
5	72.29	15.54	87.83
5.25	64.98	14.22	79.19
5.5	58.79	13.09	71.88
5.75	53.55	12.11	65.66
6	49.08	11.29	60.38
6.25	45.27	10.62	55.89
6.5	42	10.06	52.05
6.75	39.17	9.56	48.73
7	36.74	9.12	45.86
7.25	34.42	8.6	43.01
7.5	31.89	7.77	39.66
7.75	28.88	6.49	35.37
8	25.21	4.97	30.17
8.25	21.15	3.53	24.68
8.5	17.15	2.38	19.52
8.75	13.51	1.58	15.09
9	10.4	1.06	11.46
9.25	7.87	0.71	8.58
9.5	5.98	0.47	6.45
9.75	4.57	0.31	4.88
10	3.5	0.21	3.7
10.25	2.66	0.13	2.8
10.5	2.02	0.09	2.11
10.75	1.54	0.05	1.59
11	1.17	0.03	1.2
11.25	0.88	0.02	0.9
..	..	..	..

Πίνακας 6.18: Ημικατανεμημένη προσέγγιση-Παροχές εξόδου μετά τις πυρκαγιές ( $T = 50$  και βήμα 15 λεπτών)

Χρόνος (h)	Είσοδος από υπολεκάνη 2 ( $m^3/s$ )	Διόδευση ( $m^3/s$ )	Έξοδος ( $m^3/s$ )
0	0	0.06	0.06
0.25	0	0.24	0.24
0.5	0	0.63	0.63
0.75	0	1.32	1.32
1	0	2.37	2.37
1.25	0	3.9	3.9
1.5	0.07	6.1	6.17
1.75	0.53	9.47	10
2	2.52	15.32	17.84
2.25	13.32	30.79	44.1
2.5	37.74	61.82	99.56
2.75	78.12	104.33	182.45
3	129.52	135.89	265.41
3.25	174.49	144.61	319.1
3.5	202.97	134.09	337.05
3.75	213.37	112.44	325.81
4	208.63	90.76	299.39
4.25	191.31	73.38	264.69
4.5	167.68	59.64	227.32
4.75	145.52	48.95	194.46
5	126.88	40.69	167.57
5.25	111.01	34.39	145.39
5.5	97.21	29.56	126.77
5.75	85.64	25.79	111.43
6	75.99	22.84	98.83
6.25	67.88	20.51	88.39
6.5	61.08	18.61	79.69
6.75	55.38	17	72.38
7	50.57	15.62	66.18
7.25	46.48	14.51	60.98
7.5	42.98	13.62	56.6
7.75	40	12.87	52.87
8	37.47	12.21	49.68
8.25	35.26	11.63	46.88
8.5	33.01	10.93	43.94
8.75	30.45	9.83	40.28
9	27.27	8.15	35.41
9.25	23.34	6.18	29.52
9.5	19.23	4.36	23.59
9.75	15.3	2.91	18.21
10	11.79	1.93	13.71
10.25	8.84	1.29	10.13
10.5	6.57	0.86	7.43
10.75	4.94	0.57	5.51
11	3.73	0.37	4.1
11.25	2.79	0.24	3.04
..	..	..	..



Σχήμα 6.14: Ημικατανεμημένη προσέγγιση: Υδρογράφημα άμεσης απορροής για  $T = 50$  πριν τις πυρκαγιές – βήμα 15 λεπτών



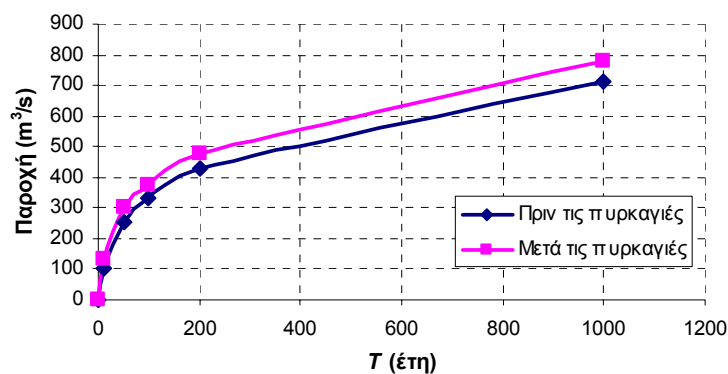
Σχήμα 6.15: Ημικατανεμημένη προσέγγιση: Υδρογράφημα άμεσης απορροής για  $T = 50$  μετά τις πυρκαγιές με CN από μετρήσεις – βήμα 15 λεπτών

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν ως αυτό το σημείο υπενθυμίζεται ότι ήταν για περίοδο επαναφοράς  $T = 50$  έτη. Η διαδικασία εκτίμησης των πλημμυρικών παροχών πριν και μετά τις πυρκαγιές επαναλήφθηκε στην αδρομερή προσέγγιση για διάφορες περιόδους επαναφοράς από  $T = 10$  έως  $T = 10000$  έτη. Στον παρακάτω Πίνακα 6.19 φαίνονται συγκεντρωτικά οι παροχές αιχμής για κάθε περίοδο επαναφοράς πριν και μετά την πυρκαγιά. Στο Σχήμα 6.16 επίσης γίνεται η σύγκριση μεταξύ των παροχών αιχμής πριν και μετά τις πυρκαγιές μέχρι 1000 έτη. Το σχήμα αυτό δείχνει μια αρκετά σαφή μεταβολή στις πλημμυρικές ποσότητες και πιο συγκεκριμένα μια σημαντική αύξηση, όσο αυξάνει η

περίοδος επαναφοράς. Η αύξηση σε απόλυτες τιμές πάντως παρατηρείται ότι είναι σχετικά σταθερή και κυμαίνεται από 30 m<sup>3</sup>/s έως 67 m<sup>3</sup>/s στις μεγάλες περιόδους επαναφοράς.

Πίνακας 6.19: Περίοδοι επαναφοράς και παροχές αιχμής πριν και μετά τις πυρκαγιές

$T$ (έτη)	$Q_{p, \text{πριν}}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{p, \text{μετά}}$ (m <sup>3</sup> /s)	Αύξηση (%)
10	99	128	30
50	255	297	17
100	330	375	14
200	427	476	12
1000	712	773	9
10000	1299	1366	5

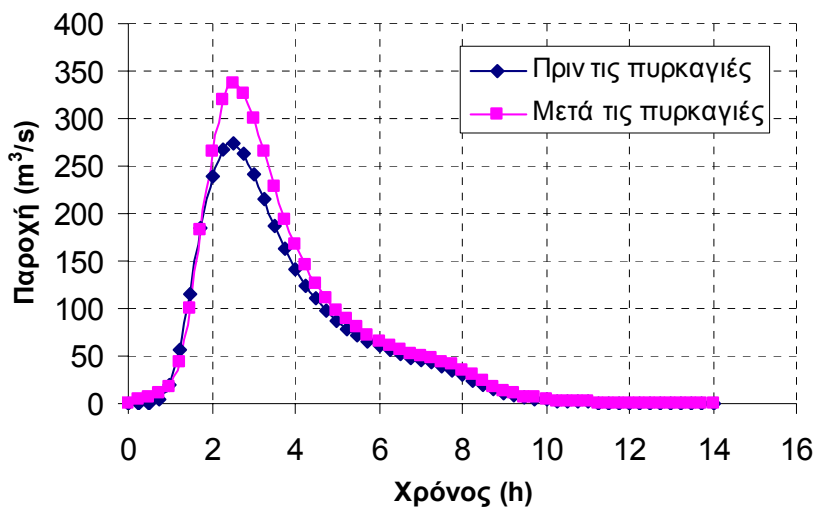


Σχήμα 6.16: Σύγκριση μεταξύ παροχών αιχμής και περιόδου επαναφοράς πριν και μετά τις πυρκαγιές μέχρι  $T = 1000$  έτη

## 6.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων πριν και μετά τις πυρκαγιές

### 6.8.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης

Στο Σχήμα 6.17 παρατίθενται συγκριτικά τα τελικώς παραχθέντα υδρογραφήματα για  $T = 50$  πριν και μετά τις φωτιές βάσει της μέτρησης στο πεδίο μέσω του HEC-HMS με την ημικατανομημένη προσέγγιση. Φαίνονται χαρακτηριστικά οι αυξημένες τιμές των τεταγμένων του υδρογραφήματος μετά τις φωτιές.

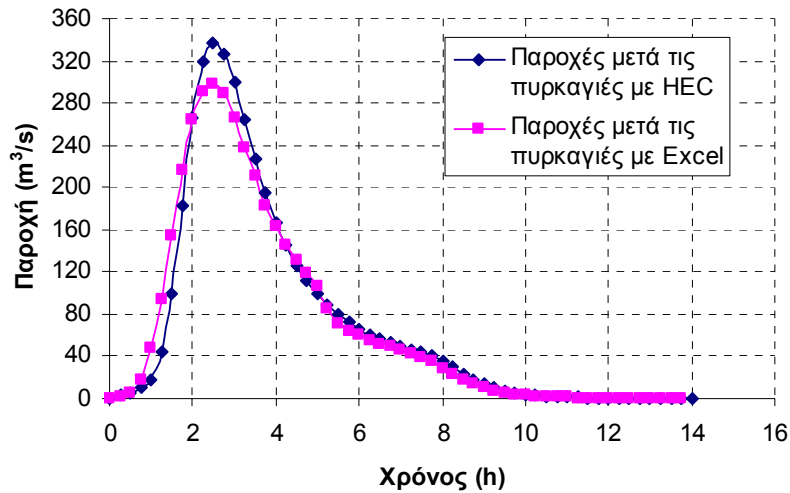


Σχήμα 6.17: Υδρογραφήματα άμεσης απορροής πριν και μετά τις πυρκαγιές βάσει των μετρήσεων στο πεδίο με το λογισμικό HEC-HMS.

Γενικά από τη σύγκριση των υδρογραφημάτων πριν και μετά τις φωτιές παρατηρούμε ότι υπάρχει μεταβολή της πλημμυρικής αιχμής, και ιδιαίτερα μια αύξηση στο σημείο εξόδου μετά τις φωτιές κατά περίπου  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  με την αδρομερή προσέγγιση και κατά  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  με την ημικατανεμημένη προσέγγιση. Τα αποτελέσματα από τις δύο προσεγγίσεις πάντως είναι παρεμφερή στην τάξη μεγέθους και επιβεβαιώνουν την ορθότητα των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν. Η ποσοστιαία αύξηση στις παροχές αιχμής εξάλλου είναι η ίδια σχεδόν και στις δύο προσεγγίσεις. (17% με την αδρομερή και 23% με την ημικατανεμημένη).

