



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ**

Εφαρμογή σε περιοχή της λεκάνης απορροής του ρέματος  
Πικροδάφνης

Κυριακούλη Βασιλική

Επιβλέπων Καθηγητής: Κουτσογιάννης Δημήτρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

## Διπλωματική Εργασία

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Εφαρμογή σε περιοχή της λεκάνης απορροής του ρέματος  
Πικροδάφνης

Κυριακούλη Βασιλική

Επιβλέπων Καθηγητής: Κουτσογιάννης Δημήτρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2022

## Πρόλογος

Αρχικά, θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κ. Δημήτρη Κουτσογιάννη, ο οποίος αποτέλεσε τον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας εργασίας, για την άριστη συνεργασία και την καθοδήγηση που μου παρείχε.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω και στον διδάκτορα Παναγιώτη Δημητριάδη, ο οποίος μου έδινε κατευθύνσεις, επίλυε τυχόν απορίες και συνεισέφερε στην επίλυση ζητημάτων που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εν λόγω διπλωματικής εργασίας. Επίσης, εκτίμησα τη βοήθεια από την διδάκτορα Θεανώ Ηλιοπούλου σε απορίες που είχα σχετικά με το λογισμικό του QGIS. Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στη Σταυρούλα Σιγούρου, επιστημονική συνεργάτη στο Εθνικό Αστεροσκοπείο, τόσο για την στήριξη της ως φίλη, όσο και για την ενθάρρυνση της για την ενασχόληση με το θέμα της εργασίας και την παροχή δεδομένων που απαιτήθηκαν.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω «τα παιδιά από τις εστίες» που στάθηκαν δίπλα μου σε όμορφες και δύσκολες στιγμές. Από τα γέλια μας μέχρι τις ατέλειωτες ώρες διαβάσματος, η απλόχερη βοήθεια τους θα μείνει χαραγμένη στη μνήμη μου.

Τέλος, θα ήθελα να δώσω ευχαριστώ ιδιαιτέρως στις φίλες μου, στη Γιούλη, στον Βάλεντιν και στην οικογένεια μου για τη στήριξη τους, αλλά και την κατανόηση και την υπομονή που έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια αυτού του ταξιδιού.

## Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος .....	3
Πίνακας περιεχομένων .....	4
Πίνακας σχημάτων .....	7
Πίνακας διαγραμμάτων .....	8
Πίνακας πινάκων .....	11
Περίληψη.....	15
Abstract .....	17
<b>1 Εισαγωγή.....</b>	<b>18</b>
1.1 Σκοπός και διάρθρωση εργασίας.....	18
1.2 Αστικοποίηση και κίνδυνος πλημμύρας.....	19
1.3 Η κρισιμότητα των περιαστικών περιοχών υδρολογικά.....	20
1.4 Ο κίνδυνος πλημμύρας μετά από πυρκαγιά.....	21
1.5 Επιπτώσεις πυρκαγιάς στην υδρολογική απόκριση.....	22
1.5.1 Άμεσες επιπτώσεις .....	23
1.5.2 Έμμεσες επιπτώσεις .....	25
<b>2 Περιοχή μελέτης.....</b>	<b>32</b>
2.1 Η υδρολογική λεκάνη του ρέματος στην περιοχή μελέτης .....	32
2.1.1 Γενικά.....	32
2.1.2 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά .....	33
2.1.3 Γεωλογικό και υδρογεωλογικό καθεστώς λεκάνης.....	35
2.1.4 Μετεωρολογικά δεδομένα .....	37
2.1.5 Χρήσεις γης.....	38
2.1.6 Δημογραφικά δεδομένα .....	39
2.1.7 Υφιστάμενη κατάσταση του ρέματος Πικροδάφνης.....	40
2.2 Περιοχή εφαρμογής μελέτης.....	44
2.2.1 Γενικά.....	44
2.2.2 Παράγοντες καθορισμού περιοχής μελέτης.....	45
2.2.3 Δεδομένα περιοχής μελέτης.....	47
<b>3 Μεθοδολογικό Υπόβαθρο .....</b>	<b>52</b>

<b>3.1</b>	<b>Ορθολογική Μέθοδος</b> .....	<b>52</b>
3.1.1	Εισαγωγικά .....	52
3.1.2	Η εξίσωση $Q = C i A$ .....	52
3.1.3	Όμβριες καμπύλες και υπολογισμός έντασης βροχής.....	53
<b>3.2</b>	<b>Ο συντελεστής απορροής CN</b> .....	<b>55</b>
3.2.1	Η μέθοδος SCS Curve Number .....	55
<b>3.3</b>	<b>Εκτίμηση συντελεστή απορροής CN μετά από πυρκαγιά</b> .....	<b>60</b>
3.3.1	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση συντελεστή CN μετά από πυρκαγιά.....	60
3.3.2	Μέθοδος Παπαθανασίου .....	65
3.3.3	Μέθοδος Goodrich .....	73
<b>3.4</b>	<b>Ανάλυση Ευαισθησίας με τη Μέθοδο Monte-Carlo</b> .....	<b>76</b>
3.4.1	Γενικά.....	76
3.4.2	Monte Carlo και υδρολογία.....	77
3.4.3	Μεθοδολογία.....	78
<b>4</b>	<b>Σενάρια για την εφαρμογή μελέτης</b> .....	<b>86</b>
<b>5</b>	<b>Αποτελέσματα</b> .....	<b>88</b>
<b>5.1</b>	<b>Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρων που επηρεάζουν την υδρολογική απόκριση μετά από πυρκαγιά</b> .....	<b>88</b>
<b>5.2</b>	<b>Αποτελέσματα εφαρμογής στην περιοχή μελέτης</b> .....	<b>96</b>
5.2.1	Παραδοχές.....	96
5.2.2	Σενάριο 1: Μεταβολές μεγεθών υπό κανονικές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και κανονικές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (N- N).....	100
5.2.3	Σενάριο 2: Μεταβολές μεγεθών υπό κανονικές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και ξηρές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (N- D).....	103
5.2.4	Σενάριο 3: Μεταβολές μεγεθών υπό κανονικές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και υγρές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (N- W) .....	107
5.2.5	Σενάριο 4: Μεταβολές μεγεθών υπό ξηρές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και κανονικές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (D- N) .....	110
5.2.6	Σενάριο 5: Μεταβολές μεγεθών υπό ξηρές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και ξηρές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (D- D) .....	113
5.2.7	Σενάριο 6: Μεταβολές μεγεθών υπό ξηρές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και υγρές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (D- W).....	116
5.2.8	Σενάριο 7: Μεταβολές μεγεθών υπό υγρές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και κανονικές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (W- N) .....	120

5.2.9	Σενάριο 8: Μεταβολές μεγεθών υπό υγρές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και ξηρές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (W- D) .....	123
5.2.10	Σενάριο 9: Μεταβολές μεγεθών υπό υγρές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και υγρές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (W- W).....	126
5.2.11	Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	130
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>138</b>
<b>7</b>	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>140</b>
	Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	140
	Ελληνική Βιβλιογραφία.....	145
	Διαδικτυακές πηγές.....	146

## Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 1.1: Οι μεταβολές στην υδροφοβικότητα κατά τη φωτιά και η γραμμή απώθησης του νερού (Α) πριν τη πυρκαγιά, (Β) κατά τη διάρκεια της φωτιάς και (C) μετά τη πυρκαγιά (De Bano et al., 2005).....	25
Σχήμα 1.2: Υδρολογική συμπεριφορά λεκάνης απορροής, (Α) πριν από φωτιά και (Β) μετά από φωτιά (Μπαλούτσος κ.α, 2021- ίδια επεξεργασία).....	28
Σχήμα 2.1: Η λεκάνη απορροής της Πικροδάφνης και οι δήμοι που καλύπτει (Εκτίμηση κινδύνων σεισμού, πυρκαγιάς & πλημμύρας στην Περιφέρεια Αττικής – Α΄ Μέρος, Ε.Α.Α., 10/2021).....	32
Σχήμα 2.2: Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης (Εκτίμηση κινδύνων σεισμού, πυρκαγιάς & πλημμύρας στην Περιφέρεια Αττικής – Α΄ Μέρος, Ε.Α.Α. , 10/2021). ....	33
Σχήμα 2.3: Χάρτης ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Εκτίμηση κινδύνων σεισμού, πυρκαγιάς & πλημμύρας στην Περιφέρεια Αττικής – Α΄ Μέρος, Ε.Α.Α., 10/2021). ....	34
Σχήμα 2.4: Χάρτης κλίσεων εδάφους (Εκτίμηση κινδύνων σεισμού, πυρκαγιάς & πλημμύρας στην Περιφέρεια Αττικής – Α΄ Μέρος, Ε.Α.Α., 10/2021). ....	35
Σχήμα 2.5: Γεωλογικός χάρτης Πικροδάφνης (Ι.Θ.Β.Π. & Ε.Υ. - ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε, 2014). ....	35
Σχήμα 2.6: Υδρογεωλογικός χάρτης Πικροδάφνης (Ι.Θ.Β.Π. & Ε.Υ. - ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε, 2014). ....	36
Σχήμα 2.7: Χάρτης χρήσεων γης (Εκτίμηση κινδύνων σεισμού, πυρκαγιάς & πλημμύρας στην Περιφέρεια Αττικής – Α΄ Μέρος, Ε.Α.Α., 10/2021). ....	39
Σχήμα 2.8: Η πεζογέφυρα Κορούζη μετά την υπερχειλίση ( <a href="http://www.notia.gr">www.notia.gr</a> ).....	42
Σχήμα 2.9: Καθίζηση γηπέδου μπάσκετ, μετά το πλημμυρικό επεισόδιο ( <a href="http://www.notia.gr">www.notia.gr</a> ).....	42
Σχήμα 2.10: Χάρτης πυρκαγιών στη λεκάνη κατά το διάστημα 1985- 2020.....	44
Σχήμα 2.11: Περιοχή μελέτης σε σχέση με το σύνολο των υπολεκάνων του ρέματος Πικροδάφνης. ....	45
Σχήμα 2.12: Η περιοχή του Καρέα πριν και μετά τη πυρκαγιά του 2015 ( <a href="http://www.dasarxeio.com">www.dasarxeio.com</a> ). .....	46
Σχήμα 2.13: Χάρτης ψηφιακού μοντέλου εδάφους και μισγάγκειας της υπολεκάνης μελέτης. .....	47
Σχήμα 2.14: Χάρτης υδροπερατότητας υπολεκάνης μελέτης.....	48
Σχήμα 2.15: Χάρτης χρήσεων γης υπολεκάνης μελέτης. ....	48
Σχήμα 2.16: Χάρτης συντελεστών απορροής CN υπολεκάνης μελέτης. ....	49
Σχήμα 2.17: Χάρτης καμένων εκτάσεων της υπολεκάνης μελέτης (πυρκαγιά 07/2015).....	50

Σχήμα 2.18: Η καμένη έκταση της πυρκαγιάς στις 17/08/2015 σε χρονικά διαστήματα από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω. Η κάτω αριστερά δείχνει την καμένη έκταση μία μέρα μετά τη πυρκαγιά (Google earth).....	50
Σχήμα 2.19: Η υπολεκάνη μελέτης σε χρονικά διαστήματα από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω. Η κάτω αριστερά εικόνα δείχνει την υπολεκάνη μία μέρα μετά τη πυρκαγιά (Google earth).....	51
Σχήμα 2.20: Υφιστάμενη κατάσταση καμένης περιοχής από τη πυρκαγιά του 2015 (Google Earth). .....	51

## Πίνακας διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.1: Σχέσεις συντελεστή απορροής CN πριν τη πυρκαγιά και κατά τη πρώιμη μεταπυρική περίοδο για κάθε ένταση πυρκαγιάς (Livingston et al., 2005). .....	62
Διάγραμμα 3.2: Υπολογισμός τιμών αριθμού καμπύλης πριν και μετά τη πυρκαγιά στην περιοχή Marchall Gulch (Canfield et. al., 2005). .....	64
Διάγραμμα 3.3: Σχέσεις συντελεστή απορροής CN και ποσοστού κάλυψης γης για κάθε ομάδα υδροπερατότητας (Goodrich et al., 2005). .....	73
Διάγραμμα 5.1: Κινούμενος μέσος όρος $\mu$ της παροχής $Q$ ( $m^3/s$ ) για 500 προσομοιώσεις με τυχαίες τιμές των παραμέτρων εισόδου για 1 και 12 μήνες μετά τη πυρκαγιά. ....	89
Διάγραμμα 5.2: Κινούμενη τυπική απόκλιση $s$ της παροχής $Q$ ( $m^3/s$ ) για 500 προσομοιώσεις με τυχαίες τιμές των παραμέτρων εισόδου για 1 και 12 μήνες μετά τη πυρκαγιά. ....	89
Διάγραμμα 5.3: Κινούμενος συντελεστής διακύμανσης της παροχής $Q$ ( $m^3/s$ ) για 500 προσομοιώσεις με τυχαίες τιμές των παραμέτρων εισόδου για 1 και 12 μήνες μετά τη πυρκαγιά.....	90
Διάγραμμα 5.4: Θηκόγραμμα της παροχής εξόδου $Q$ ( $m^3/s$ ) για 9000 προσομοιώσεις και για 1 μήνα μετά τη πυρκαγιά. ....	91
Διάγραμμα 5.5: Θηκόγραμμα της παροχής εξόδου $Q$ ( $m^3/s$ ) για 9000 προσομοιώσεις και για 12 μήνες μετά τη πυρκαγιά. ....	91
Διάγραμμα 5.6: Q-Q plot της παροχής εξόδου $Q$ ( $m^3/s$ ) για 9000 προσομοιώσεις και για 1 μήνα μετά τη πυρκαγιά.....	92
Διάγραμμα 5.7: Q-Q plot της παροχής εξόδου $Q$ ( $m^3/s$ ) για 9000 προσομοιώσεις και για 12 μήνες μετά τη πυρκαγιά. ....	92
Διάγραμμα 5.8: Συντελεστής διακύμανσης $C_v$ έναντι των ομαδοποιημένων παραμέτρων εισόδου.....	94







Διάγραμμα 5.45: Ποσοστιαίες μεταβολές βαθών ροής, για τα 9 εδαφικά σενάρια, για τη δυσμενή συνθήκη ( $FS=i$ , $T=1000$ έτη) κατά Παπαθανασίου.....	131
Διάγραμμα 5.46: Ποσοστιαίες μεταβολές βαθών ροής, για τα 9 εδαφικά σενάρια, για την ευμενή συνθήκη ( $FS=iv$ , $T=50$ έτη) κατά Παπαθανασίου. ....	131
Διάγραμμα 5.47: Ποσοστιαίες μεταβολές βαθών ροής για $FS=i$ , $FS=iv$ και η διαφορά τους για (α) $T=1000$ έτη, (β) $T=100$ έτη, (γ) $T=50$ έτη. ....	133
Διάγραμμα 5.48: Ποσοτική επίδραση του παράγοντα έντασης της πυρκαγιάς σε σχέση με τα 9 εδαφικά σενάρια υγρασίας και τις 3 ενδεχόμενες περιόδους επαναφοράς.....	134
Διάγραμμα 5.49: Ποσοστιαίες μεταβολές βαθών ροής, για τα 9 εδαφικά σενάρια, για τη δυσμενή συνθήκη ( $T=1000$ έτη) κατά Goodrich. ....	135
Διάγραμμα 5.50: Ποσοστιαίες μεταβολές βαθών ροής, για τα 9 εδαφικά σενάρια, για την ευμενή συνθήκη ( $T=50$ έτη) κατά Goodrich. ....	136
Διάγραμμα 5.51: Σύγκριση των μεθόδων Παπαθανασίου και Goodrich ως προς τις ποσοστιαίες μεταβολές του βάθους ροής για τα 9 εδαφικά σενάρια, για περίοδο επαναφοράς 50 έτη..	137

## Πίνακας πινάκων

Πίνακας 1.1: Μεταβολές χαρακτηριστικών λεκάνης απορροής δυναμικά στον χρόνο μετά από πυρκαγιά, διεργασίες διάβρωσης και δημιουργίας πλημμύρας μετά από ισχυρή βροχόπτωση (Μπαλούτσος κ.α., 2021- ίδια επεξεργασία).....	31
Πίνακας 3.1: Παράμετροι των όμβριων καμπύλων Αττικής για κάθε ομάδα υψομέτρου (Εκτίμηση κινδύνων σεισμού, πυρκαγιάς & πλημμύρας στην Περιφέρεια Αττικής – Α' Μέρος, Ε.Α.Α. , 10/2021- ίδια επεξεργασία). ....	54
Πίνακας 3.2: Υδρολογικοί εδαφικοί τύποι των κυριότερων πετρωμάτων στην Ελλάδα (Υ.Π.Ε.Κ.Α.) .....	57
Πίνακας 3.3: Αριθμοί καμπύλης απορροής CN (Υ.Π.Ε.Κ.Α.).....	59
Πίνακας 3.4: Εκτιμώμενες μεταπυρικές τιμές CN για κάθε ένταση πυρκαγιάς (Livingston et al., 2005- ίδια επεξεργασία).....	61
Πίνακας 3.5: Ταξινόμηση των υδρολογικών επιπτώσεων πυρκαγιάς βάσει του ποσοστού έκτασης με υψηλή εδαφική ένταση πυρκαγιάς (Livingston et al., 2005- ίδια επεξεργασία). .	61
Πίνακας 3.6: Οι παράμετροι c και d για ξηρές και υγρές συνθήκες υγρασίας για τις υδρολογικές παραμέτρους CN, IA, TP, CP και K (Parathanasiou, 2018-ιδία επεξεργασία).....	69

Πίνακας 3.7: Ανώτερα ( $t_{upper}$ ) και κατώτερα ( $t_{lower}$ ) όρια για κάθε υδρολογική παράμετρο (CN, IA, TP, CP, K) και για κάθε ένταση πυρκαγιάς (FS=i, ii,iii, iv) (Parathanasiou, 2018-ιδία επεξεργασία). .....	71
Πίνακας 3.8: Τιμές συντελεστών a, b για κάθε κλάση έντασης πυρκαγιάς κατά Παπαθανασίου. ....	72
Πίνακας 3.9: Τιμές συντελεστή απορροής CN συναρτήσει της ομάδας υδροπερατότητας, της χρήσης γης και του ποσοστού κάλυψης κάθε χρήσης που κάηκε (Goodrich et al., 2005- ιδία επεξεργασία). ....	74
Πίνακας 3.10: Παράμετροι εδαφικών συνθηκών υγρασίας της μεθόδου SCS- Curve Number. ....	75
Πίνακας 3.11: Παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση ευαισθησίας και το εύρος πιθανών τιμών τους.....	81
Πίνακας 4.1: Σενάρια μελέτης βάσει των εδαφικών συνθηκών υγρασίας πριν και μετά τη πυρκαγιά.....	87
Πίνακας 5.1: Στατιστικά μεγέθη του συνόλου δείγματος παροχών Q ( $m^3/s$ ). ....	90
Πίνακας 5.2: Τοπογραφικά δεδομένα περιοχής εφαρμογής μελέτης. ....	97
Πίνακας 5.3: Καμένα και μη καμένα τμήματα της υπολεκάνης και οι αρχικοί συντελεστές απορροής τους. ....	97
Πίνακας 5.4: Μεταπυρικοί συντελεστές απορροής κατά Goodrich για όλα τα τμήματα της υπολεκάνης. ....	98
Πίνακας 5.5: Αρχικές τιμές παροχής ( $Q_{af}$ ) και ομοιόμορφου βάθους ροής ( $\gamma_{af}$ ) πριν τη πυρκαγιά κατά Παπαθανασίου.....	99
Πίνακας 5.6: Αρχικές τιμές παροχής ( $Q_{af}$ ) και ομοιόμορφου βάθους ροής ( $\gamma_{af}$ ) πριν τη πυρκαγιά κατά Goodrich .....	99
Πίνακας 5.7: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 1 (N- N). ....	100
Πίνακας 5.8: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 1 (N -N). ....	101
Πίνακας 5.9: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 1 (N- N). ....	102
Πίνακας 5.10: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 1 (N- N).....	102

Πίνακας 5.11: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 2 (N- D). .....	103
Πίνακας 5.12: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 2 (N- D).....	104
Πίνακας 5.13: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 2 (N- D). .....	105
Πίνακας 5.14: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 2 (N- D).....	106
Πίνακας 5.15: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 3 (N- W). .....	107
Πίνακας 5.16: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 3 (N- W). .....	108
Πίνακας 5.17: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 3 (N- W). .....	108
Πίνακας 5.18: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 3 (N- W).....	109
Πίνακας 5.19: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 4 (D- N). .....	110
Πίνακας 5.20: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 4 (D- N).....	111
Πίνακας 5.21: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 4 (D- N). .....	112
Πίνακας 5.22: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 4 (D- N).....	112
Πίνακας 5.23: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 5 (D- D). .....	113
Πίνακας 5.24: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 5 (D- D).....	114
Πίνακας 5.25: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 5 (D- D). .....	115
Πίνακας 5.26: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 5 (D-D).....	116
Πίνακας 5.27: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 6 (D- W). .....	117
Πίνακας 5.28: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 6 (D- W).....	117

Πίνακας 5.29: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 6 (D- W). .....	118
Πίνακας 5.30: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 6 (D- W).....	119
Πίνακας 5.31: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 7 (W- N). .....	120
Πίνακας 5.32: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 7 (W- N). .....	121
Πίνακας 5.33: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 7 (W- N). .....	122
Πίνακας 5.34: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 7 (W- N).....	122
Πίνακας 5.35: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 8 (W- D). .....	123
Πίνακας 5.36: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 8 (W- D).....	124
Πίνακας 5.37: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 8 (W- D). .....	125
Πίνακας 5.38: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 8 (W- D).....	126
Πίνακας 5.39: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 9 (W- W). .....	127
Πίνακας 5.40: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 9 (W- W). .....	127
Πίνακας 5.41: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 9 (W- W). .....	128
Πίνακας 5.42: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 9 (W- W).....	129
Πίνακας 5.43: Σύγκριση των Δγ% για τις δύο μεθόδους, για τα 9 σενάρια. ....	137

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής αποτελεί η διερεύνηση της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης με βάση την αλληλεπίδραση της περιόδου επαναφοράς και των χαρακτηριστικών της πυρκαγιάς, με τις εδαφικές συνθήκες υγρασίας πριν και μετά την πυρκαγιά. Εκτός αυτού, μέσω ανάλυσης ευαισθησίας διερευνάται και η ποσοτική επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην υδρολογική απόκριση μετά τη πυρκαγιά.

Αρχικά, γίνεται αναφορά σχετικά με την ευαισθησίας μίας καμένης περιοχής σε αυξημένη απορροή μετά από τη πυρκαγιά, με τη συνθήκη να είναι δυσμενέστερη, όταν η πληγείσα περιοχή είναι περιαστική. Στη συνέχεια, περιγράφονται τόσο οι άμεσες όσο και οι έμμεσες επιπτώσεις της πυρκαγιάς στην υδρολογική απόκριση μίας λεκάνης απορροής, όπως και τα ποσοτικά συμπεράσματα που έχουν εξαγεί για αυτές από την επιστημονική κοινότητα.

Η εφαρμογή μελέτης πραγματοποιήθηκε σε μία περιαστική περιοχή της λεκάνης απορροής της Πικροδάφνης, στις πτυχώσεις του ορεινού όγκου του Υμηττού, η οποία επλήγη από πυρκαγιά τον Ιούλιο του 2015. Στο σημείο εξόδου της συναντά τον αστικό ιστό του δήμου Ηλιούπολης.

Ακολουθεί η παρουσίαση των μεθόδων που θα αξιοποιηθούν στην εργασία. Αυτές είναι: η ορθολογική μέθοδος, για τον υπολογισμό των παροχών αιχμής πριν και μετά τη πυρκαγιά και οι μέθοδοι Παπαθανασίου και Goodrich, για τον υπολογισμό των μεταπυρικών μεγεθών. Παρουσιάζεται επίσης, η μεθοδολογία που ακολουθείται για την ανάλυση ευαισθησίας κατά Monte Carlo.

Έπειτα, διαμορφώνονται τα σενάρια εδαφικών συνθηκών πριν και μετά τη πυρκαγιά για την εφαρμογή στην περιοχή μελέτης. Βάσει αυτών προκύπτουν οι μεταβολές παροχών και βαθών ροής για τέσσερις διαφορετικές κλάσεις έντασης πυρκαγιάς κατά τη μέθοδο Παπαθανασίου, και για τρεις διαφορετικές περιόδους επαναφοράς. Το ίδιο επαναλαμβάνεται και για τη μέθοδο Goodrich.

Αξιολογώντας και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για την εφαρμογή στη περιοχή μελέτης, οι μεταβολές των μεγεθών κατά τη μέθοδο Παπαθανασίου, δείχνουν ότι όσο πιο ευμενές είναι το σενάριο από άποψη εδαφικών συνθηκών υγρασίας πριν και μετά τη πυρκαγιά και όσο πιο χαμηλή είναι η ένταση της βροχόπτωσης μετά τη πυρκαγιά, τόσο πιο έντονη θα είναι και η επίδραση της έντασης της πυρκαγιάς στην απόκριση.

Επιπλέον, οι μεταβολές των βαθών ροής για τα δυσμενή σενάρια ως προς τις εδαφικές συνθήκες υγρασίας κατά Goodrich, έχουν μεγαλύτερη σχέση με τα μεγέθη κατά Παπαθανασίου για την περίπτωση πολύ ισχυρής έντασης πυρκαγιάς, ενώ για τα πιο ευμενή

σενάρια οι μεταβολές του βάθους ροής που προκύπτουν από Goodrich βρίσκονται πιο κοντά με τιμές της Παπαθανασίου για την περίπτωση χαμηλής έντασης πυρκαγιάς.

Τέλος, από τα αποτελέσματα της Monte Carlo προκύπτει πως η ευσθησία της παροχής ένα μήνα μετά τη πυρκαγιά, ως προς τις περισσότερες παραμέτρους μειώνεται, όσο αυξάνονται οι τιμές των παραμέτρων εισόδου. Μόνο για δύο παραμέτρους η παροχή διατηρεί σταθερή συμπεριφορά ανεξαρτήτως των τιμών τους.



## Abstract

The subject of this diploma thesis is the investigation of the hydrological response of this study's catchment area based on the interaction of the recovery period and the characteristics of the fire, with soil moisture conditions before and after the fire. In addition, through sensitivity analysis, the quantitative effect of various parameters on post-fire hydrological response is investigated.

First, a reference is made regarding the sensitivity of a burned area to increased runoff after the fire, with the condition being more unfavorable when the affected area is peri-urban. Then, both the direct and indirect effects of fire on the hydrological response of a watershed are described, as well as the quantitative conclusions drawn about them by the scientific community.

The application of the study was carried out in a peri-urban area of the Picrodafni catchment, in the folds of the Ymittos mountain, which was affected by a fire in July 2015. At its exit point, it meets the urban fabric of the municipality of Ilioupoli.

Following, the methods that will be used in this thesis are presented. These are: the rational method, for calculating the peak discharges before and after the fire and the Papathanasiou and Goodrich methods, for calculating the post-fire quantities. The methodology followed for the Monte Carlo sensitivity analysis is also presented.

Then, pre-fire and post-fire soil conditions scenarios are formulated for application to the study area. Based on these, the changes in discharges and flow rates are derived for four different classes of fire intensity according to the Papathanasiou method, and for three different recovery periods. The same is repeated for the Goodrich method.

Evaluating and comparing the results for the application in the study area, the changes in the magnitudes according to the Papathanasiou method, show that the more favorable the scenario in terms of soil moisture conditions before and after the fire and the lower the intensity of precipitation after the fire, the more intense the effect of fire intensity on the response will be.

In addition, the changes in the flow rates for the unfavorable scenarios in terms of soil moisture conditions according to Goodrich, have a greater relationship with the values according to Papathanasiou for the case of very strong fire intensity, while for the more favorable scenarios the changes in the flow depth resulting from Goodrich are closer to Papathanasiou values for the case of low fire intensity.

Finally, according to the Monte Carlo results, the sensitivity of the discharge one month after the fire, in terms of most parameters, decreases as the values of the input parameters increase. Only for two parameters, discharge shows a stable behavior regardless of their values.

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός και διάρθρωση εργασίας

Στις μεσογειακές περιοχές, οι πυρκαγιές κατά τους θερινούς μήνες και οι πλημμύρες κατά τις υγρές περιόδους έχουν σημαντικές κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι περιβάσιμες περιοχές γειννιάζοντας με τον αστικό ιστό και αποτελούμενες από αντικρουόμενες χρήσεις γης, είναι ακόμη πιο εαυσθητες στις επιπτώσεις των δύο φαινομένων. Τις τελευταίες δεκαετίες, η επιστημονική κοινότητα έχει επιστήσει το ενδιαφέρον της στις επίπτώσεις της πυρκαγιάς στην υδρολογική απόκριση μίας λεκάνης απορροής.

Στην παρούσα διπλωματική, διερευνάται η υδρολογική απόκριση της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης με βάση την αλληλεπίδραση της περιόδου επαναφοράς και των χαρακτηριστικών της πυρκαγιάς, με τις εδαφικές συνθήκες υγρασίας, πριν και μετά την πυρκαγιά. Η περιοχή μελέτης είναι μία περιβασιτική περιοχή που ανήκει στη λεκάνη απορροής του ρέματος της Πικροδάφνης. Για την εφαρμογή μελέτης, διαμορφώθηκαν σενάρια βάσει των οποίων υπολογίστηκαν τα μεγέθη των παροχών και του βάθους ροής στην έξοδο της λεκάνης απορροής για όλες τις περιπτώσεις των παραγόντων που προανεφέρθηκαν. Έπειτα, ακολούθησε συγκριση των διαφορετικών αποτελεσμάτων.

Επιπλέον, διερευνήθηκε μέσω θεωρητικής εφαρμογής η ποσοτική επίδραση διάφορων παραμέτρων που επηρεάζουν την υδρολογική απορροή μετά από πυρκαγιά μέσω της μεθόδου Monte Carlo.

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει επτά κεφάλαια, τα οποία διαρθρώνονται ως εξής:

Το κεφάλαιο 1 περιλαμβάνει αρχικά τη δομή της εργασίας. Ακολουθούν εισαγωγικά στοιχεία για τη αστικοποίηση ως παράγοντα πλημμυρικού κινδύνου, για τις περιβασιτικές περιοχές ως ζώνες ευάλωτες στις συνέπειες πυρκαγιών και πλημμύρων, όπως και για τον κίνδυνο πλημμύρας μετά από την εκδήλωση μίας πυρκαγιάς. Τέλος, παρουσιάζονται εκτενώς οι επιπτώσεις των πυρκαγιών στην υδρολογική απόκριση μίας λεκάνης απορροής.

Το κεφάλαιο 2 περιγράφει γενικά στοιχεία της λεκάνης απορροής της Πικροδάφνης και της υπολεκάνης μελέτης, συμπεριλαμβάνοντας και τα κριτήρια επιλογής της για το σκοπό της εργασίας.