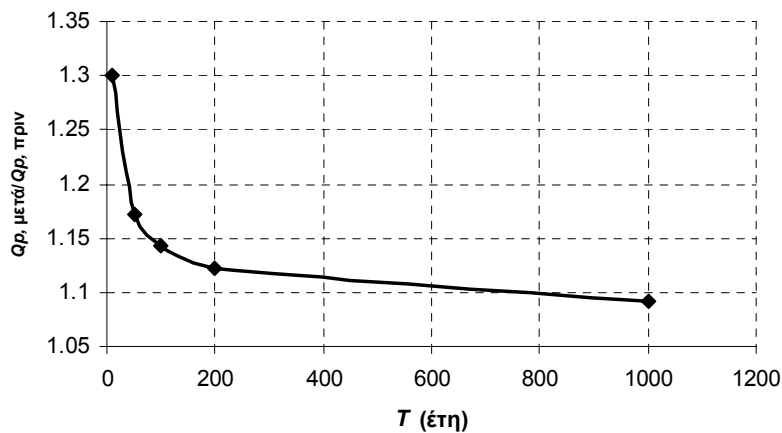
Στο παρακάτω Σχήμα 6.18 παρατίθεται σχηματικά η σύγκριση των παροχών μετά τις πυρκαγιές μεταξύ του μοντέλου που κατασκευάστηκε στο Excel και των τιμών μέσω της ημικατανεμημένης προσέγγισης και του HEC-HMS. Παρατηρείται ότι τα υδρογραφήματα με τις δύο προσεγγίσεις έχουν σχετικά παρόμοια μορφή, αν και μέσω του HEC, η κορυφή του υδρογραφήματος είναι πιο «μυτερή». Οι μεγαλύτερες παροχές αιχμής μέσω του λογισμικού HEC (ημικατανεμημένη προσέγγιση) κρίνονται φυσιολογικές, μιας που η διαδικασία θεωρείται ακριβέστερη της αδρομερούς.

Ο χρόνος συγκέντρωσης υπενθυμίζεται ότι μεταβαλλόταν σε αντιστοιχία με τον αριθμό καμπύλης για την εύρεση της ακριβούς τιμής του. Ο συντελεστής CN παρουσιάζεται αυξημένος στις μετά τη φωτιά συνθήκες, πράγμα αναμενόμενο λόγω της αλλαγής των υδρολογικών συνθηκών.



Σχήμα 6.18: Σύγκριση υδρογραφημάτων μετά τις πυρκαγιές μεταξύ αδρομερούς και ημικατανεμημένης προσέγγισης

Στο Σχήμα 6.19, ο λόγος της παροχής αιχμής πριν προς την παροχή αιχμής μετά συγκρίνεται με την περίοδο επαναφοράς. Από την ανάλυση αυτού του γραφήματος είναι φανερό ότι η αύξηση του λόγου παροχών είναι πιο σημαντική για τις χαμηλές περιόδους επαναφοράς παρά για τις υψηλές.



Σχήμα 6.19:  $Q_{p,μετά}/Q_{p,πριν}$  συναρτήσει της περιόδου επαναφοράς

Στον Πίνακα 6.20 παρατίθενται επίσης συγκριτικά οι όγκοι απορροής πριν και μετά τις πυρκαγιές. Παρατηρούμε μια σημαντική αύξηση αυτών μετά τα φαινόμενα φωτιάς. Η αύξηση (%) είναι μεγαλύτερη όσο μικρότερη η περίοδος επαναφοράς.

Πίνακας 6.20: Όγκοι απορροής πριν και μετά τις πυρκαγιές

T (έτη)	Όγκος απορροής πριν (m <sup>3</sup> )	Όγκος απορροής μετά (m <sup>3</sup> )	Διαφορά (m <sup>3</sup> )	Αύξηση (%)
10	1408100	1735200	327100	23
50	3167400	3666700	499300	16
100	4174300	4739300	565000	13.5
200	5370800	6004900	634100	12
1000	8899800	9683900	784100	9
10000	16210000	17179000	969000	6

### 6.8.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης και άλλων μελετών

Στο σημείο αυτό πρέπει να πούμε πως αρκετές μελέτες έχουν αποδείξει ότι σε λεκάνες που έχουν καεί, τα πλημμυρικά φαινόμενα αυξάνονται τον πρώτο χρόνο μετά τη φωτιά, ενώ το δεύτερο χρόνο η απόκριση της λεκάνης σε πλημμυρικά φαινόμενα είναι μικρότερη από ότι στον πρώτο. Αυτό το συμπέρασμα οδηγεί στη θεώρηση ότι το παραγόμενο υδρογράφημα απορροής είναι χρονικά εξαρτημένο και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για λίγα χρόνια μετά τη φωτιά.

Μια ακόμα επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων μας προκύπτει αν συγκρίνουμε την περίπτωση του ρέματος Γιαννούλας με την περίπτωση του ρέματος Asinaro στη Σικελία που μελετήθηκε από τους Candela et al (2005) (βλ. και Κεφάλαιο 1). Η λεκάνη Asinaro μοιάζει τόσο στην έκταση όσο και στο καμένο ποσοστό με τη λεκάνη της Γιαννούλας και τα ποσοστά αύξησης των παροχών αιχμής για περίοδο επαναφοράς  $T = 50$  είναι παραπλήσια. Επίσης η περιοχή της Σικελίας βρίσκεται στον ίδιο σχεδόν παράλληλο με την περιοχή της μελέτης μας, και οι κλιματικές συνθήκες είναι παρόμοιες. Στη μελέτη της Candela η αύξηση στην παροχή αιχμής είναι περίπου 31% ενώ στη δική μας είναι 23% με την ημικατανεμημένη προσέγγιση, πράγμα που δείχνει ότι στις μεσογειακές περιοχές η αλλαγή των υδρολογικών συνθηκών λόγω της πυρκαγιάς μπορεί να θεωρηθεί δεδομένη κατά κάποιο τρόπο και με μικρές διαφορές στην ποσοστική αύξησή της. Παρατηρείται ότι και στις δύο μελέτες η αύξηση είναι περίπου ίδια με το ποσοστό των καμένων εκτάσεων στη λεκάνη. Σύγκριση με άλλες μελέτες δεν είναι δυνατή, μιας και υπάρχει αλλαγή σε διάφορες παραμέτρους (όπως συνθήκες εδάφους, έκταση λεκάνης κλπ) πράγμα που καθιστά τα μεγέθη μη συγκρίσιμα. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται κάποια συγκριτικά στοιχεία μεταξύ της μελέτης μας και της μελέτης των Candela et al στη Σικελία.

Πίνακας 6.21: Σύγκριση λεκανών ρεμάτων Γιαννούλας και Asinaro

	Λεκάνη ρέματος Γιαννούλα	Λεκάνη ρέματος Asinaro
Έκταση (km <sup>2</sup> )	57.6	53
Καμένο ποσοστό (%)	23	30
$Q_p$ πριν τις πυρκαγιές (m <sup>3</sup> /s)	273	261
$Q_p$ μετά τις πυρκαγιές (m <sup>3</sup> /s)	337	342
Ποσοστό αύξησης πλημμυρικής αιχμής (%)	23	31



## 7 Συμπεράσματα

---

Οι έντονες πυρκαγιές φαίνεται πως επηρεάζουν στην πράξη την υδρολογική συμπεριφορά φυσικών λεκανών, ιδίως στις μεσογειακές περιοχές που είναι επιρρεπείς σε τέτοιους κινδύνους, όπως η λεκάνη του ρέματος Γιαννούλας. Η φωτιά μειώνει την προστασία της επιφάνειας του εδάφους, πράγμα που οφείλεται στην απώλεια της φυτοκάλυψης.

Η πλημμυρική παροχή και η παροχή αιχμής σε ανάλογα υδατορεύματα σύμφωνα με τις περισσότερες μελέτες δείχνουν να αυξάνονται μετά τις φωτιές, ως αποτέλεσμα της δυσκολίας του καμένου εδάφους να συγκρατήσει τα ύδατα στα ορεινά. Οι επιδράσεις της φωτιάς γενικά φαίνεται ότι είναι αρκετά σημαντικές όσον αφορά τη λεκάνη απορροής του ρέματος και τον κίνδυνο πλημμύρας. Παρατηρείται μια αλλαγή στο σχήμα των πλημμυρικών υδρογραφημάτων που γίνονται πιο αιχμηρά, και μια αύξηση του όγκου πλημμυρών που σχετίζεται με τη μείωση στην εξατμισοδιαπνοή. Αυτές οι επιδράσεις θεωρούνται ότι οφείλονται σε αλλαγές στην παραγωγή της απορροής..

Μεγάλο μέρος της δασικής έκτασης της Πάρνηθας κάηκε το καλοκαίρι του 2007, και ένα αρκετά μεγάλο καμένο τμήμα ήταν μέσα στη λεκάνη απορροής του ρέματος Γιαννούλα (Αγ. Γεωργίου) στο οποίο καταλήγει σημαντική ποσότητα υδάτων από σχετικά μεγάλη ορεινή έκταση. Το ποσοστό της λεκάνης που κάηκε ήταν περίπου 23%, γεγονός που αποτέλεσε και το ερέθισμα για τη μελέτη αυτή, μιας που υπήρχε ανησυχία στην περιοχή για εμφάνιση σημαντικών πλημμυρικών φαινομένων στα κατάντη του ρέματος με τις πρώτες φθινοπωρινές βροχοπτώσεις.

Στην εργασία μας λοιπόν αναλύονται οι επιδράσεις των δασικών πυρκαγιών στο πλημμυρικό καθεστώς των φυσικών λεκανών απορροής με περίπτωση εφαρμογής, όπως προαναφέρθηκε, το ρέμα της Γιαννούλας. Προτάθηκε μια σχετικά απλή μεθοδολογία για την εξαγωγή της πλημμυρικής παροχής πριν και μετά τις πυρκαγιές. Η μεθοδολογία ενδεικνύεται για λεκάνες με ελάχιστα ή ανεπαρκή στοιχεία επιφανειακής απορροής. Η παραπάνω μεθοδολογία χρησιμοποιώντας διάφορα στοιχεία της επιστήμης της Υδρολογίας βρέθηκε ότι αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη των αλλαγών σε πλημμυρικά μεγέθη εξαιτίας των πυρκαγιών. Έγιναν δύο προσεγγίσεις, η αδρομερής στην οποία η λεκάνη θεωρήθηκε ως ολότητα και η ημικαταμεμημένη στην οποία η λεκάνη διασπάστηκε σε δύο υπολεκάνες την καμένη και τη μη καμένη.

Κατά την αδρομερή προσέγγιση, η μεθοδολογία προ των πυρκαγιών αποσκοπούσε στην εξαγωγή του υδρογραφήματος άμεσης απορροής και βασίστηκε σε γνωστές μεθόδους από τη βιβλιογραφία. Εξήχθησαν αρχικά οι όμβριες καμπύλες από δεδομένα βροχόπτωσης 14 ετών από τον μετεωρολογικό σταθμό του ΕΜΠ στο Ζωγράφου που κρίθηκε ως η πιο ακριβής και προσιτή προσέγγιση των αντίστοιχων βροχομετρικών υψών στην Πάρνηθα για το ίδιο διάστημα. Για μια επιλεγμένη περίοδο επαναφοράς 50 ετών κατασκευάστηκε το υετόγραμμα σχεδιασμού και, στη συνέχεια, τα βροχομετρικά ύψη μετατράπηκαν σε περισεύματα βροχόπτωσης με τη μέθοδο SCS η οποία ενδεικνύεται για περιπτώσεις μη επαρκών δεδομένων όπως η δική μας. Με κατάλληλη προεπεξεργασία με ΓΣΠ έχουν εξαχθεί με ακρίβεια χρήσιμα γεωμετρικά στοιχεία της λεκάνης. Τα τελικά βήματα ήταν η εξαγωγή του

συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος και η εξαγωγή του υδρογραφήματος άμεσης απορροής. Βρέθηκε ότι η παροχή αιχμής του ρέματος πριν τις πυρκαγιές ήταν  $253 \text{ m}^3/\text{s}$  για χρονικό βήμα 15 λεπτών, μια αρκετά μεγάλη παροχή για τα δεδομένα της εν λόγω λεκάνης. Αυτή η τιμή οφείλεται στην ύπαρξη μεγάλων κλίσεων μιας και το ρέμα ξεκινάει από υψόμετρο 1200 m και καταλήγει σε υψόμετρο περίπου 135 m.

Η μεθοδολογία για την εύρεση των πλημμυρικών υδρογραφημάτων μετά τη φωτιά βασίστηκε σε μετρήσεις πεδίου. Πιο συγκεκριμένα, αναλύθηκε η σημασία του παράγοντα αριθμού καμπύλης (CN) χρησιμοποιώντας την μέθοδο SCS ώστε να μετασχηματιστεί η βροχόπτωση σε απορροή. Η πλημμυρική παροχή αιχμής του υδρογραφήματος άμεσης απορροής που προέκυψε από το πραγματικό υετόγραμμα έγινε ίση με εκείνη που προέκυψε από δεδομένα πεδίου και κατέστη, έτσι, δυνατόν να βρεθεί ο αριθμός καμπύλης CN μετά την πυρκαγιά. Σημειωτέον ότι με τις αλλαγές του CN άλλαζε ταυτόχρονα και ο χρόνος συγκέντρωσης  $t_c$ . Ο σταθμισμένος αριθμός καμπύλης εισήχθη στο υετόγραμμα σχεδιασμού και με σταθερό το μοναδιαίο υδρογράφημα, παρήχθη το υδρογράφημα άμεσης απορροής και εκτιμήθηκε εύκολα η παροχή αιχμής. Η παροχή αιχμής μετά την πυρκαγιά ήταν υψηλότερη,  $295 \text{ m}^3/\text{s}$ , και η μεταβολή είναι της τάξης του 17%. Η μεταβολή κρίνεται φυσιολογική μιας και αναπόφευκτα το πρώτο διάστημα μετά τις πυρκαγιές η υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης αλλάζει και η διαπερατότητα του εδάφους γίνεται μικρότερη.

Κατά την ημικατανεμημένη προσέγγιση, η λεκάνη διασπάστηκε όπως προείπαμε σε δύο υπολεκάνες και το υδρογράφημα της πλημμύρας της καμένης έκτασης διοδεύθηκε στην έξοδο της συνολικής λεκάνης. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα HEC-HMS και η μεθοδολογία και πριν και μετά τις πυρκαγιές περιλάμβανε τα βήματα που χρησιμοποιήσαμε και κατά την αδρομερή προσέγγιση (εικονικό υετόγραμμα σχεδιασμού, μέθοδος SCS, μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS, αλλά και διόδευση με την μέθοδο Muskingum-Cunge). Και σε αυτή την προσέγγιση, σημαντικό σημείο ήταν η εύρεση του αριθμού CN μετά τις πυρκαγιές, με δοκιμές στο λογισμικό, με ταυτόχρονες μεταβολές του χρόνου συγκέντρωσης. Παρατηρείται ότι, και σε αυτή την προσέγγιση, υπάρχει αύξηση των πλημμυρικών παροχών στην έξοδο. Οι παροχές αιχμής είναι μεγαλύτερες από ότι στην αδρομερή προσέγγιση αν αυτές προσεγγίζουν σε αναλογία αύξησης (23%), εκείνες που εξήχθησαν με την αδρομερή προσέγγιση.

Πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι οι δυσκολίες στην ποσοτική προσέγγιση του θέματος ήταν πολλές. Θα αρκούσε ένας σταθμηγράφος και ένας υδρομετρικός σταθμός στο σημείο εξόδου για να υπάρχει σχετική βεβαιότητα στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Ελλείψει τέτοιων μέσων, η ανάλυσή μας έγινε με προσεγγιστικές μεθόδους, που οπωσδήποτε εμπεριέχουν αβεβαιότητα και σφάλματα.

Η παροχή αιχμής μετά τις πυρκαγιές (με βάση τις μετρήσεις μας) μας προβλημάτισε ως μεγαλύτερη της αναμενόμενης και υπήρχε το πρόβλημα ότι, μέχρι την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, δεν υπήρξε άλλο γεγονός ισχυρής βροχόπτωσης ώστε να επιβεβαιωθεί η ακρίβειά της. Επίσης, η τιμή του CN στην καμένη έκταση ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από την αναμενόμενη βάσει βιβλιογραφίας, με το CN βάσει των μετρήσεών μας να είναι  $CN = 81.8$  με την αδρομερή προσέγγιση και  $CN = 83.1$  με την ημικατανεμημένη προσέγγιση, αντί του  $CN = 66$  που αναμενόταν για δασική έκταση (καμένη) βιβλιογραφικά.

Υπάρχουν τρεις λόγοι που μπορεί να συντέλεσαν στην υψηλή αυτή τιμή παροχής, όπως και στην υψηλότερη τιμή του CN που προέκυψε για καμένες εκτάσεις από ότι βιβλιογραφικά αναφέρεται:

- Η αβεβαιότητα της μέτρησης της πλημμυρικής στάθμης του ρέματος είναι σχετικά σημαντική, μιας που βασίστηκε κατά κύριο λόγο σε αυτόπτες μάρτυρες του ύψους της πλημμύρας στο σημείο εξόδου τη συγκεκριμένη ημερομηνία. Ενδεχόμενη «υπερβολή» από μέρους τους για λόγους εστίασης της προσοχής δεν πρέπει να αποκλεισθεί.
- Εκτός αυτού, τα βροχομετρικά δεδομένα από τον ΑΜΣ Ζωγράφου, ακόμα και από το σταθμό Τατοΐου, θεωρούνται ευμενέστερα από αυτά που θα αναμέναμε για ψηλά υψόμετρα της Πάρνηθας από όπου πηγάζει το ρέμα (υψόμετρο 1200 m, αντί 219 m υψόμετρο του ΑΜΣ Ζωγράφου). Γι' αυτό και δικαιολογείται εν μέρει μια υπερεκτίμηση του CN και συνεπώς μια παροχή σχεδιασμού μεγαλύτερη της αναμενόμενης.
- Για τον ίδιο λόγο, η μετατροπή του  $CN_I$  σε  $CN_{II}$  (από  $CN_I = 65.6$  σε  $CN_{II} = 81.8$ ) κατά το γεγονός της 9ης Δεκεμβρίου 2007, η οποία έγινε με τα δεδομένα του σταθμού του Ζωγράφου, ενδεχομένως να μην ανταποκρίνεται στην κατάσταση της προηγούμενης εδαφικής υγρασίας 5 ημερών (AMC) στην Πάρνηθα, δηλαδή στην Πάρνηθα πιθανόν η προηγούμενη εδαφική υγρασία πριν το γεγονός να ήταν εξαρχής τύπου II.

Στο σημείο αυτό πρέπει να πούμε πως αρκετές μελέτες έχουν αποδείξει ότι σε λεκάνες που έχουν καεί, τα πλημμυρικά φαινόμενα αυξάνονται τον πρώτο χρόνο μετά τη φωτιά, ενώ, το δεύτερο χρόνο, η απόκριση της λεκάνης σε πλημμυρικά φαινόμενα είναι μικρότερη από ότι στον πρώτο. Αυτό το συμπέρασμα οδηγεί στη θεώρηση ότι το παραγόμενο υδρογράφημα είναι χρονικά εξαρτημένο και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για λίγα χρόνια μετά τη φωτιά.

Τα υδρογραφήματα που παρήχθησαν αντανακλούν τις επιδράσεις των αλλαγών από κανονικές συνθήκες σε συνθήκες μετά από εκτεταμένη πυρκαγιά. Τα αποτελέσματα που αναφέρονται στην εργασία υποστηρίζουν την υπόθεση ότι το υδρολογικό καθεστώς της λεκάνης αλλάζει σαν αποτέλεσμα της φωτιάς, ειδικά τα πρώτα χρόνια μετά την εκδήλωση του φαινομένου.

Πάντως πρέπει να πούμε στο σημείο αυτό ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου δεν επιβεβαιώνουν τον αυξημένο φόβο μεγάλων πλημμυρών στις κατοικημένες περιοχές του Ασπροπύργου και των γύρω περιοχών μετά τις πυρκαγιές. Η αύξηση των παροχών αιχμής δεν είναι τόσο μεγάλη στα κατάντη μετά τις φωτιές ώστε να είναι βάσιμοι οι φόβοι αυτοί. Κρίνουμε λοιπόν ότι η μεγάλη έκταση που είχε πάρει το θέμα των πλημμυρών στην Πάρνηθα και του συγκεκριμένου ρέματος ενέχει στοιχεία κινδυνολογίας. Προβλέψεις που ακούστηκαν, ότι π.χ. η απορροή θα είναι ιδιαίτερος μεγαλύτερη μετά τις πυρκαγιές από ότι πριν, δεν φαίνεται να αντανακλούν την πραγματικότητα. Σε λίγα χρόνια εξάλλου, η φυσική αναγέννηση των δασών θα επαναφέρει την λεκάνη στην αρχική κατάσταση, με την προϋπόθεση, βέβαια, ότι δεν θα επέλθει ξανά κάψιμο της περιοχής, γιατί τότε η καταστροφή θα είναι πολύ μεγαλύτερη. Το ρέμα της Γιαννούλας έχει μια χρόνια ικανότητα παραγωγής πλημμυρών λόγω των μεγάλων κλίσεων και του μεγάλου υψομέτρου από το οποίο πηγάζει και η θωράκιση των κατάντη περιοχών (αλλά και της ορεινής λεκάνης) με αντιπλημμυρικά έργα θεωρείται επιβεβλημένη ανεξάρτητα της «αφορμής» που δόθηκε για προσοχή στο θέμα αυτό λόγω των πυρκαγιών.