Το κεφάλαιο 3 αποτελείται από μεθοδολογίες που αξιοποιούνται για την εκπόνηση της εργασίας. Αρχικά, περιγράφεται η ορθολογική μέθοδος με βάση την οποία θα υπολογιστεί η παροχή αιχμής για τις εφαρμογές που ακολουθούν. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο υπολογισμός του συντελεστή απορροής με τη χρήση της μεθόδου SCS και ακολουθεί μία

συνοπτική βιβλιογραφική ανασκόπηση του συντελεστή απορροής μεταπυρικά. Περιγράφονται επίσης, και οι μέθοδοι Παπαθανασίου και Goodrich που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή απορροής μεταπυρικά στην εν λόγω διπλωματική. Τέλος, παρουσιάζεται η μέθοδος Monte Carlo, καθώς επίσης και η μεθοδολογία της ανάλυσης ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

Το κεφάλαιο 4 παρουσιάζει τα σενάρια και τις περιπτώσεις για τις οποίες έγινε η διερεύνηση για την εφαρμογή στη περιοχή μελέτης.

Το κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας της μεταπυρικής παροχής ως προς παραμέτρους που επηρεάζουν την υδρολογική απόκριση μετά από πυρκαγιά. Σε περιβάλλον excel, εκτιμήθηκε η ποσοτική επίδραση υδρολογικών παραμέτρων, βροχομετρικών στοιχείων, χαρακτηριστικών τοπογραφίας, πυρκαγιάς και συνθηκών υγρασίας εδάφους στην υδρολογική απόκριση μίας θεωρητικής λεκάνης απορροής μετά από μία πυρκαγιά δυναμικά. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα εφαρμογής μελέτης των σεναρίων για τη μεταβολή της παροχής και του ομοιόμορφου βάθους ροής για τις δύο υπό εξέταση μεθόδους (Παπαθανασίου, Goodrich), όπως και η σύγκριση των διαφορετικών αποτελεσμάτων.

Το κεφάλαιο 6 καταγράφει τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας μελέτης.

Το κεφάλαιο 7 περιλαμβάνει τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης.

## 1.2 Αστικοποίηση και κίνδυνος πλημμύρας

Η αστικοποίηση αποτελεί φαινόμενο που επιφέρει αλλαγές στις χρήσεις γης, οδηγεί στην οικολογική υποβάθμιση των αστικών κέντρων και μεταξύ πολλών άλλων αρνητικών συνεπειών, καθιστά τον πλημμυρικό κίνδυνο σημαντικό πρόβλημα για τον αστικό και περιαστικό ιστό.

Πιο συγκεκριμένα, για να καλυφθούν οι ανάγκες του αυξανόμενου πληθυσμού σε πολλές πόλεις, παρατηρείται εκτεταμένη δόμηση φτάνοντας συχνά μέχρι τις παρυφές βουνών τους. Το πλήθος και η έκταση των αδιαπέρατων επιφανειών (κτήρια, δρόμοι, πεζοδρόμια) μειώνουν το ποσοστό νερού που διηθείται. Οι επιφάνειες αυτές έχουν χαμηλό συντελεστή τραχύτητας, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται αυξημένες ταχύτητες ροής, μειωμένος χρόνος συγκέντρωσης και τελικά αυξημένος πλημμυρικός όγκος, αυξημένη παροχή αιχμής και μειωμένος χρόνος εμφάνισης τη πλημμυρικής αιχμής (Κασσελά, 2011). Οι αδιαπέρατες

επιφάνειες και οι υπόνομοι παρέχουν ένα μέτρο εκτίμησης του βαθμού αστικοποίησης. Σε γενικές γραμμές, σε μια αστική περιοχή με 40% αδιαπέρατη επιφάνεια και 60% υποστήριξη από δίκτυο αποχέτευσης, πρέπει να αναμένονται τριπλάσιες πλημμύρες από αυτές που υπήρχαν πριν την αστικοποίηση (Παρεσίδου και Πλίτση, 2005).

Παράλληλα, το υδρογραφικό δίκτυο συρρικνώνεται. Τα ρέματα που μπαζώνονται, αντικαθίστανται από οικιστική δόμηση και οδικούς άξονες. Επιβαρύνουν έτσι τα εναπομείναντα ανοικτά ρέματα με επιπρόσθετο φορτίο νερού. Οι χώροι πρασίνου μειώνονται σημαντικά, με συνέπειες τη μείωση ποσότητας διηθούμενου νερού στο έδαφος και την αύξηση της ταχύτητα ροής των ομβρίων υδάτων.

Δείγμα μίας ολιστικής προσέγγισης διαχείρισης των αστικών ρεμάτων και αποφυγής τοπικών παρεμβάσεων, ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες, αποτελούν οι επικίνδυνες διευθετήσεις και επιχωματώσεις ρεμάτων. Οι διευθετήσεις των κοιτών των ρεμάτων που γίνονται με οριζόντια ή κατακόρυφη μείωση των διατομών τους, σε συνδυασμό με τα διάφορα εμπόδια εντός αυτών ( απορρίμματα, μπάζα, πεσμένα δέντρα), μειώνουν τη παροχητευτικότητα του ρέματος.

Τέλος, χρόνιο ζήτημα αποτελεί και ο ακατάλληλος σχεδιασμός του δικτύου ομβρίων. Η απορροή γενικά ξεκινάει από τους δρόμους και μέσω των φρεατίων υδροσυλλογής, συνεχίζει στους υπόγειους αγωγούς του δικτύου ομβρίων υδάτων για την κατάλληλη διαχείριση τους. Όμως συχνά, το φρεάτια είναι περιορισμένα και επομένως καθυστερείται η είσοδος στο δίκτυο παροχητευτικότητας, ενώ οι αγωγοί συχνά σχεδιάζονται για συνηθισμένες αιχμές βροχοπτώσεων, με αποτέλεσμα το δίκτυο να υπερχειλίζει και το νερό να απορρέει προς το δρόμους, προκαλώντας επιφανειακή πλημμύρα (Κασσελά, 2011).

### 1.3 Η κρίσιμότητα των περιαστικών περιοχών υδρολογικά

Ιδιαίτερα κρίσιμες για την εξέλιξη, αξιολόγηση και διαχείριση μίας πλημμύρας είναι οι περιαστικές περιοχές. Όσον αφορά τα βιβλιογραφικά στοιχεία, δεν εξετάζονται με την ίδια βαρύτητα όσο ο αστικός ιστός. Οι περιαστικές περιοχές είναι δυναμικά τοπία, στα οποία συνυπάρχουν τόσο αστικά όσο και αγροτικά στοιχεία και γειτνιάζουν με περιοχές που συχνά έχουν έντονα διαφορετικές και ευμετάβλητες χρήσεις γης. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά, τις καθιστούν περίπλοκα περιβάλλοντα, γι' αυτό και στη περίπτωση ενός πλημμυρικού γεγονότος απαιτείται ευέλικτη προσέγγιση και τακτική παρακολούθηση. Για παράδειγμα, στην Αθήνα τις τελευταίες δεκαετίες, υπήρξε εκτεταμένη δόμηση στις παρυφές των βουνών που την περιβάλλουν, χωρίς κάποιο οικοδομικό προγραμματισμό, ενώ δεν λήφθηκαν υπόψιν μέτρα

για τη διαχείριση των περιστατικών υδατορευμάτων και τις αυξημένες πλημμυρικές αιχμές που προκαλούνται λόγω αυτής της αλλαγής (Ξανθόπουλος κ. α ,1995).

Όσον αφορά τις τυπικές μεσογειακές περιοχές που θα εξεταστούν σ' αυτή την εργασία, πέρα από τις πλημμύρες, είναι επιρρεπείς και σε πυρκαγιές κατά τους θερινούς μήνες. Δεν αρκεί λοιπόν η ξεχωριστή εξέταση των δύο φαινομένων, αλλά μία ολοκληρωμένη προσέγγιση που λαμβάνει υπόψιν τη συνδυασμένη επίδραση τους.

Από τη μία, η εκδήλωση πυρκαγιάς έχει ως συνέπεια τη μερική ή ολική καταστροφή της βλάστησης και τη τροποποίηση των ιδιοτήτων των ανωτέρων εδαφικών στρωμάτων, με επακόλουθα τη μειωμένη κατακράτηση και διήθηση, την αυξημένη απορροή και τελικά τις συχνές απότομες και σοβαρές πλημμύρες. Από την άλλη, και οι πλημμύρες επηρεάζουν μία επακόλουθη πυρκαγιά με αλληλοαναιρούμενους τρόπους καθιστώντας πιο δύσκολη την ποσοτικοποίηση των επιδράσεων τους. Οι αυξημένες βροχοπτώσεις κατά την υγρή περίοδο, οδηγούν σε ανάπτυξη χαμηλής βλάστησης, η οποία είναι ιδιαίτερα εύφλεκτη κατά τις ξηρές περιόδους, ενώ ταυτόχρονα η αυξημένη υγρασία της υγρής περιόδου στο φυσικό τοπίο, εμποδίζει την επέκταση της πυρκαγιάς κατά τη πρώιμη ξηρή περίοδο (Parathanasiou, 2018).

Στην εν λόγω εργασία θα εξεταστεί το πρώτο σκέλος, δηλαδή οι επιπτώσεις μετά τη πυρκαγιά στην υδρολογική απόκριση.

#### 1.4 Ο κίνδυνος πλημμύρας μετά από πυρκαγιά

Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες στη περιοχή της Μεσογείου, οι πυρκαγιές είναι το σημαντικότερο πρόβλημα του φυσικού περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα στην Ελλάδα, από τη δεκαετία του 80 και μετά παρατηρείται εκθετική αύξηση των δασικών πυρκαγιών. Όπως δείχνουν και στατιστικά στοιχεία, οι συνολικές ετήσιες καμένες εκτάσεις ξεπέρασαν το 1.000.000 στρέμματα τις χρονιές: 1981, 1985, 1988, 1998, 2000 και 2007 (Πλουμιστός, 2011). Με βάση τα δεδομένα του Ευρωπαϊκού Συστήματος Πληροφόρησης για Δασικές Πυρκαγιές, κατά τη διάρκεια του πρόσφατου 2021, χαρτογραφήθηκαν στην Ελλάδα 84 συμβάντα δασικών πυρκαγιών, τα οποία κατέκαψαν συνολική έκταση που ξεπερνά τα 1.300.000 στρέμματα. Η συγκεκριμένη «επίδοση» είναι η χειρότερη της περιόδου 2008-2021, με τη συνολική καμένη έκταση το 2021 να προσεγγίζει το άθροισμα των καμένων εκτάσεων της οκταετίας 2013-2020 (European Forest Fire Information System ,EFFIS).

Εξετάζοντας την εκδήλωση και εξέλιξη της πυρκαγιάς, ο αντίκτυπος τόσο στη λεκάνη απορροής, όσο και στους κατοίκους της πληγείσας περιοχής, φαίνεται σε οικονομικό, κοινωνικό, οικολογικό, αισθητικό επίπεδο. Αναλυτικότερα, από τη πυρκαγιά επηρεάζονται η

χλωρίδα και η πανίδα της λεκάνης, οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους, η συγκράτηση της βροχής, η επιφανειακή απορροή αλλά και η ποιότητα του νερού και του αέρα. Επιπλέον, επηρεάζονται οι εργασίες και τα εισοδήματα των κατοίκων, οι κοινωνικές τους δραστηριότητες, η ψυχική τους υγεία κλπ. Συγκεκριμένα για τον υδρολογικό αντίκτυπο, οι άμεσες συνέπειες στη βλάστηση και στο έδαφος της λεκάνης αλλάζουν εντελώς τους αρχικούς μηχανισμούς μετατροπής της βροχής σε απορροή, δημιουργώντας συνθήκες επιρρεπείς για πλημμυρικά γεγονότα ακόμη και από ασθενείς βροχοπτώσεις. Η εκδήλωση της πλημμύρας με τη σειρά της, δεν επηρεάζει μόνο την πληγείσα λεκάνη απορροής, αλλά και τις λεκάνες απορροής κατάντη αυτής που συχνά μπορεί να έχουν αντικρουόμενα χαρακτηριστικά με τη πρώτη.

Στην Ελλάδα οι πυρκαγιές εκδηλώνονται κυρίως κατά τη περίοδο Ιουλίου – Σεπτεμβρίου, ενώ οι βροχοπτώσεις ξεκινούν ιδιαίτερα σύντομα, ήδη από τον Οκτώβριο. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι θα πρέπει να υπάρχει πρόληψη από τους αρμόδιους φορείς με άμεση εφαρμογή κατάλληλων αντιπλημμυρικών μέτρων, που θα έχουν προκύψει από έρευνα βασισμένη σε παρελθοντικά ανάλογα περιστατικά.

## 1.5 Επιπτώσεις πυρκαγιάς στην υδρολογική απόκριση

Πολυάριθμες μελέτες έχουν αναδείξει ότι το μέγεθος της σοβαρότητας και της έκτασης της πυρκαγιάς καθορίζουν και τον βαθμό των επιπτώσεων των πυρκαγιών στην υδρολογική απόκριση μίας λεκάνης απορροής. Όσο αυξάνεται η σοβαρότητα της πυρκαγιάς τόσο αυξάνεται και η επίδραση στα χαρακτηριστικά της λεκάνης. Πέραν της έντασης και έκτασης μίας πυρκαγιάς, υπάρχει πλήθος παραγόντων που καθορίζουν την ένταση των επιπτώσεων μίας πυρκαγιάς υδρολογικά. Η συχνότητα πυρκαγιών στη υπό μελέτη λεκάνη, τοπογραφικά χαρακτηριστικά, όπως η κλίση και η καμπυλότητα του εδάφους, τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες όπως ο χρόνος εμφάνισης και ένταση σημαντικών βροχοπτώσεων μετά τη φωτιά, το είδος της βλάστησης και ο ρυθμός ανάπλασης της είναι μερικοί από αυτούς.

Οι συνέπειες μίας πυρκαγιάς στο υδρολογικό καθεστώς μίας λεκάνης απορροής διαφέρουν μεταξύ τους τόσο χρονικά -όσο και χωρικά . Άλλες είναι άμεσες άλλες εμφανίζονται αρκετά μεταγενέστερα, άλλες επηρεάζουν την επιφάνεια του εδάφους, άλλες κατώτερα στρώματα.

### 1.5.1 Άμεσες επιπτώσεις

#### Αλλαγή κάλυψης επιφανείας της λεκάνης απορροής

Πρώτη και προφανής συνέπεια μίας πυρκαγιάς είναι η ολική ή μερική καταστροφή της φυτικής κάλυψης του εδάφους. Η βλάστηση έχει διπλή ευνοϊκή λειτουργία για την υδρολογική απόκριση, καθώς λειτουργεί ως εμπόδιο που μετριάζει την ορμή του νερού και παράλληλα απορροφά μέρος της βροχόπτωσης. Γι' αυτό, ανάλογα με το βαθμό αποψίλωσης παρατηρούνται και διαφορετικές εντάσεως επιπτώσεις.

#### Αλλοίωση των ιδιοτήτων του εδάφους

Μετά τη πυρκαγιά η οργανική επικάλυψη του εδάφους μετατρέπεται σε διαλυτή τέφρα, το υπερυψωμένο φύλλωμα απομακρύνεται και το μικρόκλιμα στη πληγείσα περιοχή τροποποιείται, συμβάλλοντας στην αλλοίωση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων (Lavabre et al., 1993). Ισχυρή συσχέτιση σοβαρότητας πυρκαγιάς και επιδράσεων φωτιών (36%) στις φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους δείχνουν οι μελέτες των Rulli and Rosso (2007).

#### ➤ Επιδράσεις στις φυσικές ιδιότητες του εδάφους

Κατά τη διάρκεια μίας σφοδρής πυρκαγιάς, καταστρέφεται οργανικό υλικό που κυριαρχεί στα ανώτερα εδαφικά στρώματα. Η ύπαρξη λοιπόν οργανικού υλικού, προκαλεί ένα είδος συσσωμάτωσης, που επηρεάζει καθοριστικά τη δομή, τη συνοχή και το πορώδες (DeBano et al, 2005), με τη φωτιά να επιδρά και στις τρεις αυτές συνιστώσες με διαφορετικό τρόπο.

Όσον αφορά τη δομή, ενώ τα ορυκτά καταστρέφονται σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες, η καταστροφή της οργανικής ύλης ξεκινά σε χαμηλές θερμοκρασίες, γύρω στους 200°C και ολοκληρώνεται στους 500°C, καθιστώντας την επιρρεπή σε μεταβολές ακόμη και σε χαμηλής έντασης πυρκαγιά (Παπαθεοδοσίου και Χριστοδούλου, 2009). Τέλος, η ανάκαμψη διαφέρει ανάλογα με την ένταση της πυρκαγιάς, τις συνθήκες υγρασίας κ.α. Για παράδειγμα, ο DeBano και οι συνεργάτες του συμπέραναν σε μελέτες τους στη νοτιοδυτική Αμερική πως περιοχές με υγρό έδαφος που έχουν πληγεί από χαμηλής έντασης φωτιές, ανακάμπτουν γρηγορότερα σε σχέση με ορεινές περιοχές που έχουν καεί από πυρκαγιά με ισχυρή ένταση.

Η καταστροφή της δομής του εδάφους οδηγεί στη μείωση του πορώδους και του μεγέθους του πόρων. Ακόμα, η είσοδος της στάχτης στους πόρους, προκαλεί έμφραξη, με συνέπεια την περαιτέρω μείωση του πορώδους (sealing effect).

Επίσης, με την απουσία της βλάστησης, η ικανότητα αποθήκευσης νερού από το έδαφος είναι σημαντικά μειωμένα, με αποτέλεσμα πολύ μικρότερα ύψη βροχής να φέρνουν το έδαφος σε

κορεσμό και να δημιουργούν έντονες επιφανειακές απορροές και πλημμυρικά επεισόδια. Αξίζει να σημειωθεί πως η επανάληψη των πυρκαγιών επηρεάζει την υδραυλική αγωγιμότητα, καθώς το έδαφος που καίγεται συχνά είναι πιο συμπαγές και λιγότερο περατό από το μη καμένο (Garren, 1943).

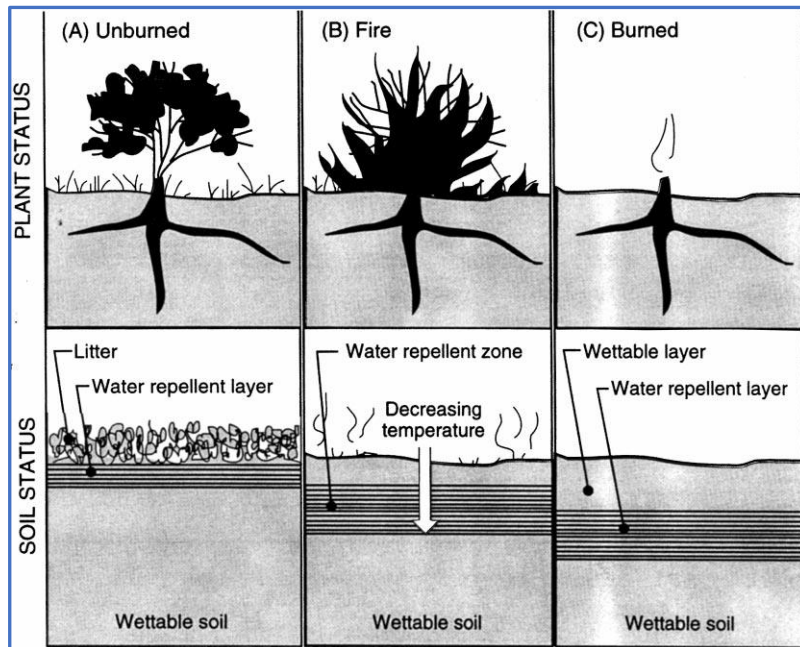
➤ **Επιδράσεις στις χημικές ιδιότητες του εδάφους**

Ως αποτέλεσμα της καύσης των οργανικών ουσιών του εδάφους, σχηματίζεται ένα αδιαπέρατο από το νερό στρώμα, παράλληλο στην επιφάνεια του εδάφους, λίγα εκατοστά κάτω από αυτή, γνωστό και ως υδρόφοβο στρώμα. Οι οργανικές ουσίες στο έδαφος προκαλούν απωθητικότητα στο νερό, είτε σε συνθήκες πυρκαγιάς, είτε όχι. Η υδροφοβικότητα είναι ένα φυσικό φαινόμενο, που παρουσιάζεται στα ανώτερα τμήματα του εδάφους - κοντά στην επιφάνεια- και μάλιστα μπορεί να είναι αρκετά έντονη σε δάση που έχουν μείνει άκαυτα για πολύ καιρό (>150 έτη, Kozłowski, 1975).

Σύμφωνα με δεδομένα πεδίου και εργαστηριακές δοκιμές, ο DeBano περιγράφει ως εξής τη διαδικασία σχηματισμού υδρόφοβου στρώματος. Πριν τη πυρκαγιά, στο χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών πυρκαγιών, το οργανικό υλικό που συσσωρεύεται στην επιφάνεια του εδάφους δημιουργεί υδατοαπωθητικό στρώμα στο πολύ ανώτερο τμήμα του εδάφους. Η επιφανειακή αυτή υδροφοβικότητα δεν είναι το ίδιο έντονη με εκείνη που εμφανίζεται μετά τη πυρκαγιά, καθώς έχει μικρότερο πάχος και ασυνέχειες που επιτρέπουν τη διήθηση (Σχήμα 1.1A). Κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς, καθώς το οργανικό υλικό της βλάστησης καίγεται, το 90% απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα υπό τη μορφή καπνού και το υπόλοιπο 10% εξαερώνεται και προχωρά προς τα κάτω, προς στρώματα με χαμηλότερες θερμοκρασίες, όπου συμπυκνώνεται σταδιακά (Σχήμα 1.1B). Μετά το τέλος της φωτιάς, το υδρόφοβο στρώμα παραμένει χωρίς να είναι ομοιόμορφο παντού, επιτρέποντας την διήθηση σε περιορισμένο βάθος μέσα στο έδαφος (μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και του υδρόφοβου στρώματος) (Σχήμα 1.1C).

Ανάλογα με την ένταση της πυρκαγιάς και επομένως τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο έδαφος, καθορίζεται το βάθος και το πάχος του υδρόφοβου στρώματος. Ο Neary και οι συνεργάτες του το 1999 αναφέρουν ότι σχηματίζεται σε θερμοκρασίες μεταξύ 176°C και 288° και καταστρέφεται σε βαθμούς πάνω από τους 288° C, πράγμα που σημαίνει ότι σε μέτριας και μεγάλης έντασης πυρκαγιές το υδρόφοβο είναι πιο έντονο και παχύ (DeBano et al, 2005).





Σχήμα 1.1: Οι μεταβολές στην υδροφοβικότητα κατά τη φωτιά και η γραμμή απώθησης του νερού (A) πριν τη πυρκαγιά, (B) κατά τη διάρκεια της φωτιάς και (C) μετά τη πυρκαγιά (De Bano et al., 2005).

### 1.5.2 Έμμεσες επιπτώσεις

Οι έμμεσες επιπτώσεις έρχονται ως αποτέλεσμα των προαναφερθέντων άμεσων επιπτώσεων πυρκαγιάς και αναλύονται παρακάτω.

- Η αλλαγή κάλυψης επιφανείας της λεκάνης απορροής επιταχύνει την επιφανειακή απορροή.

Εφόσον πλέον δεν υπάρχουν εμπόδια ή είναι εμφανώς μειωμένα, η ροή εμφανίζει μεγαλύτερη ταχύτητα. Η καταστροφή της βλάστησης τροποποιεί την εξατμισοδιαπνοή και επιδρά σημαντικά στον υδρολογικό κύκλο. Με δεδομένα την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και την αυξημένη ταχύτητα ανέμου, που προκύπτει λόγω της κατεστραμμένης πλέον βλάστησης στη περιοχή, παρουσιάζεται μειωμένη διαπνοή, αυξημένη εξάτμιση και άρα αυξημένη επιφανειακή απορροή (Lavabre et al., 1993; Moffet et al., 2007; Pierson et al., 2008).

Το δε στρώμα τέφρας, που καλύπτει την επιφάνεια της πληγείσας λεκάνης απορροής και κυριαρχεί ιδιαίτερα κατά την πρώτη περίοδο μετά την πυρκαγιά, συμβάλλει στη μείωση της διήθησης και στην αύξηση της απορροής. Ωστόσο, κατά τις πρώτες βροχοπτώσεις μετά τη πυρκαγιά, όπως αναφέρουν ο Campo και οι συνεργάτες του το 2006, μπορεί να δρα και ως προστατευτικό στρώμα εμποδίζοντας τη διάβρωση και την αποκόλληση του εδάφους.

- Η αλλοίωση των φυσικών χαρακτηριστικών του εδάφους προκαλεί μειωμένη αποθηκευτικότητα νερού στο έδαφος, που οδηγεί εν ακολουθία σε αύξηση της απορροής και της απώλειας εδάφους.

Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην υδρολογική λεκάνη του χειμάρρου Λυκόρρεμα, του όρους Πεντέλης, αναλύθηκαν δείγματα εδάφους από δύο τοποθεσίες με στόχο την εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους πριν και μετά από πυρκαγιά που έπληξε την περιοχή το 2005 (Soulis et al., 2007). Χαρακτηριστικά, οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας μειώθηκαν κατά 72% και 83% αντίστοιχα στις επιλεγμένες θέσεις.

- Η αλλοίωση των χημικών χαρακτηριστικών του εδάφους- σχηματισμός υδρόφοβου στρώματος- σχετίζεται με αυξημένη διάβρωση και μειωμένη διήθηση.

Το υδρόφοβο στρώμα, όπως ειπώθηκε και παραπάνω, επιτρέπει τη διήθηση μόνο μέχρι ένα περιορισμένο βάθος, με αποτέλεσμα την αυξημένη και ακανόνιστη απορροή, ειδικά σε εδάφη που έχουν πληγεί από πυρκαγιές μεγάλης έντασης (Rulli and Rosso, 2007; Scott and Van Wyk, 1990; Beeson et al., 2001). Ιδιαίτερα κατά τις πρώτες βροχοπτώσεις σε πρόσφατα καμένες περιοχές, το νερό ρέει επιφανειακά, διεισδύει και τελικά συγκεντρώνεται πάνω από το αδιαπέρατο από το νερό στρώμα. Ως αποτέλεσμα, έχει συγκεντρωθεί αρκετή ποσότητα νερού πάνω από το αδιάβροχο στρώμα, ώστε να το πολτοποιήσει. Αυτή η κατάσταση δημιουργεί μια ροή φερτών πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, πάνω από το υδρόφοβο στρώμα, προς τα κάτω, προς την βάση της πλαγιάς (DeBano et al., 2005). Εξού λοιπόν, και η μεγάλη στερεοαπορροή και στερεοπαροχή που παρατηρείται στα πρώτα επεισόδια βροχής, που μπορεί να μην είναι πολύ έντονα, σε πρόσφατα πυρόπληκτες περιοχές. Τέλος, κατά Campbell et al. (1977), το ποσοστό διήθησης σε έντονα καμένες περιοχές πευκοδασών στην Αριζόνα μειώθηκε κατά περίπου 63% σε σύγκριση με τα μη καμένα τμήματα της περιοχής.

- Η αποψίλωση της βλάστησης προκαλεί διάβρωση, το νερό πλέον δεν συγκρατείται στις ρίζες των φυτών, αλλά παρασύρει μαζί του φερτές ύλες, αυξάνοντας κατ' επέκταση τις απώλειες εδάφους και τη στερεοαπορροή.

Όσον αφορά το βαθμό διάβρωσης μετά τη πυρκαγιά, από μελέτες στο Αϊντάχο και το Κολοράντο, παρουσιάζονται αυξημένα επίπεδα διάβρωσης μετά από πυρκαγιές σε σχέση με άκαυτες περιοχές, όπου οι τιμές της διάβρωσης διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα (Robichaud, 2000; Benavides-Solario and MacDonald, 2001). Η αιχμή των τιμών της διάβρωσης σε μελέτες των Cerda και Lasanta το 2005 σε δύο πειραματικές λεκάνες εμφανίζονται μετά από ένα και δύο χρόνια αντίστοιχα.

Ο βαθμός διάβρωσης του εδάφους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που περιλαμβάνουν τη μεταβολή των ιδιοτήτων του εδάφους, την κλίση του, της ένταση της βροχόπτωσης και της πυρκαγιάς, το μέγεθος, τη γεωλογία και την κάλυψη της περιοχής (Johansen et al., 2001). Συγκριμένα, πολλοί ερευνητές έχει διαπιστωθεί πως όσο αυξάνεται η σοβαρότητα της πυρκαγιάς, τόσο αυξάνεται και η διάβρωση (Cannon and Reneau, 2000; Bisson et al., 2005; Dragovich et al., 2002). Σύμφωνα με τον Πλουμιστό (2011), σε περίπτωση επαναλαμβανόμενης πυρκαγιάς σε λεκάνη απορροής που δεν έχει αποκατασταθεί η βλάστηση, η διάβρωση είναι σαφώς μεγαλύτερη. Όσον αφορά τις μεταβολές στις ιδιότητες του εδάφους, η αποκόλληση των αδρανών του εδάφους, που λαμβάνει χώρα μετά από πυρκαγιά υψηλής έντασης, προκαλεί αυξημένη διάβρωση. Κατά τον Bisson και τους συνεργάτες του (2005), η κλίση και σε μικρότερο βαθμό η καμπυλότητα της πλαγιάς επηρεάζουν συνήθως σημαντικά τη διάβρωση του εδάφους μετά από πυρκαγιά. Οι κοίλες πλαγιές μεγάλου μήκους και απότομων κλίσεων διαβρώνονται ευκολότερα σε σχέση με πλαγιές μικρού μήκους και ήπιων κλίσεων. Σε μία λεκάνη απορροής που αποτελείται από αδιαπέρατα πετρώματα (φλύσχη, σχίστη) και αβαθή εδάφη, εμποδίζεται η επαρκής διήθηση του νερού και δημιουργείται κορεσμένη επιφανειακή απορροή που οδηγεί σε αυξημένη διάβρωση (Πλουμιστός, 2011). Η διάβρωση του εδάφους μετά από πυρκαγιά εξαρτάται έμμεσα και από το τοπικό κλίμα (Kutiel et al., 1995; Inbar et al., 1998; Wondzell and King, 2003; Rulli and Rosso, 2007), τον χρόνο εμφάνισης καταιγίδων μετά τη φωτιά, τα χαρακτηριστικά τους αλλά και τις εδαφικές συνθήκες υγρασίας. Σε μία έντονη βροχόπτωση μετά τη πυρκαγιά, υπάρχει απώλεια βιομάζας, καθώς το επιφανειακό έδαφος είναι απροστάτευτο, χαλαρό και εύκολα παρασυρόμενο.

Η επίδραση των πυρκαγιών στη διάβρωση των εδαφών έχει μελετηθεί και στον ελλαδικό χώρο εκτενώς από τους Παπαθεοδοσίου και Χριστοδούλου το 2009, αλλά και στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του Πλουμιστού το 2011. Τέλος, υπάρχουν και έρευνες που έχουν επικεντρωθεί στον απαιτούμενο χρόνο αποκατάστασης των επιπέδων διάβρωσης του εδάφους στις αρχικές συνθήκες, πριν τη φωτιά. Ο Robichaud (2000) προσδιορίζει χρονικά τα 3 με 9 χρόνια μετά τη πυρκαγιά, ενώ οι Moody και Martin (2001) τα 3 με 4 χρόνια για την επαναφορά των τιμών διάβρωσης στα προπυρρικά δεδομένα.