Πρέπει πάντως να τονιστεί ότι, προκειμένου να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα και να αυξηθεί η ακρίβεια και η γενικότητά τους, η προτεινόμενη μεθοδολογία πρέπει να εφαρμοσθεί και σε άλλες λεκάνες και με μεγαλύτερη επάρκεια δεδομένων.

Γενικά, η επικινδυνότητα μιας πλημμύρας εξαρτάται από παράγοντες που ελέγχουν τις καταστροφές που γίνονται από αυτές, όπως η χρήση γης της λεκάνης κατάκλυσης, το μέγεθος (βάθος και ταχύτητα του νερού) και η συχνότητα της πλημμύρας, ο ρυθμός ανόδου και η διάρκεια της πλημμύρας, το βάρος των ιζημάτων που αποτίθεται κ.α. Τα προληπτικά και ρυθμιστικά μέτρα για τις πλημμύρες περιλαμβάνουν διάφορες προσεγγίσεις και κυρίως μηχανικές κατασκευές και σχεδιασμούς όπως αναχώματα, δεξαμενές για αποθήκευση νερού, συστήματα επί τόπου συγκράτησης του νερού των καταγίδων, διαμόρφωση των κοιτών των ρευμάτων με σκοπό της διοχέτευση των νερών της πλημμύρας (Λέκκας, 1996). Τέτοια διαμόρφωση έχει γίνει από το 1999 στο ρέμα της Γιαννούλας. (Πέππας, 2005). Ένα μεγάλο σφάλμα που συνδέεται με τα τεχνικά έργα πρόληψης είναι ότι δημιουργούν μια εσφαλμένη αίσθηση ασφάλειας, η οποία οδηγεί σε αστικοποίηση της λεκάνης κατάκλυσης. Τα ρυθμιστικά μέτρα πρέπει να περιλαμβάνουν διαμόρφωση της λεκάνης κατάκλυσης για την αντιμετώπιση της πλημμύρας. Έτσι πρέπει να γίνεται σχεδιασμός σύμφωνα με τη φύση. Στις περισσότερες περιπτώσεις η πιο ρεαλιστική και αποτελεσματική λύση είναι ο συνδυασμός φυσικών εμποδίων φραγμάτων και της διαμόρφωσης της λεκάνης κατάκλυσης, έχοντας πάντα σαν στόχο τις λιγότερες φυσικές μεταβολές του ποτάμιου συστήματος.

Ένα ακόμα μέσο πρόληψης μπορεί να είναι η χαρτογράφηση περιοχών πλημμυρικής επικινδυνότητας, η οποία είναι μέσο που παρέχει πληροφορίες για τη λεκάνη κατάκλυσης και το σχεδιασμό χρήσης γης. Αυτοί οι χάρτες μπορεί να απεικονίζουν παλαιές πλημμύρες ή πλημμύρες συγκεκριμένης περιόδου επαναφοράς π.χ. 100 χρόνων. Τέτοιοι χάρτες μπορεί να παραχθούν από ανάλυση των δεδομένων παροχής του ρεύματος από αξιόπιστους σταθμούς με αρκετά χρόνια καταγραφής. Βέβαια τέτοια δεδομένα είναι δύσκολα διαθέσιμα στον ελλαδικό χώρο και ιδίως για μικρότερα ρεύματα.

Οι πλημμύρες μπορεί να χαρτογραφηθούν από αεροφωτογραφίες που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια πλημμυρών ή μπορεί να υπολογιστούν από την υψηλή στάθμη του νερού και από τις αποθέσεις των πλημμυρών στη λεκάνη κατάκλυσης που μετρήθηκαν στην ύπαιθρο από την υποχώρηση του νερού. Προσεκτική μελέτη των εδαφών και της βλάστησης μπορεί επίσης να βοηθήσει στην εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας. Τα εδάφη στις λεκάνες κατάκλυσης είναι συχνά διαφορετικά από τα εδάφη στα ανάντη και με ευνοϊκές συνθήκες, συγκεκριμένα εδάφη μπορούν να συσχετιστούν με πλημμύρα γνωστής συχνότητας.

Συμπερασματικά λοιπόν η χαρτογράφηση όλων των παραγόντων που συμμετέχουν στην εκδήλωση ενός πλημμυρικού φαινομένου (π.χ. είδος υδρογραφικού δικτύου, μορφολογικές κλίσεις και κατανομή τους) είναι μια πρώτη ενέργεια για τη μείωση του κινδύνου. Στη συνέχεια, η επεξεργασία όλων των δεδομένων μέσω ενός συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών θα υποδείξει τις επικίνδυνες περιοχές στα πλαίσια εφαρμογής ενός σχεδίου διαχείρισης του πλημμυρικού κινδύνου.

## Αναφορές

---

### Στην ελληνική γλώσσα

- Γκόφας, Α., *Εγχειρίδιο δασοπροστασίας*, Εκδόσεις Γιαχούδη-Παπούλη, Θεσσαλονίκη, 2001.
- Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού, Παροχή χαρτών, *Α/Φ και ψηφιακού μοντέλου εδάφους*, Αθήνα, 2007.
- Ι.Γ.Μ.Ε., *Παροχή γεωλογικών χαρτών Αθήνα-Ελευσίς*, 2007.
- Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών, ΕΘΙΑΓΕ, *Παροχή εδαφολογικών χαρτών και εδαφοτομών εντός της λεκάνης απορροής του ρέματος Γιαννούλα*, Αθήνα, 2007.
- Κοζάνης, Σ., Α. Χριστοφίδης, και Α. Ευστρατιάδης, *Περιγραφή συστήματος διαχείρισης και επεξεργασίας δεδομένων «Υδρογνώμων»*, Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ), Ανάδοχος: NAMA, Τεύχος 2, 141 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1995.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Κουτσογιάννης, Δ., *Στατιστική Υδρολογία*, Εκπαιδευτικές σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997.
- Λέκκας, Ε., *Φυσικές και Τεχνολογικές καταστροφές*, Αθήνα, 1996.
- Ναλμπάντης, Ι., *Προστασία και Διαχείριση Υδατικών Πόρων*, Εκπαιδευτικές σημειώσεις, Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007
- Πέππας, Ι. και Αντωνίου, Ν., *Υδρολογική μελέτη ρέματος Αγ. Γεωργίου, Μελέτη στα πλαίσια διευθέτησης της κοίτης του χειμάρρου*, ΥΠΕΧΩΔΕ, Αθήνα, 2005.
- Σκοπελίτη, Α., και Στάμου, Λ., *Υδρολογική Ανάλυση Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους σε περιβάλλον ΓΣΠ*, Εκπαιδευτικές σημειώσεις μαθήματος ΓΣΠ στους Υδατικούς Πόρους, Μεταπτυχιακό πρόγραμμα Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2005.
- Τζαλαβρά, Σ., *Υδρολογική μοντελοποίηση μέσω των ΓΣΠ, εφαρμογή Βόρεια Πίνδος*, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1998.
- Τσακίρης, Γ., *Τεχνική Υδρολογία*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1995.
- Τσουμάνη, Ο., *Αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός ΕΜΠ Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου*, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1994.
- Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, *Παροχή ψηφιακών χαρτών χρήσεων γης σε μορφή ΓΣΠ (Corine)*, Αθήνα, 2007.

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

## Ξενόγλωσσες

Aronica, G., Candela, A., Santoro, M, Effects of forest fires on flood frequency curves in a Mediterranean catchment. In: Complexity and Integrated Resources Management, *Trans. Second Biennial Meeting of the Int. Environmental Modelling*, vol.3, 1147-1183.IEMSS publ., 2004.

Aronica, G., Candela, A., Santoro, M, Changes in the hydrological response of two Sicilian basins affected by fires. In: Friend 2002-Regional Hydrology: Bridging the gap between research and practice *Proc. Cape Town Conf*, March 2002, 263-172, IAHS Publ. 274, Wallingford, UK., 2002.

Brown, J.A.H, Hydrologic effects of a bushfire in a catchment in south-eastern New South Wales. *J. Hydrol.*15, 77-96, 1972.

Chow, V.T., D.R. Maidment and L.W. Mays, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, 1988..

De Bano, L.F., The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *J. Hydrol.* 231-232, 198-206, 2002.

De Michelle C., and Salvadori, G., On the derived flood frequency distribution: analytical formulation and the influence of antecedent soil moisture condition. *J. Hydrol.* 262, 245-258, 2002.

Doehring, D.O., The effect of fire on geomorphic processes in the San Gabriel Mountains, California. In: Parker, R.B. (Ed.), *Contributions to Geology*. Univ. of Wyoming, 7, 1: 43-61, 1968.

Hydrologic modeling System HEC-HMS, *Technical Reference Manual*, 2000

Huff, F. A., Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms, *Water Resources Research*, 3, 1007-1019.

Inbar, M., Tamir, M., and Wittenberg, L., Runoff and erosion processes after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area. *Geomorphol.*24,17-33, 1998.

Lavabre J., Torres, D.S., and Cernesson, F., Changes in the hydrological response of a small Mediterranean catchment a year after a wildfire. *J. Hydrol.*142, 273-299, 1993.

Loukas, A., Flood frequency estimation by a derived distribution procedure *J. Hydrol.* 255, 69-89., 2002.

Maidment I., *Handbook of Hydrology*, 1993.

Nalbantis, I., Ch. Obled, and J.Y. Rodriguez, Unit hydrograph and effective precipitation identification, *J. Hydrol.*,168, 127-157, 1995.

Scott, D.F., The hydrological effects of fire in South African mountain catchments. *J. Hydrol.* 150, 409-432, 1993.