Για την απώλεια εδάφους, έχει φανεί από διάφορες έρευνες στη περιοχή της Μεσογείου πως η μεγαλύτερη απώλεια συντελείται ένα με δύο χρόνια μετά τη φωτιά. Επίσης, μετά από μια πειραματική πυρκαγιά σε λεκάνες απορροής στη Βαλένθια της Ισπανίας από τον Campo και τους συνεργάτες του, παρατηρήθηκε διπλή αύξηση της απώλειας εδάφους σε σχέση με την προπυρρική συνθήκη.

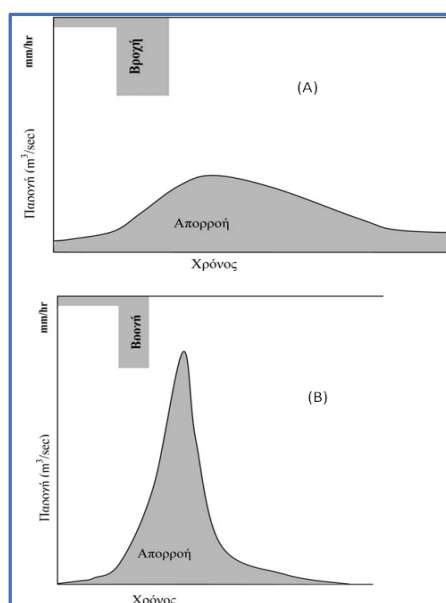
Εφόσον λοιπόν, το έδαφος είναι πιο επιρρεπές στη διάβρωση λόγω της καμένης βλάστησης, αναπτύσσονται υψηλότερες ταχύτητες χερσαίας ροής και αναμένεται να μεταφερθεί μεγαλύτερη ποσότητα φερτών υλών σε σχέση με πριν τη πυρκαγιά (Brown, 1972; Scott and Van Wyk, 1990). Οι τιμές της στερεοαπορροής εξαρτώνται σημαντικά από τη τοπογραφία της περιοχής αλλά και το διάστημα που έχει περάσει μετά τη πυρκαγιά. Ο Soto και οι συνεργάτες του (1995) κατέγραψαν μέγιστη στερεοαπορροή 4 μήνες μετά τη πυρκαγιά, ενώ ο Vega και οι συνεργάτες του (2005) 8 μήνες.

➤ Η τραχύτητα της λεκάνης απορροής μειώνεται.

Γενικά, ο συντελεστής τραχύτητας ( $n$ ) του Manning μετά την πυρκαγιά αναμένεται να αλλάξει σημαντικά. Οι Rulli και Rosso (2007) προτείνουν ότι οι τιμές του συντελεστή Manning πριν από την πυρκαγιά,  $n = 0,2 \text{ sm}^{-1/3}$  σε πλαγιές και  $n = 0,05 \text{ sm}^{-1/3}$  στα κανάλια, αλλάζουν μετά την πυρκαγιά σε  $0,05 \text{ sm}^{-1/3}$  στις πλαγιές και  $0,03 \text{ sm}^{-1/3}$  σε κανάλια αντίστοιχα.

➤ Η αύξηση των ροών αιχμής και του όγκου απορροής κατά τη διάρκεια πλημμυρικών γεγονότων μετά την πυρκαγιά (Σχήμα 1.2).

Αποτέλεσμα τόσο άμεσων (καταστροφή βλάστησης, αλλοίωση εδαφικών ιδιοτήτων) όσο και έμμεσων αποτελεσμάτων (διάβρωση, καθίζηση, ροή συντριμμίων) αποτελούν τις πιο σημαντικές και εύκολα αναγνωρίσιμες συνέπειες της πυρκαγιάς στην υδρολογική απόκριση μίας λεκάνης.



Σχήμα 1.2: Υδρολογική συμπεριφορά λεκάνης απορροής, (A) πριν από φωτιά και (B) μετά από φωτιά (Μπαλούτσος κ.α, 2021- ίδια επεξεργασία).

Η αύξηση στη ροή αιχμής έχει μελετηθεί από πολλούς επιστήμονες ανά καιρούς (Springer and Hawkins, 2005; Batalla, 2002; Scott και Van Wyk, 1990). Στη φωτιά Cerro Grande που συνέβη επίσης στο Νέο Μεξικό το 2000, σημειώθηκε αύξηση της μέγιστης ροής για τα επόμενα δύο χρόνια της πυρκαγιάς (Springer and Hawkins, 2005). Στη μελέτη των Scott και Van Wyk (1990), ο ρυθμός ροής αυξήθηκε κατά 290% ένα χρόνο μετά από πυρκαγιά στη Νότια Αφρική. Ειδικά για τις μεσογειακές περιοχές, οι αυξήσεις αιχμής κυμαίνονται από 45% έως 600% σε μεγάλες λεκάνες, φτάνοντας το 5700% σε μικρές λεκάνες (Batalla, 2002).

Ο όγκος απορροής πλημμύρας έχει αναλυθεί από τους Brown (1972), Bisson et al. (2005), Scott and Van Wyk (1990), Lavabre et al. (1993) και Beeson et al. (2001). Μετά από καταστροφή περίπου του 85% μιας δασικής έκτασης, παρατηρήθηκε αύξηση της απορροής κατά 25-30% το επόμενο έτος (Lavabre et al., 1993). Μια πυρκαγιά που έπληξε περίπου το 80% μιας δασικής λεκάνης απορροής στη Νότια Αφρική, είχε ως αποτέλεσμα αύξηση 62% και 201% του συνολικού όγκου και της άμεσης απορροής αντίστοιχα κατά τη διάρκεια πλημμυρών, ενώ ο συντελεστής απορροής αυξήθηκε κατά 242% και η μέση εβδομαδιαία ροή ροής αυξήθηκε κατά 12,4% το επόμενο έτος της πυρκαγιάς (Scott and Van Wyk, 1990). Σε διάστημα 6 ετών μετά από πυρκαγιά σε μεσογειακή λεκάνη απορροής, ο συντελεστής απορροής μειώθηκε κατά 45% κατά τον πρώτο χειμώνα και κατά 6% κατά τον έκτο χειμώνα μετά την πυρκαγιά (Rulli and Rosso, 2007). Στην έρευνα του Campbell και των συνεργατών του (1977), η ροή του ρεύματος αυξήθηκε κατά 800% και η απόδοση της απορροής αυξήθηκε κατά 450% το επόμενο έτος πυρκαγιάς. Η πρώτη περίοδος βροχοπτώσεων που ακολούθησε μία πυρκαγιά στο Όρος Καρμέλ στο Ισραήλ, είχε ως αποτέλεσμα αυξημένη απορροή κατά 500 φορές (Inbar et al., 1998). Στις περιοχές της Μεσογείου, η αυξημένη απορροή κυμαίνεται από 11% έως 300% σε μεγάλες λεκάνες (Batalla, 2002), φτάνοντας το 800% σε μικρές λεκάνες (Batalla, 2002; Campbell et al., 1977). Τέλος, ως αποτέλεσμα πειραματικής πυρκαγιάς σε λεκάνες απορροής στη Βαλένθια της Ισπανίας, αναφέρθηκε τριπλάσια αύξηση του ρυθμού απορροής (Campo et al., 2006).

➤ **Οι αυξημένες ροές αιχμής και όγκοι απορροής οδηγούν και σε εντονότερα πλημμυρικά υδρογραφήματα.**

Σύμφωνα με μελέτες, σε περιοχές τμηματικά καμένες πριν τη πυρκαγιά πολλά υδρογραφήματα έδειξαν μια αρκετά στρογγυλεμένη κορυφή αρκετές ώρες μετά την έναρξη των βροχοπτώσεων, η οποία ακολουθήθηκε από μια σταθερή ύφεση. Μετά τη φωτιά, οι έντονες αιχμές ακολουθήθηκαν από πιο στρογγυλεμένες κορυφές, όπως πριν τη φωτιά ενώ σε άλλες περιπτώσεις, παρατηρήθηκε μια πολύ αιχμηρή κορυφή, ακολουθούμενη από μια εξίσου γρήγορη ύφεση (Brown, 1972, Lavabre et al., 1993).

➤ **Πρόκληση ροής συντριμμιών**

Αίτια της ροής αυτής είναι η επιφανειακή ροή ή ο κορεσμός του εδάφους. Οι Mitsopoulos και Mironidis (2006) και οι Scott και Van Wyk (1990) έχουν αποδείξει ότι η ροή συντριμμιών μετά την πυρκαγιά αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά, καθώς συμβαίνει απροειδοποίητα και μπορεί να προκαλέσει σημαντικές καταστροφές. Το 1998 στο Σάρνο της Ιταλίας πάνω από 160 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους από ροή συντριμμιών μετά από πυρκαγιά (Bisson et al., 2005). Ο Cannon και οι συνεργάτες του (2008) έχουν εξάγει σημαντικά συμπεράσματα για τη σχέση στερεοαπορροής και μεταπυρικής συνθήκης. Στις καμένες περιοχές, μπορούν να προκληθούν υψηλές ροές φερτών υλών ακόμη και αν οι προηγούμενες τιμές υγρασίας είναι αμελητέες. Τα δύο πρώτα χρόνια μετά από μία πυρκαγιά, η ροή των συντριμμιών προέρχεται κυρίως από την προοδευτική παραλαβή υλικού που έχει διαβρωθεί από τις πλαγιές και τα κανάλια κατά τη διάρκεια της επιφανειακής απορροής, ακόμη και μετά από διαλείμματα μικρής διάρκειας, με πιο κρίσιμη περίοδο, τη πρώτη σημαντική καταιγίδα μετά τη πυρκαγιά. Επειδή η ροή εξαρτάται πρωτίστως από τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης, οποιαδήποτε αλλαγή είναι σημαντικό να καταγράφεται κατά την εξέταση των ροών, όπως στην έρευνα των Cannon et al. (2008). που οι ροές συντριμμιών συνέβησαν μετά από βροχοπτώσεις υψηλής έντασης.

➤ **Αλλαγή της διάρκειας της περιόδου των χιονοπτώσεων σε περιοχές που κυριαρχεί το χιόνι.**

Οι Pimentel και Arheimer (2021) στην έρευνα τους για την υδρολογική συμπεριφορά του δάσους μετά τη πυρκαγιά του Västmanland (Σουηδία, 2014), με εργαλεία προϊόντα τηλεπισκόπησης, έδειξαν πως η μέση διάρκεια της χιονόπτωσης κατά την περίοδο μετά την πυρκαγιά ήταν μικρότερη σε όλες τις υπό μελέτη λεκάνες απορροής που εξέτασαν. Αυτό αποτελεί συνέπεια της μεταγενέστερη έναρξης συσσώρευσης του χιονιού.

➤ **Κίνδυνος ερημοποίησης σε μεσογειακές περιοχές**

Οι ιδιαίτερες καιρικές συνθήκες, η μεταφορά ιζημάτων μεταπυρικά (Rulli και Rosso, 2007) και οι επανειλημμένες πυρκαγιές που οδηγούν σε αυξημένη διάβρωση (Campo et al., 2006) μπορούν να προκαλέσουν ερημοποίηση. Ο Mayor και οι συνεργάτες του (2007) αναφέρουν ότι ο κίνδυνος είναι ιδιαίτερα αυξημένος σε ξηρές Μεσογειακές περιοχές.

Συνοπτικά και για μία ολοκληρωμένη εικόνα, στον πίνακα 1.1 παρουσιάζονται όλες οι παραπάνω επιπτώσεις με χρονική σειρά, όπως και οι διεργασίες διάβρωσης του εδάφους και δημιουργίας πλημμύρας μετά από ισχυρή βροχόπτωση (Μπαλούτσος κ.α, 2021).

Πίνακας 1.1: Μεταβολές χαρακτηριστικών λεκάνης απορροής δυναμικά στον χρόνο μετά από πυρκαγιά, διεργασίες διάβρωσης και δημιουργίας πλημμύρας μετά από ισχυρή βροχόπτωση (Μπαλούτσος κ.α., 2021- ίδια επεξεργασία).

Δημιουργία υδρόφοβου στρώματος εντός του εδάφους από καύση οργανικής ύλης. Συντελεί στην αύξηση της επιφανειακής απορροής	1	Πτώση μεγαλύτερου ύψους βροχής λόγω έλλειψης βλάστησης-υδατοσυγκράτησης	2
Συγκράτηση λιγότερης υγρασίας στην επιφάνεια του εδάφους λόγω έλλειψης φυτικών υπολειμμάτων.	3	Κατακερματισμός των εδαφικών συσσωμμάτων λόγω μεγαλύτερης ενέργειας των σταγόνων της βροχής.	4
Μείωση της ταχύτητας διήθησης της βροχής λόγω έμφραξης των πόρων του.	5	Δημιουργία επιφανειακής απορροής στις πλαγιές της λεκάνης.	6
Μείωση της αντίστασης του εδάφους στη παράσυρση φερτών λόγω έλλειψης βλάστησης.	7	Διάβρωση και παράσυρση του εδάφους προς τα κατάντη και τις κοίτες των υδατορευμάτων.	8
Σημαντική και απότομη αύξηση της στερεοπαροχής στην κοίτη των υδατορευμάτων.	9	Διάβρωση του πυθμένα και των πρηνών και μεταφορά των υλικών προς τα κατάντη.	10
Υπερχείλισης της πεδινής κοίτης του υδατορεύματος και επιδείνωση της κατάστασης σε περίπτωση ύπαρξης ανθρώπινων παρεμβάσεων.	11	Δημιουργία πλημμυρικών φαινομένων στην κατοικημένη περιοχή της λεκάνης με πληθώρα δυσμενών επιπτώσεων.	12

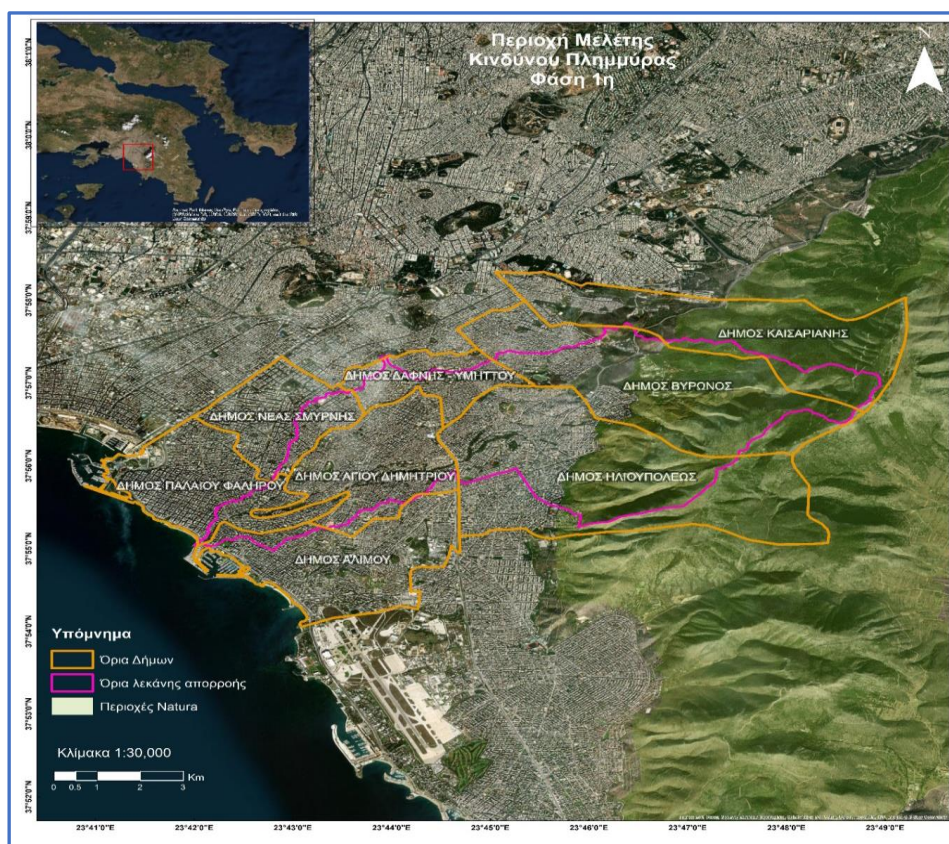


## 2 Περιοχή μελέτης

### 2.1 Η υδρολογική λεκάνη του ρέματος στην περιοχή μελέτης

#### 2.1.1 Γενικά

Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας αποτελεί υποσύνολο της ευρύτερης λεκάνης απορροής του ρεύματος Πικροδάφνης. Το ρέμα της Πικροδάφνης εντάσσεται σε μια ευρύτερη λεκάνη που αποστραγγίζει ένα σημαντικό τμήμα των νοτιοδυτικών πλαγιών του Υμηττού και αποτελεί μαζί με τον Κηφισό και τον Ιλισό ένα από τα μεγαλύτερα σε μήκος ρέματα της περιοχής. Εντοπίζεται στο νοτιοανατολικό τμήμα του λεκανοπεδίου της Αττικής, το οποίο περιβάλλεται δυτικά από το όρος Αιγάλεω, βόρεια από τα όρη Πάρνηθα και Πεντέλη και ανατολικά από το όρος Υμηττός. Πηγάζει από τις ανατολικές υπώρειες του Υμηττού στην περιοχή του Καρέα και οι εκβολές του είναι στον Σαρωνικό κόλπο, στην περιοχή του Φαληρικού κόλπου. Ο υδροκρίτης της λεκάνης απορροής του ρέματος Πικροδάφνης διέρχεται από το δυτικό τμήμα του Υμηττού. Διοικητικά, η υδρολογική λεκάνη καλύπτει τμήματα των ακόλουθων Δήμων (από ανάντη προς κατάντη): Καισαριανής, Βύρωνα, Ηλιουπόλεως, Δάφνης - Υμηττού, Νέας Σμύρνης, Αγ. Δημητρίου, Παλαιού Φαλήρου και Αλίμου (Μαμάσης κ. α, 2013) (Σχήμα 2.1).

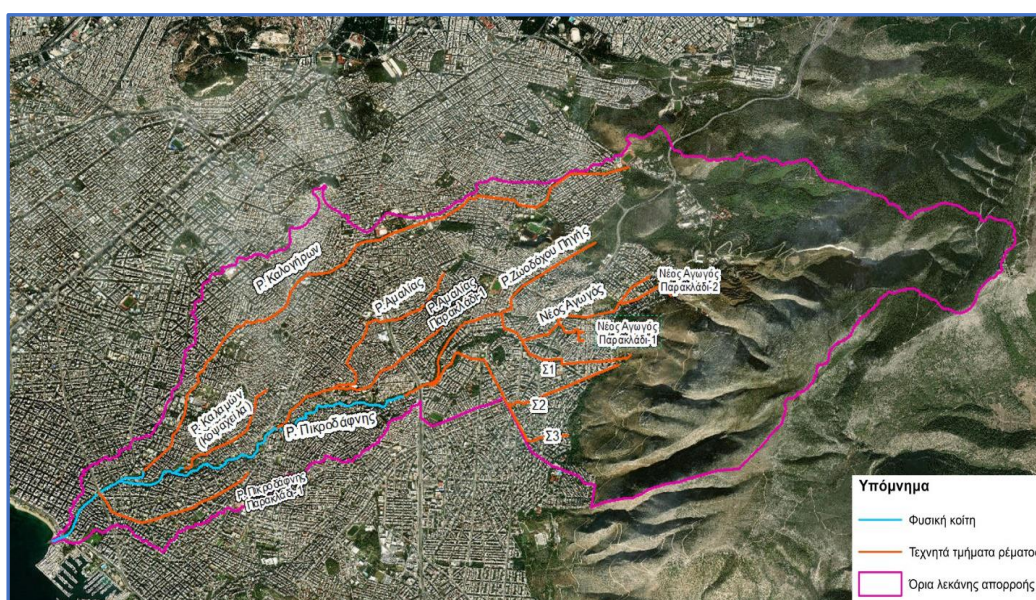


Σχήμα 2.1: Η λεκάνη απορροής της Πικροδάφνης και οι δήμοι που καλύπτει (Εκτίμηση κινδύνων σεισμού, πυρκαγιάς & πλημμύρας στην Περιφέρεια Αττικής – Α' Μέρος, Ε.Α.Α., 10/2021).



Στην πορεία του ρέματος συμβάλλουν πολλά υδατορεύματα. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι: το ρέμα της Ζωοδόχου πηγής (αποστραγγίζει ένα μεγάλο τμήμα των απορροών του ορεινού όγκου του Υμηττού και στο ύψος του νεκροταφείου του Βύρωνα οι κοίτες του αντικαταστάθηκαν από δίκτυα ομβρίων υδάτων), το ρέμα Αγίου Δημητρίου ή Αμαλίας (αποστραγγίζει μέρος των δήμων Ηλιουπόλεως και Δάφνης και εκτός από ένα κομμάτι ελεύθερης κοίτης στην λεωφόρο Αγίου Δημητρίου, το υπόλοιπο έχει αντικατασταθεί από δίκτυο ομβρίων υδάτων), το ρέμα Καλογραιών ή Καλαμών (αποστραγγίζει τη νοτιοδυτική έκταση του δήμου Αγίου Δημητρίου) και το ρέμα Καλογήρων (συμβάλει στο ρέμα της Πικροδάφνης πλησίον της εκβολής του και η κοίτη του στο μεγαλύτερο τμήμα της έχει αντικατασταθεί από δίκτυο ομβρίων υδάτων) (Σέρεσλη, 2014).

Από το συνολικό μήκος του ρέματος -9.300 m περίπου-, τα 6.000 m περίπου διατηρούν ακόμα την φυσική του κοίτη, ενώ τα υπόλοιπα είναι εγκιβωτισμένα. Το όριο των δύο αυτών τμημάτων αποτελεί η λεωφόρος Βουλιαγμένης, όπου ανάντη αυτής το ρέμα στην πλειονότητά του έχει εγκιβωτιστεί, δηλαδή οι συμβάλλοντες κλάδοι που είναι πιο μακριά από το κύριο ρεύμα έχουν μετατραπεί σε υπόγειους αγωγούς. (Σχήμα 2.2).

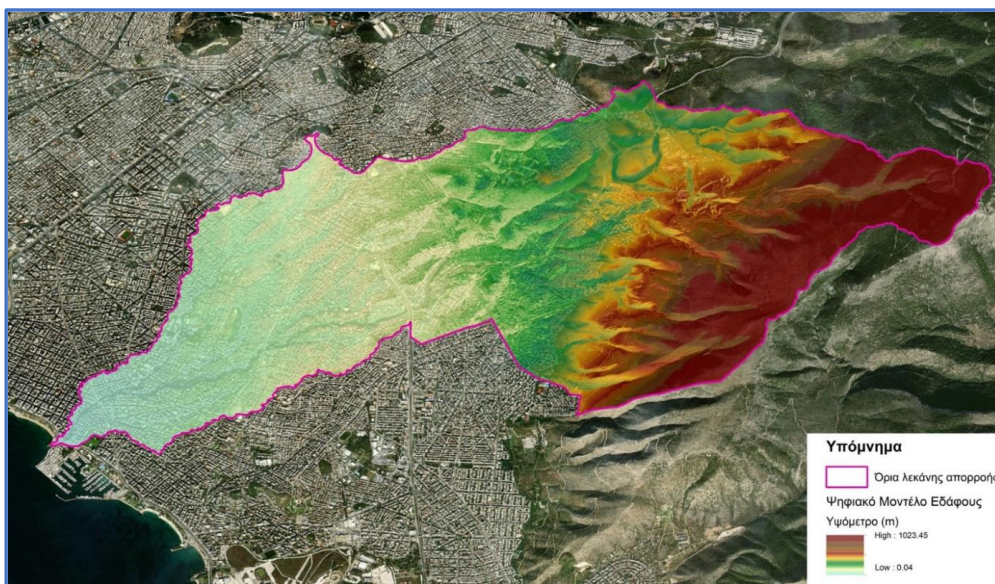


Σχήμα 2.2: Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης (Εκτίμηση κινδύνων σεισμού, πυρκαγιάς & πλημμύρας στην Περιφέρεια Αττικής – Α' Μέρος, Ε.Α.Α. , 10/2021).

### 2.1.2 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά

Η λεκάνη απορροής του ρέματος Πικροδάφνης έχει συνολική έκταση 24.99 km<sup>2</sup>. Το υψόμετρο της λεκάνης απορροής κυμαίνεται από 0 έως 1.023,45 m (κορυφή Εύζωνος), με μέση τιμή 267 m. Το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης (>60%) αναπτύσσεται εντός του αστικού ιστού της Αθήνας και συγκεκριμένα εντός των νοτιοανατολικών προαστίων της. Το μορφολογικό της

ανάγλυφο χαρακτηρίζεται, με βάση τη ταξινόμηση Dikau<sup>1</sup> (1989), κατά κύριο λόγο πεδινό (51%) και λοφώδες (38%), ενώ το ημιορεινό και ορεινό τμήμα της δεν ξεπερνά το 11% (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3: Χάρτης ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Εκτίμηση κινδύνων σεισμού, πυρκαγιάς & πλημμύρας στην Περιφέρεια Αττικής – Α' Μέρος, Ε.Α.Α., 10/2021).

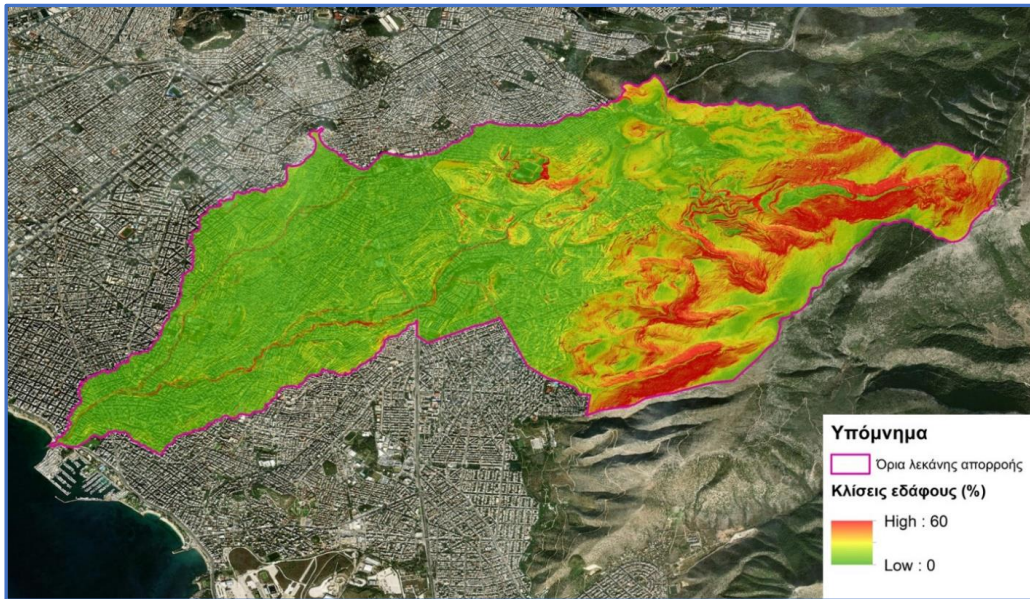
Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του ρέματος Πικροδάφνης έχει επιμηκυμένη δενδρική μορφή με διεύθυνση ροής βορειοανατολική - νοτιοδυτική. Παράλληλα, το ρέμα εμφανίζει ασύμμετρη ροή, καθώς ο κεντρικός του κλάδος είναι μετατοπισμένος προς τα δυτικά, γεγονός που αποδίδεται στην προσφορά υλικού από τα δυτικά πρηνή του Υμηττού που τον αναγκάζει να μετατοπιστεί παράλληλα στον άξονά του και μακρύτερα από τον ορεινό όγκο.

Οι κλίσεις του εδάφους κυμαίνονται από 0% έως 60%, με μέση κλίση 14%. Με βάση το σύστημα της Διεθνούς Γεωγραφικής Εταιρίας (International Geographical Union/IGU), προκύπτει ότι στην υπό μελέτη υδρολογική λεκάνη κατά κύριο λόγο επικρατεί το ελαφρώς και ισχυρώς κεκλιμένο ανάγλυφο (29% έκαστο), καθώς και το επίπεδο έως ελαφρώς κεκλιμένο ανάγλυφο (23%), ενώ δεν συναντάται κάθετο ανάγλυφο (Σχήμα 2.4).

<sup>1</sup> Σύμφωνα με το σύστημα του Dikau (1989), το μορφολογικό ανάγλυφο διαχωρίζεται σε:

- i. Πεδινό (περιοχές με υψόμετρο <150 m)
- ii. Λοφώδες (περιοχές με υψόμετρο 150 m 600 m)
- iii. Ημιορεινό (περιοχές με υψόμετρο 600 m 900 m)
- iv. Ορεινό (περιοχές με υψόμετρο >900 m)

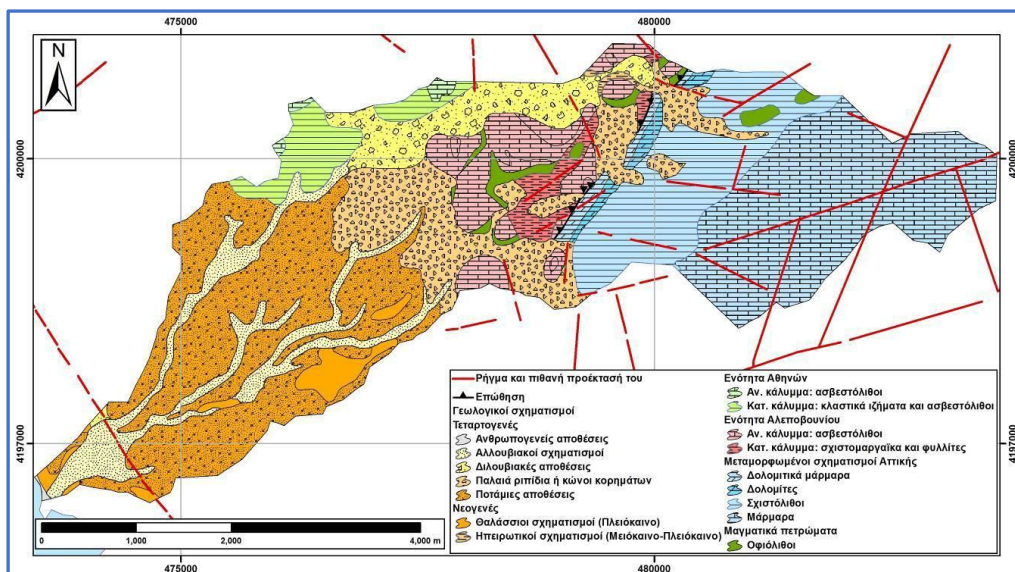




Σχήμα 2.4: Χάρτης κλίσεων εδάφους (Εκτίμηση κινδύνων σεισμού, πυρκαγιάς & πλημμύρας στην Περιφέρεια Αττικής – Α΄ Μέρος, Ε.Α.Α., 10/2021).

### 2.1.3 Γεωλογικό και υδρογεωλογικό καθεστώς λεκάνης

Γεωλογικά, η υδρολογική λεκάνη του ρέματος Πικροδάφνη δομείται από μεταλικούς και αλπικούς σχηματισμούς της ενότητας Αθηνών, της ενότητας Αλεποβουνίου και του μεταμορφωμένου αυτόχθονου της Αττικής (ΙΓΜΕ 1986, 1992, Ι.Θ.Β.Π. & Ε.Υ. - ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε, 2014). Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής.