Scott, D.F., and Van Wyk, D.B., The effects of wildfire on soil wettability and hydrological behaviour of an afforested catchment. *J. Hydrol.* 121, 239-256, 1990.

Shaw, E., *Hydrology in practice*, 2nd edition, Great Britain, 1983.

## **Από διαδίκτυο**

[http:// floraattica.blogspot.com](http://floraattica.blogspot.com)

<http://www.focusmag.gr>

<http://insma.udg.es/isse2001/papers/Batalla.html>

<http://www.kathimerini.gr>

<http://www.minenv.gr>

[http:// www.parnitha-np.gr](http://www.parnitha-np.gr)

<http://www.thriassio.gr>

<http://utopia.duth.gr>

## Παράρτημα 1: Υετογράμματα σχεδιασμού

Πίνακας Π.1: Υετογράμματα σχεδιασμού για  $T = 10$  έτη

Διάρκεια (h)	Ένταση (mm/h)	Αθρ.βροχ (mm)	Βροχ.ανά διαστ. (mm)	Χρόνος (h)	Βρόχ. (mm)
0	160.56	0.00			
0.25	98.43	24.61	24.61	0-0.25	0.49
0.5	72.94	36.47	11.86	0.25-0.5	0.51
0.75	58.73	44.05	7.58	0.5-0.75	0.53
1	49.56	49.56	5.51	0.75-1	0.56
1.25	43.10	53.87	4.31	1-1.25	0.58
1.5	38.28	57.42	3.54	1.25-1.5	0.61
1.75	34.53	60.42	3.01	1.5-1.75	0.64
2	31.52	63.04	2.61	1.75-2	0.67
2.25	29.05	65.35	2.32	2-2.25	0.71
2.5	26.97	67.43	2.08	2.25-2.5	0.75
2.75	25.21	69.32	1.89	2.5-2.75	0.80
3	23.68	71.05	1.73	2.75-3	0.86
3.25	22.36	72.65	1.60	3-3.25	0.93
3.5	21.18	74.14	1.49	3.25-3.5	1.01
3.75	20.14	75.54	1.39	3.5-3.75	1.11
4	19.21	76.84	1.31	3.75-4	1.24
4.25	18.37	78.08	1.24	4-4.25	1.39
4.5	17.61	79.25	1.17	4.25-4.5	1.60
4.75	16.92	80.36	1.11	4.5-4.75	1.89
5	16.28	81.42	1.06	4.75-5	2.32
5.25	15.70	82.43	1.01	5-5.25	3.01
5.5	15.16	83.40	0.97	5.25-5.5	4.31
5.75	14.67	84.34	0.93	5.5-5.75	7.58
6	14.21	85.23	0.90	5.75-6	24.61
6.25	13.78	86.09	0.86	6-6.25	11.86
6.5	13.37	86.93	0.83	6.25-6.5	5.51
6.75	13.00	87.73	0.80	6.5-6.75	3.54
7	12.64	88.51	0.78	6.75-7	2.61
7.25	12.31	89.27	0.75	7-7.25	2.08
7.5	12.00	90.00	0.73	7.25-7.5	1.73
7.75	11.70	90.71	0.71	7.5-7.75	1.49
8	11.42	91.40	0.69	7.75-8	1.31
8.25	11.16	92.07	0.67	8-8.25	1.17
8.5	10.91	92.73	0.66	8.25-8.5	1.06
8.75	10.67	93.37	0.64	8.5-8.75	0.97
9	10.44	93.99	0.62	8.75-9	0.90
9.25	10.23	94.60	0.61	9-9.25	0.83
9.5	10.02	95.19	0.59	9.25-9.5	0.78
9.75	9.82	95.77	0.58	9.5-9.75	0.73
10	9.63	96.34	0.57	9.75-10	0.69
10.25	9.45	96.90	0.56	10-10.25	0.66
10.5	9.28	97.44	0.54	10.25-10.5	0.62
..	..	..	..	..	..



Πίνακας Π.2: Υετόγραμμα σχεδιασμού για  $T = 100$  έτη

Διάρκεια (h)	Ένταση (mm/h)	Αθρ.βροχ (mm)	Βροχ.ανά διαστ. (mm)	Χρόνος (h)	Βροχ (mm)
0	275.26	0.00			
0.25	168.76	42.19	42.19	0-0.25	0.85
0.5	125.05	62.53	20.34	0.25-0.5	0.88
0.75	100.69	75.52	12.99	0.5-0.75	0.91
1	84.96	84.96	9.45	0.75-1	0.95
1.25	73.89	92.36	7.40	1-1.25	1.00
1.5	65.62	98.44	6.07	1.25-1.5	1.04
1.75	59.20	103.59	5.16	1.5-1.75	1.09
2	54.04	108.08	4.48	1.75-2	1.15
2.25	49.80	112.04	3.97	2-2.25	1.22
2.5	46.24	115.61	3.56	2.25-2.5	1.29
2.75	43.22	118.85	3.24	2.5-2.75	1.38
3	40.61	121.82	2.97	2.75-3	1.48
3.25	38.33	124.56	2.74	3-3.25	1.60
3.5	36.32	127.11	2.55	3.25-3.5	1.74
3.75	34.53	129.50	2.39	3.5-3.75	1.91
4	32.94	131.74	2.24	3.75-4	2.12
4.25	31.50	133.86	2.12	4-4.25	2.39
4.5	30.19	135.87	2.01	4.25-4.5	2.74
4.75	29.00	137.77	1.91	4.5-4.75	3.24
5	27.92	139.59	1.82	4.75-5	3.97
5.25	26.92	141.33	1.74	5-5.25	5.16
5.5	26.00	142.99	1.66	5.25-5.5	7.40
5.75	25.15	144.59	1.60	5.5-5.75	12.99
6	24.35	146.12	1.54	5.75-6	42.19
6.25	23.62	147.60	1.48	6-6.25	20.34
6.5	22.93	149.03	1.43	6.25-6.5	9.45
6.75	22.28	150.41	1.38	6.5-6.75	6.07
7	21.68	151.75	1.34	6.75-7	4.48
7.25	21.11	153.04	1.29	7-7.25	3.56
7.5	20.57	154.29	1.26	7.25-7.5	2.97
7.75	20.07	155.51	1.22	7.5-7.75	2.55
8	19.59	156.70	1.19	7.75-8	2.24
8.25	19.13	157.85	1.15	8-8.25	2.01
8.5	18.70	158.98	1.12	8.25-8.5	1.82
8.75	18.29	160.07	1.09	8.5-8.75	1.66
9	17.90	161.14	1.07	8.75-9	1.54
9.25	17.53	162.18	1.04	9-9.25	1.43
9.5	17.18	163.20	1.02	9.25-9.5	1.34
9.75	16.84	164.19	1.00	9.5-9.75	1.26
10	16.52	165.17	0.97	9.75-10	1.19
10.25	16.21	166.12	0.95	10-10.25	1.12
10.5	15.91	167.06	0.93	10.25-10.5	1.07
10.75	15.63	167.97	0.91	10.5-10.75	1.02
11	15.35	168.87	0.90	10.75-11	0.97
11.25	15.09	169.75	0.88	11-11.25	0.93
11.5	14.84	170.61	0.86	11.25-11.5	0.90
11.75	14.59	171.46	0.85	11.5-11.75	0.86
12	14.36	172.29	0.83	11.75-12	0.83

Πίνακας Π.3: Υετόγραμμα σχεδιασμού για  $T = 200$  έτη

Διάρκεια (h)	Ένταση (mm/h)	Αθρ.βροχ (mm)	Βροχ.ανά διαστ. (mm)	Χρόνος (h)	Βροχ. (mm)
0	317.73	0.00			
0.25	194.80	48.70	48.70	0-0.25	0.98
0.5	144.35	72.17	23.48	0.25-0.5	1.02
0.75	116.23	87.17	15.00	0.5-0.75	1.06
1	98.07	98.07	10.90	0.75-1	1.10
1.25	85.29	106.61	8.54	1-1.25	1.15
1.5	75.75	113.62	7.01	1.25-1.5	1.20
1.75	68.33	119.58	5.95	1.5-1.75	1.26
2	62.38	124.75	5.17	1.75-2	1.33
2.25	57.48	129.33	4.58	2-2.25	1.41
2.5	53.38	133.45	4.11	2.25-2.5	1.49
2.75	49.89	137.19	3.74	2.5-2.75	1.59
3	46.87	140.61	3.43	2.75-3	1.71
3.25	44.24	143.78	3.17	3-3.25	1.84
3.5	41.92	146.73	2.95	3.25-3.5	2.00
3.75	39.86	149.48	2.76	3.5-3.75	2.20
4	38.02	152.07	2.59	3.75-4	2.44
4.25	36.36	154.51	2.44	4-4.25	2.76
4.5	34.85	156.83	2.32	4.25-4.5	3.17
4.75	33.48	159.03	2.20	4.5-4.75	3.74
5	32.23	161.13	2.10	4.75-5	4.58
5.25	31.07	163.13	2.00	5-5.25	5.95
5.5	30.01	165.05	1.92	5.25-5.5	8.54
5.75	29.03	166.90	1.84	5.5-5.75	15.00
6	28.11	168.67	1.77	5.75-6	48.70
6.25	27.26	170.38	1.71	6-6.25	23.48
6.5	26.47	172.03	1.65	6.25-6.5	10.90
6.75	25.72	173.62	1.59	6.5-6.75	7.01
7	25.02	175.16	1.54	6.75-7	5.17
7.25	24.37	176.65	1.49	7-7.25	4.11
7.5	23.75	178.10	1.45	7.25-7.5	3.43
7.75	23.16	179.51	1.41	7.5-7.75	2.95
8	22.61	180.88	1.37	7.75-8	2.59
8.25	22.09	182.21	1.33	8-8.25	2.32
8.5	21.59	183.50	1.30	8.25-8.5	2.10
8.75	21.12	184.77	1.26	8.5-8.75	1.92
9	20.67	186.00	1.23	8.75-9	1.77
9.25	20.24	187.20	1.20	9-9.25	1.65
9.5	19.83	188.38	1.18	9.25-9.5	1.54
9.75	19.44	189.53	1.15	9.5-9.75	1.45
10	19.07	190.65	1.12	9.75-10	1.37
10.25	18.71	191.75	1.10	10-10.25	1.30
10.5	18.36	192.83	1.08	10.25-10.5	1.23
10.75	18.04	193.89	1.06	10.5-10.75	1.18
11	17.72	194.92	1.03	10.75-11	1.12
11.25	17.42	195.94	1.02	11-11.25	1.08
11.5	17.12	196.93	1.00	11.25-11.5	1.03
11.75	16.84	197.91	0.98	11.5-11.75	1.00
12	16.57	198.87	0.96	11.75-12	0.96