Σχήμα 2.5: Γεωλογικός χάρτης Πικροδάφνης (Ι.Θ.Β.Π. & Ε.Υ. - ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε, 2014).

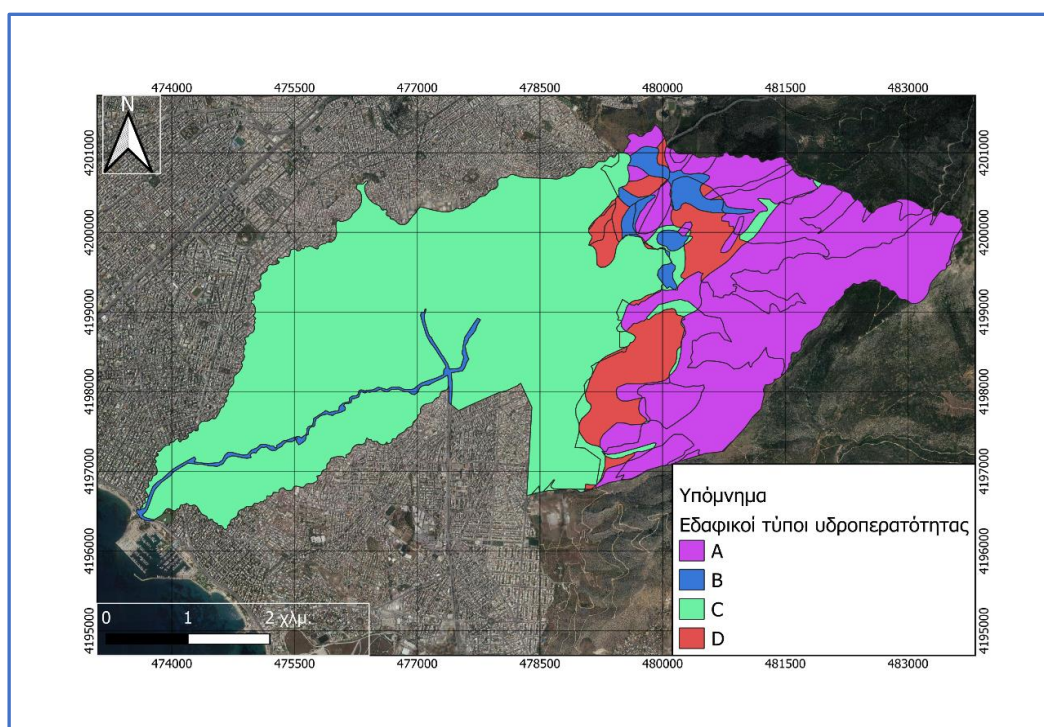
Οι μεταλικοί σχηματισμοί περιλαμβάνουν το τεταρτογενές, δηλαδή ανθρωπογενείς αποθέσεις, αλλουβιακούς σχηματισμούς (Ολόκαινο), δилουβιακές αποθέσεις (αν. Πλειστόκαινο), παλαιά ριπίδια ή κώνους κορημάτων (αν. Πλειστόκαινο), ποτάμιες αποθέσεις (Πλειστόκαινο) και το νεογενές, δηλαδή θαλάσσιους νεογενείς σχηματισμούς (Πλειόκαινο) και

ηπειρωτικούς νεογενείς σχηματισμούς (αν. Μειόκαινο - κατ. Πλειόκαινο). Οι αλπικοί σχηματισμοί της λεκάνης χωρίζονται στο τμήμα της ενότητας Αθηνών (αν. κάλυμμα: ασβεστόλιθοι, κατ. κάλυμμα: κλαστικά ιζήματα και ασβεστόλιθοι) και ενότητας Αλεποβουνίου (Αν. κάλυμμα: ασβεστόλιθοι, κατ. κάλυμμα: σχιστομαργαϊκά και φυλλίτες), της μεταμορφωμένης ενότητας Υμητού (μάρμαρα, δολομίτες και δολομιτικά μάρμαρα, σχιστόλιθοι) και στα μαγματικά πετρώματα (οφιόλιθοι).

Με βάση την υδρογεωλογική τους συμπεριφορά, οι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής διακρίνονται σε:

- χαμηλής περατότητας: αργιλομιγείς τεταρτογενείς και νεογενείς αποθέσεις, φυλλίτες και σχιστόλιθοι του αλπικού υπόβαθρου
- μέσης περατότητας: τεταρτογενείς και νεογενείς αποθέσεις στις αδρομερείς φάσεις τους και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι
- υψηλής περατότητας: δευτερογενούς περατότητας ανθρακικοί σχηματισμοί του αλπικού υπόβαθρου που περιλαμβάνουν τους ασβεστόλιθους και τα μάρμαρα καθώς και οι ψαμμιτικοί σχηματισμοί.

Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται ο υδρογεωλογικός χάρτης της υδρολογικής λεκάνης του ρέματος Πικροδάφνης με δεδομένα που έχουν εξαχθεί από το Εθνικό Αστεροσκοπείο (Ι.Α.Α.Δ.Ε.Τ.-BEYOND).



Σχήμα 2.6: Υδρογεωλογικός χάρτης Πικροδάφνης (Ι.Θ.Β.Π. & Ε.Υ. - ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε, 2014).

#### 2.1.4 Μετεωρολογικά δεδομένα

Δύο στοιχεία που δρουν καθοριστικά στη διαμόρφωση του κλίματος της υδρολογικής λεκάνης του ρέματος της Πικροδάφνης αποτελούν η θάλασσα του Σαρωνικού νοτιοδυτικά, καθώς και ο ορεινός όγκος του Υμηττού ανατολικά. Σύμφωνα με τη τελευταία εγκεκριμένη μελέτη του Ινστιτούτο Θαλάσσιων Βιολογικών Πόρων και Εσωτερικών Υδάτων (Ι.Θ.Β.Π. & Ε.Υ.-ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε, 2014), λήφθηκαν δεδομένα από τον μετεωρολογικό σταθμό του Ελληνικού, που βρίσκεται σε μικρή απόσταση νότια του ρέματος για τις περιόδους 1973-1974 και 2000-2011, για την οποία υπάρχουν συνεχείς μετρήσεις.

Με βάση την κατάταξη Κορρεν, στην περιοχή αυτή επικρατεί το μεσογειακό κλίμα, δηλαδή ήπιοι και υγροί χειμώνες και ήπια και ξηρά καλοκαίρια. Η μέση μηνιαία θερμοκρασία παρουσιάζει μια φάση υψηλών τιμών από Μάιο μέχρι Οκτώβριο και μια φάση χαμηλών τιμών από Νοέμβριο μέχρι Απρίλιο, με τις υψηλότερες θερμοκρασίες να σημειώνονται τον Ιούλιο και τον Αύγουστο (32,6° και 32,5° αντίστοιχα) και τις χαμηλότερες τον Ιανουάριο – και τον Φεβρουάριο (6,5°). Παράλληλα, από το 1973-74 έως σήμερα σημειώνεται διαχρονικά μία μικρή σταδιακή αύξηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας.

Το μέγιστο μέσο μηνιαίο ύψος βροχής σημειώνεται τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο (64,05 mm και 57,60 mm), ενώ το ελάχιστο τους μήνες Ιούνιο και Αύγουστο (6,26 mm και 4 mm). Ο μέγιστος μέσος μηνιαίος αριθμός ημερών βροχής παρατηρείται τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο (8.6 και 7.6 ημέρες) και ο ελάχιστος τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο (0.7 και 0.9 ημέρες). Όπως στη θερμοκρασία, στις τιμές της βροχόπτωσης παρατηρείται μια γενικότερη αυξητική τάση, με το ετήσιο ύψος βροχής για τη περίοδο 1973-2011 να είναι κατά μέσο όρο 373,10 mm. Το υψηλότερο ετήσιο ύψος βροχής παρατηρήθηκε κατά το υδρολογικό έτος 2002-03 (527,83 mm), ενώ το χαμηλότερο σημειώθηκε κατά το υδρολογικό έτος 1999-00 (166,89 mm). Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμη και στους θερινούς μήνες παρατηρούνται υψηλά μέγιστα ημερήσια ύψη βροχής, τα οποία οφείλονται σε καταιγίδες θερμικού τύπου, που συμβαίνουν αρκετά συχνά στο λεκανοπέδιο και γίνονται πρόξενοι θερινών τοπικών πλημμυρισμών.

Η μέση σχετική υγρασία στην περιοχή μελέτης παίρνει μέτριες τιμές, παρά την παρουσία της θάλασσας. Οι πιο υγροί μήνες είναι ο Νοέμβριος, Δεκέμβριος, Ιανουάριος (68,8%, 70,2% και 68,8%) και ο πιο ξηρός μήνας ο Ιούλιος με 46,9% σχετική υγρασία.

Στην περιοχή μελέτης επικρατούν πολύ ασθενείς άνεμοι, σε ποσοστό 34,3%, και σχεδόν άπνοια, σε ποσοστό 26,1%. Η κυρίαρχη διεύθυνση ανέμου είναι η βόρεια σε ποσοστό 16,5% και η δυτική βορειοδυτική σε ποσοστό 13,5%. Οι μήνες με τις μεγαλύτερες εντάσεις ανέμου είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος με 5,4 και 5,7 κόμβους αντίστοιχα. Ο μήνας με την μικρότερη ένταση ανέμου είναι ο Νοέμβριος και ο Μάρτιος (4,1 και 4,0 κόμβοι αντίστοιχα).

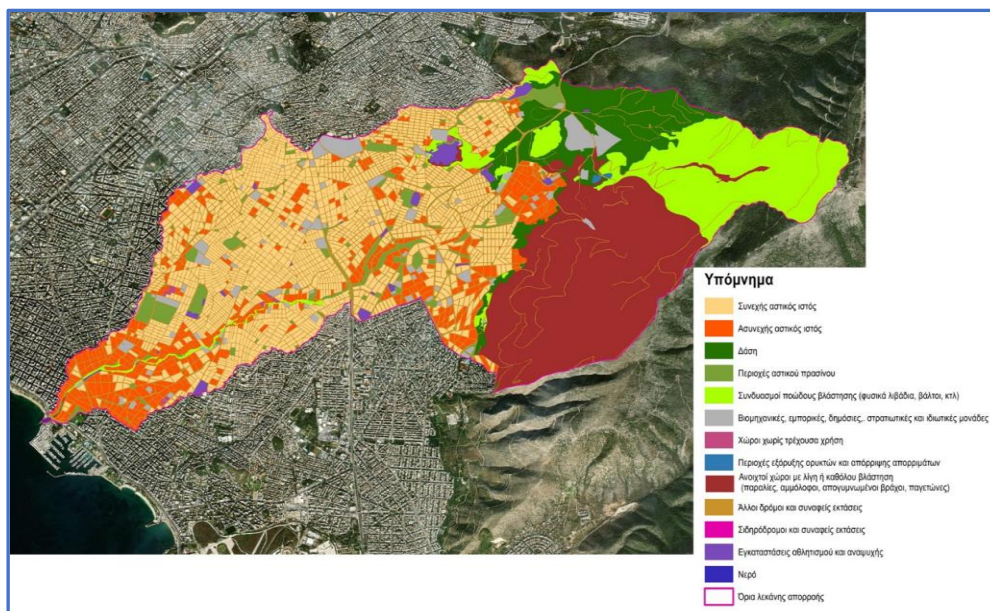


Τέλος, όσον αφορά το υδρολογικό ισοζύγιο από το σύνολο των βροχοπτώσεων στη διάρκεια του έτους, το μεγαλύτερο ποσοστό (70%) απορροφάται μέσω της εξατμισοδιαπνοής, το 14,4% κατεισδύει και εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς, ενώ μόλις το 15,6% απορρέει επιφανειακά.

### 2.1.5 Χρήσεις γης

Η λεκάνη απορροής του ρέματος Πικροδάφνης είναι μια τυπική αστική και περιαστική περιοχή με μικτή κάλυψη γης, που χαρακτηρίζεται από ένα μωσαϊκό διαφορετικών και ως ένα βαθμό αντικρουόμενων χρήσεων γης. Τα τελευταία 60 χρόνια η αυξημένη αστική δόμηση, ιδιαίτερα στους δήμους Αγ. Δημητρίου και Αλίμου, έχει διαμορφώσει ένα ιδιαίτερα πυκνό οικιστικό ιστό.

Χαρακτηριστικά, η αστική δόμηση καταλαμβάνει το 36,33% του συνόλου της έκτασης της υδρολογικής λεκάνης του ρέματος Πικροδάφνης (26,33% συνεχής αστική δόμηση και 10% ασυνεχής αστική δόμηση). Στο βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης κυριαρχούν περιοχές με πλώδη βλάστηση (12,93%) και δασικές εκτάσεις (7,44%). Νότια των παραπάνω εκτάσεων συναντώνται κυρίως μεταβατικές εκτάσεις δασών και θαμνότοπων (18,96%), που εκτιμάται ότι προήλθαν από την υποβάθμιση των δασών λόγω των επαναλαμβανόμενων πυρκαγιών. Σημαντικό ποσοστό καλύπτει και το οδικό δίκτυο (14,01%), ενώ οι βιομηχανικές και εμπορικές εγκαταστάσεις υπάρχουν σε ποσοστό 3,8% (Σχήμα 2.7) Παρά το γεγονός ότι το κεντρικό και νοτιοδυτικό τμήμα της υδρολογικής λεκάνης του ρέματος Πικροδάφνης χαρακτηρίζεται από την παρουσία πυκνού οικιστικού ιστού που υποβαθμίζει το φυσικό περιβάλλον, στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης και συγκεκριμένα στο όρος του Υμηττού υπάρχουν οι εξής προστατευόμενες περιοχές: οι Κορυφές του Υμηττού και η περιοχή Καισαριανής – Καρέα (CORINE A00060040), το Όρος Υμηττός (NATURA GR3000015) και ο βιότοπος Υμηττός - Αισθητικό δάσος Καισαριανής – Λίμνη Βουλιαγμένη (NATURA GR3000006).



Σχήμα 2.7: Χάρτης χρήσεων γης (Εκτίμηση κινδύνων σεισμού, πυρκαγιάς & πλημμύρας στην Περιφέρεια Αττικής – Α' Μέρος, Ε.Α.Α., 10/2021).

### 2.1.6 Δημογραφικά δεδομένα

Το ποσοστό αστικοποίησης της περιοχής έχει αυξηθεί ραγδαία από το 1950 και μετά. Η πληθυσμιακή αύξηση, που συνοδεύτηκε από την έντονη οικοδομική δραστηριότητα στους δήμους που αποτελούν τη λεκάνη απορροής του ρέματος Πικροδάφνης, εξηγείται από τη μαζική συρροή νέων κατοίκων μετά τη μετεμφυλιακή περίοδο, που εγκαταστάθηκαν στην εν λόγω περιοχή, καθώς αποτελούσαν μεγάλες αδόμητες εκτάσεις χαμηλής αξίας που ήταν κοντά στο κέντρο της Αθήνας.