Πίνακας Π.4: Υετόγραμμα σχεδιασμού για  $T = 500$  έτη

Διάρκεια (h)	Ένταση (mm/h)	Αθρ.βροχ (mm)	Βροχ.ανά διαστ. (mm)	Χρόνος (h)	Βροχ (mm)
0	381.00	0.00			
0.25	233.58	58.40	58.40	0-0.25	1.17
0.5	173.09	86.54	28.15	0.25-0.5	1.22
0.75	139.37	104.53	17.98	0.5-0.75	1.27
1	117.60	117.60	13.07	0.75-1	1.32
1.25	102.27	127.84	10.24	1-1.25	1.38
1.5	90.83	136.25	8.41	1.25-1.5	1.44
1.75	81.93	143.39	7.14	1.5-1.75	1.52
2	74.79	149.59	6.20	1.75-2	1.60
2.25	68.93	155.08	5.49	2-2.25	1.69
2.5	64.01	160.02	4.93	2.25-2.5	1.79
2.75	59.82	164.50	4.48	2.5-2.75	1.91
3	56.20	168.61	4.11	2.75-3	2.05
3.25	53.05	172.41	3.80	3-3.25	2.21
3.5	50.27	175.94	3.53	3.25-3.5	2.40
3.75	47.80	179.24	3.30	3.5-3.75	2.64
4	45.59	182.35	3.11	3.75-4	2.93
4.25	43.60	185.28	2.93	4-4.25	3.30
4.5	41.79	188.06	2.78	4.25-4.5	3.80
4.75	40.15	190.70	2.64	4.5-4.75	4.48
5	38.64	193.21	2.52	4.75-5	5.49
5.25	37.26	195.61	2.40	5-5.25	7.14
5.5	35.98	197.92	2.30	5.25-5.5	10.24
5.75	34.80	200.13	2.21	5.5-5.75	17.98
6	33.71	202.25	2.13	5.75-6	58.40
6.25	32.69	204.30	2.05	6-6.25	28.15
6.5	31.73	206.28	1.98	6.25-6.5	13.07
6.75	30.84	208.19	1.91	6.5-6.75	8.41
7	30.00	210.03	1.85	6.75-7	6.20
7.25	29.22	211.83	1.79	7-7.25	4.93
7.5	28.48	213.56	1.74	7.25-7.5	4.11
7.75	27.77	215.25	1.69	7.5-7.75	3.53
8	27.11	216.89	1.64	7.75-8	3.11
8.25	26.48	218.49	1.60	8-8.25	2.78
8.5	25.89	220.04	1.55	8.25-8.5	2.52
8.75	25.32	221.56	1.52	8.5-8.75	2.30
9	24.78	223.04	1.48	8.75-9	2.13
9.25	24.27	224.48	1.44	9-9.25	1.98
9.5	23.78	225.89	1.41	9.25-9.5	1.85
9.75	23.31	227.27	1.38	9.5-9.75	1.74
10	22.86	228.61	1.35	9.75-10	1.64
10.25	22.43	229.93	1.32	10-10.25	1.55
10.5	22.02	231.23	1.29	10.25-10.5	1.48
10.75	21.63	232.49	1.27	10.5-10.75	1.41
11	21.25	233.73	1.24	10.75-11	1.35
11.25	20.88	234.95	1.22	11-11.25	1.29
11.5	20.53	236.14	1.19	11.25-11.5	1.24
11.75	20.20	237.32	1.17	11.5-11.75	1.19
12	19.87	238.47	1.15	11.75-12	1.15

Πίνακας Π.5: Υετόγραμμα σχεδιασμού για  $T = 1000$  έτη

Διάρκεια (h)	Ένταση (mm/h)	Αθρ.βροχ (mm)	Βροχ.ανά διαστ. (mm)	Χρόνος (h)	Βροχ (mm)
0	434.93	0.00			
0.25	266.65	66.66	66.66	0-0.25	1.34
0.5	197.59	98.80	32.13	0.25-0.5	1.39
0.75	159.10	119.32	20.53	0.5-0.75	1.45
1	134.25	134.25	14.93	0.75-1	1.51
1.25	116.75	145.94	11.69	1-1.25	1.57
1.5	103.69	155.54	9.60	1.25-1.5	1.65
1.75	93.53	163.68	8.15	1.5-1.75	1.73
2	85.38	170.77	7.08	1.75-2	1.82
2.25	78.68	177.04	6.27	2-2.25	1.93
2.5	73.07	182.67	5.63	2.25-2.5	2.04
2.75	68.29	187.79	5.12	2.5-2.75	2.18
3	64.16	192.48	4.69	2.75-3	2.34
3.25	60.56	196.81	4.34	3-3.25	2.52
3.5	57.38	200.85	4.03	3.25-3.5	2.74
3.75	54.56	204.62	3.77	3.5-3.75	3.01
4	52.04	208.16	3.55	3.75-4	3.35
4.25	49.77	211.51	3.35	4-4.25	3.77
4.5	47.71	214.68	3.17	4.25-4.5	4.34
4.75	45.83	217.69	3.01	4.5-4.75	5.12
5	44.11	220.56	2.87	4.75-5	6.27
5.25	42.53	223.31	2.74	5-5.25	8.15
5.5	41.08	225.94	2.63	5.25-5.5	11.69
5.75	39.73	228.46	2.52	5.5-5.75	20.53
6	38.48	230.88	2.43	5.75-6	66.66
6.25	37.32	233.22	2.34	6-6.25	32.13
6.5	36.23	235.48	2.26	6.25-6.5	14.93
6.75	35.21	237.66	2.18	6.5-6.75	9.60
7	34.25	239.77	2.11	6.75-7	7.08
7.25	33.35	241.81	2.04	7-7.25	5.63
7.5	32.51	243.80	1.98	7.25-7.5	4.69
7.75	31.71	245.72	1.93	7.5-7.75	4.03
8	30.95	247.60	1.87	7.75-8	3.55
8.25	30.23	249.42	1.82	8-8.25	3.17
8.5	29.55	251.19	1.77	8.25-8.5	2.87
8.75	28.91	252.92	1.73	8.5-8.75	2.63
9	28.29	254.61	1.69	8.75-9	2.43
9.25	27.70	256.26	1.65	9-9.25	2.26
9.5	27.14	257.87	1.61	9.25-9.5	2.11
9.75	26.61	259.44	1.57	9.5-9.75	1.98
10	26.10	260.98	1.54	9.75-10	1.87
10.25	25.61	262.48	1.51	10-10.25	1.77
10.5	25.14	263.96	1.47	10.25-10.5	1.69
10.75	24.69	265.40	1.45	10.5-10.75	1.61
11	24.26	266.82	1.42	10.75-11	1.54
11.25	23.84	268.21	1.39	11-11.25	1.47
11.5	23.44	269.57	1.36	11.25-11.5	1.42
11.75	23.06	270.91	1.34	11.5-11.75	1.36
12	22.69	272.23	1.31	11.75-12	1.31

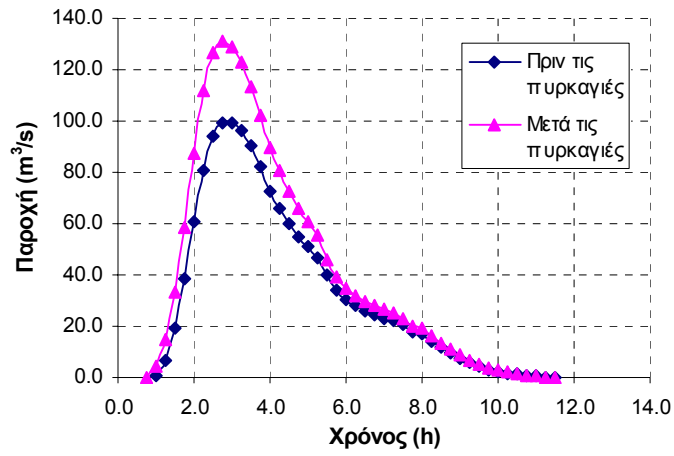
Πίνακας Π.6: Υετόγραμμα σχεδιασμού για  $T = 10000$  έτη

Διάρκεια (h)	Ένταση (mm/h)	Αθρ.βροχ (mm)	Βροχ.ανά διαστ. (mm)	Χρόνος (h)	Βροχ (mm)
0	660.16	0.00			
0.25	404.73	101.18	101.18	0-0.25	2.03
0.5	299.91	149.96	48.77	0.25-0.5	2.11
0.75	241.49	181.11	31.16	0.5-0.75	2.19
1	203.77	203.77	22.66	0.75-1	2.29
1.25	177.21	221.51	17.74	1-1.25	2.39
1.5	157.39	236.08	14.57	1.25-1.5	2.50
1.75	141.97	248.45	12.37	1.5-1.75	2.63
2	129.60	259.20	10.75	1.75-2	2.77
2.25	119.43	268.72	9.52	2-2.25	2.92
2.5	110.91	277.26	8.55	2.25-2.5	3.10
2.75	103.65	285.03	7.77	2.5-2.75	3.31
3	97.38	292.15	7.12	2.75-3	3.55
3.25	91.92	298.73	6.58	3-3.25	3.83
3.5	87.10	304.85	6.12	3.25-3.5	4.16
3.75	82.82	310.58	5.73	3.5-3.75	4.57
4	78.99	315.96	5.38	3.75-4	5.08
4.25	75.54	321.04	5.08	4-4.25	5.73
4.5	72.41	325.85	4.81	4.25-4.5	6.58
4.75	69.56	330.42	4.57	4.5-4.75	7.77
5	66.96	334.78	4.36	4.75-5	9.52
5.25	64.56	338.94	4.16	5-5.25	12.37
5.5	62.35	342.93	3.99	5.25-5.5	17.74
5.75	60.31	346.76	3.83	5.5-5.75	31.16
6	58.41	350.45	3.68	5.75-6	101.18
6.25	56.64	353.99	3.55	6-6.25	48.77
6.5	54.99	357.42	3.42	6.25-6.5	22.66
6.75	53.44	360.73	3.31	6.5-6.75	14.57
7	51.99	363.93	3.20	6.75-7	10.75
7.25	50.63	367.03	3.10	7-7.25	8.55
7.5	49.34	370.04	3.01	7.25-7.5	7.12
7.75	48.12	372.97	2.92	7.5-7.75	6.12
8	46.98	375.81	2.84	7.75-8	5.38
8.25	45.89	378.58	2.77	8-8.25	4.81
8.5	44.86	381.27	2.69	8.25-8.5	4.36
8.75	43.87	383.89	2.63	8.5-8.75	3.99
9	42.94	386.46	2.56	8.75-9	3.68
9.25	42.05	388.96	2.50	9-9.25	3.42
9.5	41.20	391.40	2.44	9.25-9.5	3.20
9.75	40.39	393.79	2.39	9.5-9.75	3.01
10	39.61	396.12	2.34	9.75-10	2.84
10.25	38.87	398.41	2.29	10-10.25	2.69
10.5	38.16	400.65	2.24	10.25-10.5	2.56
10.75	37.47	402.84	2.19	10.5-10.75	2.44
11	36.82	404.99	2.15	10.75-11	2.34
11.25	36.19	407.10	2.11	11-11.25	2.24
11.5	35.58	409.17	2.07	11.25-11.5	2.15
11.75	35.00	411.20	2.03	11.5-11.75	2.07
12	34.43	413.20	1.99	11.75-12	1.99

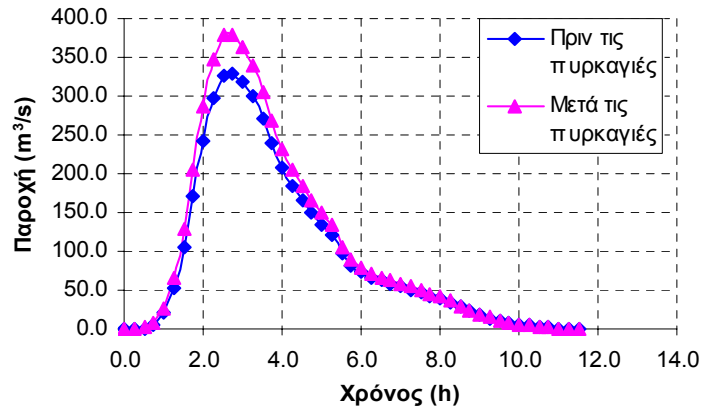
## Παράρτημα 2: Υδρογραφήματα σχεδιασμού

Πίνακας Π.7: Υδρογραφήματα σχεδιασμού πριν και μετά τις πυρκαγιές για  $T = 10 - 10000$  έτη.

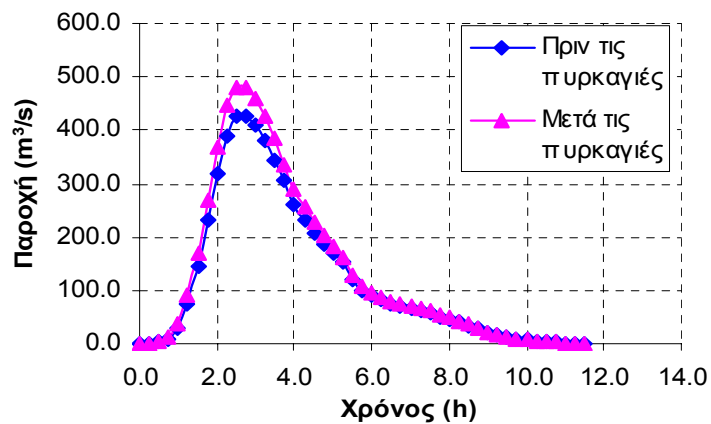
$t$ (h)	$T = 10$		$T = 100$		$T = 200$		$T = 500$		$T = 1000$		$T = 10000$	
	Πριν	Μετά	Πριν	Μετά	Πριν	Μετά	Πριν	Μετά	Πριν	Μετά	Πριν	Μετά
0.00			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.25			0.2	0.4	0.5	0.7	0.9	1.1	1.2	1.5	3.0	3.5
0.50			1.3	2.1	2.3	3.3	4.0	5.2	5.7	7.0	13.6	15.4
0.75		3.8	4.9	7.3	8.1	10.9	13.4	16.7	18.4	22.2	42.2	47.2
1.00	0.5	13.7	20.4	26.7	29.9	37.1	45.5	53.9	59.8	69.2	125.8	137.9
1.25	6.7	31.8	52.4	65.1	73.4	87.9	107.4	124.1	138.2	156.5	277.6	300.5
1.50	19.5	56.7	104.9	126.5	143.1	167.5	204.2	232.1	259.1	289.4	504.5	541.2
1.75	38.2	84.8	171.2	202.7	229.7	264.8	322.3	362.0	405.0	447.9	770.9	821.6
2	60.6	108.9	241.8	282.1	320.2	364.9	443.6	493.8	553.3	607.1	1034.5	1096.8
2.25	80.8	123.3	297.4	343.2	390.0	440.5	535.0	591.2	663.3	723.2	1222.5	1290.6
2.5	93.9	127.8	326.0	373.0	424.3	475.9	577.5	634.6	712.7	773.3	1298.8	1366.7
2.75	99.3	125.8	329.8	374.8	426.6	475.8	577.0	631.1	709.3	766.5	1280.8	1344.1
3	99.2	120.5	317.9	359.2	409.1	454.1	550.4	599.6	674.4	726.2	1208.0	1264.8
3.25	96.3	111.3	298.7	335.7	382.6	422.7	512.1	555.7	625.5	671.2	1111.8	1161.4
3.5	90.1	100.2	271.0	302.9	345.4	379.8	459.9	497.2	560.0	599.0	987.8	1029.6
3.75	82.1	88.0	240.0	266.9	304.5	333.5	403.7	434.8	490.0	522.5	858.3	892.8
4	72.7	79.2	207.7	229.9	262.5	286.4	346.5	372.1	419.6	446.2	730.6	758.6
4.25	65.8	71.3	185.2	204.6	233.6	254.2	307.6	329.7	371.9	394.8	645.0	669.1
4.5	59.7	65.1	165.3	182.0	207.9	225.7	273.0	292.0	329.5	349.2	569.2	589.7
4.75	54.9	59.8	149.2	163.7	187.1	202.5	244.8	261.1	294.8	311.6	506.3	523.6
5	50.8	54.7	135.3	147.8	168.9	182.2	220.1	234.1	264.4	278.7	451.0	465.4
5.25	47.0	45.5	121.6	132.1	151.1	162.2	195.9	207.4	234.4	246.1	396.1	407.6
5.5	39.8	38.8	97.8	105.1	120.4	127.9	154.3	161.9	183.3	190.9	304.2	311.3
5.75	34.2	34.7	82.4	88.2	101.0	106.9	129.0	134.9	152.8	158.8	252.1	257.6
6	30.7	31.8	73.4	78.4	89.9	95.0	114.6	119.7	135.6	140.8	223.2	227.8
6.25	28.2	29.6	67.1	71.5	82.0	86.5	104.4	109.0	123.5	128.0	202.8	206.9
6.5	26.2	27.7	62.1	66.1	75.8	80.0	96.4	100.6	114.0	118.1	187.0	190.7
6.75	24.6	26.1	58.0	61.7	70.8	74.6	90.0	93.8	106.3	110.1	174.1	177.6
7	23.2	24.6	54.6	58.0	66.6	70.1	84.5	88.1	99.8	103.4	163.4	166.6
7.25	21.9	23.0	51.3	54.6	62.5	65.9	79.4	82.7	93.7	97.0	153.3	156.2
7.5	20.5	19.6	47.9	50.9	58.3	61.4	74.0	77.1	87.4	90.4	142.8	145.5
7.75	17.5	18.8	40.9	43.4	49.8	52.4	63.2	65.8	74.6	77.1	121.8	124.1
8	16.8	16.1	39.0	41.5	47.6	50.0	60.3	62.7	71.1	73.6	116.1	118.3
8.25	14.4	13.4	33.5	35.6	40.8	42.9	51.7	53.8	61.0	63.1	99.6	101.4
8.5	12.0	10.8	27.8	29.5	33.8	35.5	42.8	44.6	50.5	52.2	82.5	84.0
8.75	9.6	8.5	22.4	23.8	27.3	28.6	34.5	35.9	40.7	42.1	66.4	67.7
9	7.6	6.6	17.7	18.8	21.5	22.6	27.3	28.3	32.1	33.2	52.4	53.4
9.25	5.9	5.0	13.7	14.5	16.6	17.5	21.1	21.9	24.9	25.7	40.5	41.3
..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..



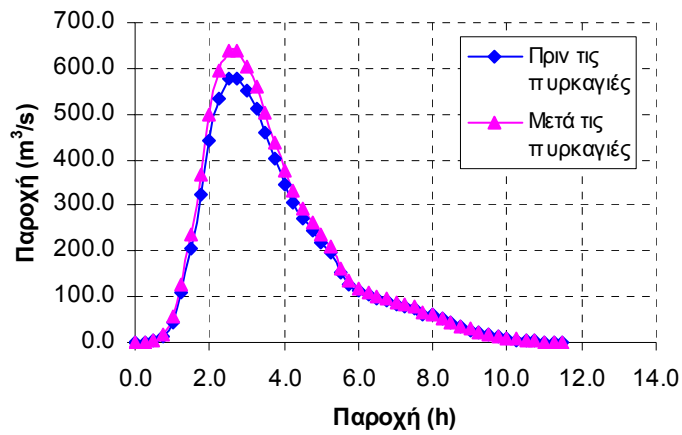
Σχήμα Π.1 Υδρογραφήματα πριν και μετά τις πυρκαγιές για  $T = 10$



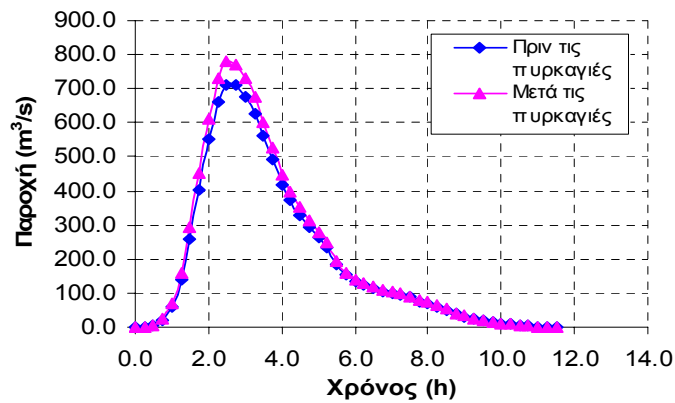
Σχήμα Π.2: Υδρογραφήματα πριν και μετά τις πυρκαγιές για  $T = 100$



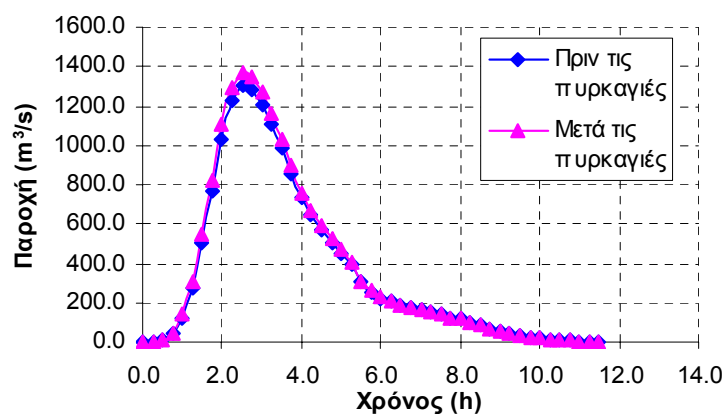
Σχήμα Π.3: Υδρογραφήματα πριν και μετά τις πυρκαγιές για  $T = 200$



Σχήμα Π.4: Υδρογραφήματα πριν και μετά τις πυρκαγιές για  $T = 500$



Σχήμα Π.5: Υδρογραφήματα πριν και μετά τις πυρκαγιές για  $T = 1000$



Σχήμα Π.6: Υδρογραφήματα πριν και μετά τις πυρκαγιές για  $T = 10000$



Πίνακας Π.8: Εύρεση τιμής CN με «ισοφάριση» μετρηθείσας παροχής στο πεδίο μετά τις πυρκαγιές με αδρομερή προσέγγιση

t (h)	Βροχόπτωση (mm)	Απώλειες (mm)	Περίσσευμα (mm)	Απορροή (m <sup>3</sup> /s)
0	0	0		
0.16	1.7	1.7	0	0.007
0.33	0.7	0.7	0	0.028
0.5	0.5	0.5	0	0.066
0.66	0.7	0.7	0	0.133
0.84	0.7	0.7	0	0.242
1	3.4	3.1	0.3	0.468
1.16	6.1	5.2	0.9	1.054
1.33	2	1.6	0.4	2.104
1.5	2	1.5	0.4	3.643
1.66	0.7	0.6	0.2	5.759
1.83	0.2	0.2	0.1	8.388
2	0	0	0	11.199
2.16	0	0	0	13.736
2.33	0	0	0	15.669
2.5	0.2	0.2	0.1	16.824
2.66	0.5	0.4	0.1	17.262
2.83	0.2	0.2	0.1	17.001
3	0	0	0	16.28
3.16	0	0	0	15.214
3.33	0	0	0	13.85
3.5	0	0	0	12.301
3.66	0	0	0	10.793
3.83	0	0	0	9.402
4	0	0	0	8.166
4.16	0	0	0	7.115
4.33	0	0	0	6.186
4.5	0	0	0	5.346
4.66	0	0	0	4.575
4.83	0	0	0	3.873
5	0	0	0	3.23
5.16	0	0	0	2.691
5.33	0	0	0	2.245
5.5	0	0	0	1.884
5.66	0	0	0	1.578
5.83	0	0	0	1.33
6	0	0	0	1.116
6.16	0	0	0	0.937
6.33	0	0	0	0.787
6.5	0	0	0	0.661
6.66	0	0	0	0.555
6.83	0	0	0	0.465
7	0	0	0	0.39
7.16	0	0	0	0.328
7.33	0	0	0	0.279
7.5	0	0	0	0.237
7.66	0	0	0	0.201
7.83	0	0	0	0.168

Πίνακας Π.9: Αδρομερής προσέγγιση με HEC-HMS: Παροχές εξόδου πριν τις πυρκαγιές  
(βήμα 15 λεπτών και  $T = 50$ )

$t$ (h)	Βροχόπτωση (mm)	Απώλειες (mm)	Περίσσειμα (mm)	Απορροή ( $m^3/s$ )
0	3.4	3.4	0	0
0.25	4.4	4.3	0.1	0.07
0.5	6.4	5.7	0.6	0.51
0.75	11.2	9	2.2	2.37
1	36.3	22.2	14.1	12.49
1.25	17.5	8.1	9.4	35.04
1.5	8.1	3.3	4.8	72.76
1.75	5.2	2	3.2	124.89
2	3.9	1.4	2.4	178.49
2.25	3.1	1.1	2	220.93
2.5	2.6	0.9	1.7	246.52
2.75	2.2	0.8	1.4	254.81
3	1.9	0.7	1.3	249.26
3.25	1.7	0.6	1.2	232.17
3.5	1.6	0.5	1	207.1
3.75	1.4	0.5	1	182.48
4	1.3	0.4	0.9	160.88
4.25	1.2	0.4	0.8	142.66
4.5	1.1	0.4	0.8	126.8
4.75	1.1	0.3	0.7	112.79
5	1	0.3	0.7	100.83
5.25	1	0.3	0.7	90.7
5.5	0.9	0.3	0.6	81.99
5.75	0.9	0.3	0.6	74.5
6	0.8	0.3	0.6	68.11
6.25	0.8	0.2	0.6	62.67
6.5	0.8	0.2	0.5	57.99
6.75	0.7	0.2	0.5	53.91
7	0.7	0.2	0.5	50.34
7.25	0	0	0	47.01
7.5	0	0	0	43.65
7.75	0	0	0	39.9
8	0	0	0	35.44
8.25	0	0	0	30.46
8.5	0	0	0	25.37
8.75	0	0	0	20.5
9	0	0	0	16.13
9.25	0	0	0	12.47
9.5	0	0	0	9.57
9.75	0	0	0	7.41
10	0	0	0	5.76
10.25	0	0	0	4.48
10.5	0	0	0	3.47
10.75	0	0	0	2.68
11	0	0	0	2.07
11.25	0	0	0	1.6
11.5	0	0	0	1.23
..	..	..	..	..

Πίνακας Π.10: Αδρομερής προσέγγιση με HEC-HMS: Παροχές εξόδου μετά τις πυρκαγιές  
(βήμα 15 λεπτών και  $T = 50$ )

$t$ (h)	Βροχόπτωση (mm)	Απώλειες (mm)	Περίσσειμα (mm)	Απορροή (m <sup>3</sup> /s)
0	2.8	2.8	0	0
0.25	3.4	3.3	0.1	0.08
0.5	4.4	4	0.4	0.44
0.75	6.4	5.3	1.1	1.61
1	11.2	8.2	3	5.08
1.25	36.3	19.6	16.7	18.8
1.5	17.5	6.9	10.6	47.21
1.75	8.1	2.8	5.3	92.91
2	5.2	1.7	3.5	154.35
2.25	3.9	1.2	2.7	216
2.5	3.1	0.9	2.1	263.44
2.75	2.6	0.8	1.8	290.63
3	2.2	0.6	1.6	297.58
3.25	1.9	0.5	1.4	288.7
3.5	1.7	0.5	1.2	266.86
3.75	1.6	0.4	1.1	236.39
4	1.4	0.4	1	207.13
4.25	1.3	0.4	1	181.72
4.5	1.2	0.3	0.9	160.44
4.75	1.1	0.3	0.8	142
5	1.1	0.3	0.8	125.79
5.25	1	0.3	0.8	112.02
5.5	1	0.2	0.7	100.4
5.75	0.9	0.2	0.7	90.47
6	0.9	0.2	0.7	81.94
6.25	0.8	0.2	0.6	74.7
6.5	0.8	0.2	0.6	68.56
6.75	0.8	0.2	0.6	63.29
7	0.7	0.2	0.6	58.71
7.25	0.7	0.2	0.5	54.71
7.5	0	0	0	51.02
7.75	0	0	0	47.31
8	0	0	0	43.19
8.25	0	0	0	38.32
8.5	0	0	0	32.91
8.75	0	0	0	27.39
9	0	0	0	22.1
9.25	0	0	0	17.38
9.5	0	0	0	13.43
9.75	0	0	0	10.3
10	0	0	0	7.98
10.25	0	0	0	6.2
10.5	0	0	0	4.82
10.75	0	0	0	3.73
11	0	0	0	2.88
..	..	..	..	..

## Παράρτημα 3: Εδαφοτομές εντός της λεκάνης

### 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

<b>A:</b>	έντονα ορφνό χρώμα μεσαία υφή πολύ συχνά χαλίκια αποστρογγυλωμένα μέτρια λεπτή υπογωνιώδη δομή ελαφρά σκληρό έδαφος όχι ασβεστούχο
<b>BT1:</b>	έντονα ορφνό χρώμα βαρεία υφή πολύ συχνά χαλίκια αποστρογγυλωμένα ισχυρά λεπτή υπογωνιώδη δομή σκληρό έδαφος όχι ασβεστούχο
<b>BT2:</b>	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

<b>A:</b>	σκούρο ορφνό χρώμα μεσαία υφή συχνά χαλίκια αποστρογγυλωμένα μέτρια λεπτή πρισματική δομή πολύ εύθρυπτο έδαφος όχι ασβεστούχο
<b>BT1:</b>	έντονα ορφνό χρώμα βαρεία υφή συχνά χαλίκια αποστρογγυλωμένα ισχυρά μέση πρισματική δομή εύθρυπτο έδαφος όχι ασβεστούχο
<b>BT2:</b>	έντονα ορφνό χρώμα βαρεία υφή πολύ συχνά χαλίκια αποστρογγυλωμένα ισχυρά μέση πρισματική δομή συνεκτικό έδαφος όχι ασβεστούχο
<b>BT3:</b>	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

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

Πηγή: Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών (2007)

## Παράρτημα 4: Φωτογραφικό υλικό από τη λεκάνη



Φωτογραφία 1: Το ρέμα Γιαννούλας όπως κατεβαίνει από την ορεινή λεκάνη, πριν το σημείο εξόδου.



Φωτογραφία 2: Το ρέμα Γιαννούλας στη συμβολή του ρέματος με επαρχιακό δρόμο του Ασπροπύργου, που αποτελεί και το σημείο εξόδου της ορεινής λεκάνης.



Φωτογραφία 3: Το ρέμα Γιαννούλας στην πεδινή λεκάνη



Φωτογραφία 4: Το ρέμα Γιαννούλας στην πεδινή λεκάνη



## Παράρτημα 5: Α/Φ καμένων εκτάσεων

---



Αεροφωτογραφία 1: Καμένες εκτάσεις (με γκρι ανοιχτό χρώμα) στην Πάρνηθα, τμήμα εντός της λεκάνης του ρέματος Γιαννούλα



Αεροφωτογραφία 2: Καμένες εκτάσεις (με γκρι ανοιχτό χρώμα) στην Πάρνηθα, τμήμα εντός της λεκάνης του ρέματος Γιαννούλα