Από τα στοιχεία των απογραφών, προκύπτει μεγάλη πληθυσμιακή αύξηση μεταξύ των ετών 1951-1961 στους δήμους Αγίου Δημητρίου (462%), Ηλιούπολης (343%) και Αλίμου (286%). Η αύξηση αυτή στους συγκεκριμένους δήμους συνεχίζεται με μεγάλα ποσοστά και την επόμενη δεκαετία (1961-1971), όπου παρατηρούνται αυξήσεις της τάξεως του 192% στο δήμο Αγίου Δημητρίου, 178% στο δήμο Ηλιούπολης και 321% στο δήμο Αλίμου. Πρόκειται για περίοδο κατά την οποία πολλές από τις εκτός σχεδίου εκτάσεις των δήμων αυτών εντάσσονται στο σχέδιο πόλης. Οι συγκεκριμένοι δήμοι, κατά την τελευταία εξηκονταετία (1951-2011) έχουν πολλαπλασιάσει αισθητά τον πληθυσμό τους. Οι σημερινοί δήμοι Αγίου Δημητρίου και Αλίμου έχουν σχεδόν 15πλάσιο πληθυσμό, ενώ ο δήμος Ηλιούπολης περίπου 10πλάσιο (Σέρεση, 2014). Η έντονη πληθυσμιακή εξέλιξη των δήμων μέχρι το 2001, ανακόπηκε στις «παλαιότερες γειτονιές» όπως είναι η Νέα Σμύρνη, η Ηλιούπολη και το Παλιό Φάληρο μάλλον λόγω κορεσμού. Αντίθετα, στους δήμους Αγ. Δημητρίου και Αλίμου παρατηρείται σημαντική πληθυσμιακή αύξηση μέχρι και το 2011, αφενός γιατί η περιοχή είχε σημαντικά περιθώρια για

δόμηση εμπορικής κατοικίας, αφετέρου γιατί η αξία της προσφερόμενης γης ήταν σημαντικά φτηνότερη (Αναγνωστόπουλος και ΣΙΑ Ε.Ε., 2018).

### 2.1.7 Υφιστάμενη κατάσταση του ρέματος Πικροδάφνης

#### ➤ Πλημμυρικός κίνδυνος

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει το λεκανοπέδιο Αττικής είναι αυτό των πλημμύρων. Σύμφωνα με την Προκαταρκτική Αξιολόγηση Κινδύνων Πλημμύρας, από τις πρώτες δεκαετίες του 20<sup>ου</sup> αιώνα μέχρι και το 2017 έχουν υπολογιστεί 153 ιστορικά πλημμυρικά γεγονότα, 54 εκ των οποίων χαρακτηρίστηκαν ως σημαντικά. Ειδικά την περίοδο 2001-2009, σημειώνεται το μεγαλύτερο πλήθος με 66 ιστορικά γεγονότα (Υ.ΠΕ.Κ.Α., 2018).

Το ρέμα της Πικροδάφνης όπως και τα περισσότερα ρέματα της Αττικής παρουσιάζει σημαντική υποβάθμιση και κίνδυνο πλημμύρας που οφείλεται σε γεωμορφολογικές και ανθρωπογενείς επεμβάσεις. Πλημμυρίζει κυρίως στο τμήμα κατάντη της γέφυρας Αμφιθέας μέχρι και την γέφυρα της παραλιακής, περίπου 300-400 μέτρα πριν την εκβολή του.

Η συνθήκη που συγκαταλέγει την υδρολογική λεκάνη της Πικροδάφνης στις περιοχές της Αττικής που χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό επικινδυνότητας εξηγείται από:

- τις μικρές κλίσεις εδάφους στο κατάντη τμήμα του ρέματος που δυσχεραίνουν την επιφανειακή απορροή.
- τη συνεχή αστικοποίηση, όπως προαναφέρθηκε και στο εδάφιο 2.16, με συνθήκες πυκνής δόμησης, μείωση των χώρων πρασίνου και επέκταση του αστικού ιστού μέχρι της παρυφής του Υμηττού.
- τον εγκιβωτισμό μεγάλου τμήματος του ρέματος στα ανάντη, πάνω από τη Λεωφ. Βουλιαγμένης. Για παράδειγμα, το βόρειο τμήμα του ρέματος στο δήμο Ηλιουπόλεως διευθετήθηκε χωρίς κάποια ομαλή φυσική συνέχεια με τον Υμηττό.
- τον μεγάλο αριθμό αποσπασματικών παρεμβάσεων τόσο στη κοίτη, όσο και στη διατομή του ρέματος χωρίς να υπάρχει μια συνολική αντιμετώπιση και μια ενιαία μελέτη. Χαρακτηριστικά, η κάλυψη και στερέωση των πρανών σε ορισμένα σημεία με συρματοκιβώτια ή η κατασκευή τοίχων αντιστήριξης οδηγούν σε επικίνδυνες στενώσεις της κοίτης (Σέρεση, 2014; Δημητρέλου, 2013).
- τη μη παροχετευτική επάρκεια του δικτύου ομβρίων και της απουσίας της συντήρησης τους (πρόβλημα με τον καθαρισμό των φρεατίων).
- την συγκέντρωση απορριμμάτων, αδρανών υλικών, μπάζων και αστικών λυμάτων στη κοίτη του ρέματος που εμποδίζουν την απρόσκοπτη επιφανειακή ροή σε περίπτωση μεγάλων βροχοπτώσεων (Δημητρέλου, 2013).



- τις συνεχείς επιχωματώσεις των πρανών και της καταστροφής της παρόχθιας ζώνης για την εξασφάλιση δομήσιμης γης που οδηγούν σε συρρίκνωση της κοίτης και διάβρωση των πρανών (Δημητρέλου, 2013).
- τον ελλιπή καθαρισμό του ρέματος (συσσώρευση κλαδιών, καλάμιών και σκουπιδιών σε πεζογέφυρες).
- τη μεσογειακή χαμηλή θαμνοειδούς τύπου βλάστηση στις ανατολικές ορεινές κλιτύες της λεκάνης και την μείωση των δασικών εκτάσεων, που συντελούν στη διαμόρφωση ταχέων ρυθμών απορροής της βροχόπτωσης.
- τις επαναλαμβανόμενες πυρκαγιές κατά τους θερινούς μήνες που αποψιλώνουν πλήρως τη βλάστηση στις ορεινές κλιτύες, καθιστώντας το έδαφος ευπαθές σε διάβρωση και επιτρέποντας πλέον την ανεμπόδιση κάθοδο εντός του αστικού ιστού μεγάλων ποσοτήτων νερού (Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων «Ανάπλαση ρέματος Πικροδάφνης από Λέω. Βουλιαγμένης έως εκβολή», 12/2010).
- την απουσία έργων εισόδου που επιτρέπουν την ομαλή αποχέτευση των όμβριων από τις ανάντη εξωτερικές υπολεκάνες προς τους κατάντη κλειστούς αγωγούς (Βακάλης, 2018).

Χαρακτηριστική ήταν η πλημμύρα που καταγράφηκε στις 22/02/2013 μία από τις πλέον έντονες και επικίνδυνες των τελευταίων ετών. Τα 90 mm βροχής που σημειώθηκαν σε διάστημα 5 ωρών στην ευρύτερη περιοχή του ρέματος, λαμβάνοντας υπόψη ότι σε μια τόσο αστικοποιημένη περιοχή σχεδόν το 80% του νερού της βροχής καταλήγει, μέσω του ρέματος, στη θάλασσα. Εξαιτίας αυτού, η στάθμη του ρέματος σε αρκετά σημεία ανυψώθηκε κατά 2,5 m (<http://geitoniamou.gr>, 04/2013).

Το ύψος και η ένταση της βροχής εκείνο το κρίσιμο διάστημα των 5 ωρών είχε περίοδο επαναφοράς δεκαετίας, ενώ, αντίθετα, στις μικρές διάρκειες η περίοδος επαναφοράς ήταν κάτω από 5 έτη. Η παροχή αιχμής στην εκβολή του ρέματος στο Σαρωνικό εκτιμήθηκε σε περίπου  $140 \text{ m}^3/\text{s}$  (Σέρεσλη, 2014).

Τα μεγαλύτερα προβλήματα δημιουργήθηκαν στο τμήμα του ρέματος κατάντη της Λεωφ. Αμφιθέας, μέχρι τη γέφυρα της παραλιακής (Λεωφ. Ποσειδώνος), 300 περίπου μέτρα πριν την εκβολή του στο Σαρωνικό κόλπο. Στη θέση της πεζογέφυρας Κορούζη, κατάντη της Λεωφ. Αμφιθέας, προκλήθηκε υπερχειλίση οφειλόμενη σε μεγάλο βαθμό στην ανάπτυξη καλάμιών ανάντη της γέφυρας και στη μεταφορά τους (Σχήμα 2.8), η οποία προκάλεσε σοβαρή μείωση της παροχητευτικότητας, έντονη τοπική διάβρωση, κατάρρευση πρανών και κατάρρευση ενός μεσόβαθρου στήριξης διάβασης αγωγών αμέσως κατάντη της γέφυρας (Μαμάσης κ.ά., 2013). Διάβρωση των πρανών διαπιστώθηκε σε λίγα σημεία, κυρίως στα τμήματα εκείνα που

εισέρχονταν κατ' ουσία στο ρέμα, είχαν μπαζωθεί και κτιστεί. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το γήπεδο μπάσκετ επί των οδών Φοινίκων και Θεμιστοκλέους, το οποίο υπέστη καθίζηση και δεν μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί (Σχήμα 2.9) .



Σχήμα 2.8: Η πεζογέφυρα Κορούζη μετά την υπερχειλίση ([www.notia.gr](http://www.notia.gr)).



Σχήμα 2.9: Καθίζηση γηπέδου μπάσκετ, μετά το πλημμυρικό επεισόδιο ([www.notia.gr](http://www.notia.gr)).

➤ Κίνδυνος πυρκαγιών

Ένα άλλο ζήτημα που αντιμετωπίζει η περιοχή και συγκεκριμένα το τμήμα του Υμηθού, είναι οι συχνές πυρκαγιές, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες.

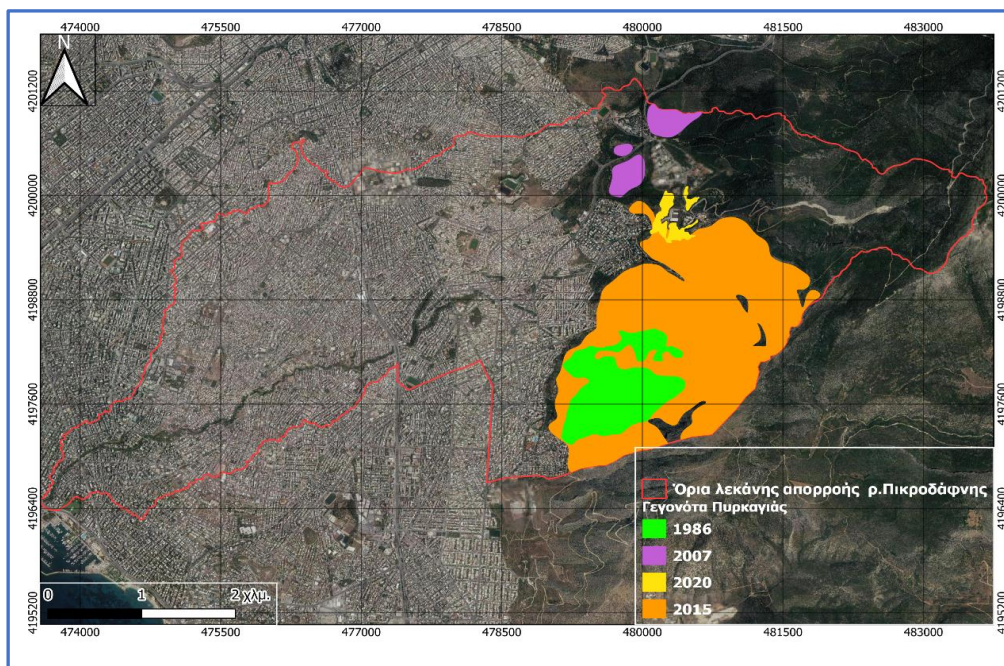
Γενικά, η Αττική είναι από τις περισσότερο πυρόπληκτες Περιφέρειες της χώρας. Σύμφωνα με στοιχεία από τη «Κατάρτιση του περιφερειακού σχεδίου για την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή Περιφέρειας Αττικής» (Περιφέρεια Αττικής, 2020), κάθε χρόνο κατά μέσο όρο συμβαίνουν 51 πυρκαγιές και καίγονται 43.767 στρέμματα δασικών εκτάσεων (στοιχεία 2007-2018 από European Forest Fire Information System). Από τα στοιχεία των αγροτοδασικών πυρκαγιών του Πυροσβεστικού Σώματος της Ελλάδος, του Υπουργείου Προστασίας του Πολίτη, για την περίοδο 2005-2014 στην ευρύτερη περιοχή της ζώνης (το σύνολο του Λεκανοπέδιου Αττικής) έχουν καταγραφεί 291 πυρκαγιές, ενώ η συνολική καμένη έκταση ανέρχεται σε 22,67km<sup>2</sup>. Από τις καταγεγραμμένες πυρκαγιές το μεγαλύτερο ποσοστό καταλαμβάνουν τα δάση (35,07%, 7,95 km<sup>2</sup>) και ακολουθούν οι δασικές εκτάσεις (33,67%, 7,63 km<sup>2</sup>), οι χορτολιβαδικές εκτάσεις (21,08%, 4,78 km<sup>2</sup>) και οι γεωργικές εκτάσεις (9,02%, 2,04 km<sup>2</sup>) (Υ.Π.Ε.Κ.Α., 2018).

Η βλάστηση, σε συνδυασμό με την ανεπαρκή αντιπυρική κουλτούρα, την αστικοποίηση και την αύξηση της αξίας των ανεκμετάλλετων εκτάσεων του ανατολικού τμήματος της λεκάνης μπορούν να εξηγήσουν τη παραπάνω συνθήκη. Συγκεκριμένα, η φυτική κάλυψη της περιοχής είναι οι αειθαλείς πλατύφυλλοι σκληρόφυλλοι και τα αειθαλή κωνοφόρα που είναι βλάστηση ιδιαίτερα εύφλεκτη και επιρρεπής σε δασικές πυρκαγιές. Παρά τη γρήγορη επαναφορά βλάστησης γι' αυτά τα είδη, η εμφάνιση συχνών πυρκαγιών σ' ένα δασικό σύμπλεγμα οδηγεί αναπόφευκτα σε αναστολή των μηχανισμών επιβίωσης και συχνά σε μείωση της παραγωγικής ικανότητας (Αλωνιστιώτη, 2011). Σύμφωνα με στοιχεία της Ένωσης Τοπικής Αυτοδιοίκησης Περιφέρειας Αττικής, από το 1999 έως το 2009 καταγράφηκαν 49 πυρκαγιές στους Δήμους που περιβάλλουν την περιοχή μελέτης, οι περισσότερες από τις οποίες έπληξαν τους Δήμους Βύρωνα (14 γεγονότα) και Ηλιούπολης (12 γεγονότα) (geodata.gov.gr) .

Στο σχήμα 2.10 φαίνονται οι πυρκαγιές που έχουν συμβεί στην ευρύτερη περιοχή κατά το διάστημα 1985-2020 (I.A.A.Δ.Ε.Τ.- BEYOND) και καλύπτουν το 19,81% της λεκάνης απορροής της Πικροδάφνης. Ενδεικτικό είναι ότι όλες φτάνουν αρκετά κοντά στον αστικό ιστό. Η μεγαλύτερη συνέβη τον Ιούλιο του 2015 και έκαψε συνολική έκταση 4,85 km<sup>2</sup> , ξεκινώντας από το νεκροταφείο του Βύρωνα και φτάνοντας μέχρι και τον Καρέα, Ηλιούπολη. Μία πιο μικρή έκταση στην ίδια περιοχή, συγκεκριμένα στο Πανόραμα είχε καεί ξανά το 1986. Οι πυρκαγιές του 2007 και του 2020 αν και μικρής έκτασης, η μεν πρώτη έφτασε αρκετά κοντά



στη λεωφόρο της Κατεχάκης, ενώ η δεύτερη κοντά σε σπίτια και στο Σκοπευτήριο ([www.in.gr](http://www.in.gr), [www.news247.gr](http://www.news247.gr)).



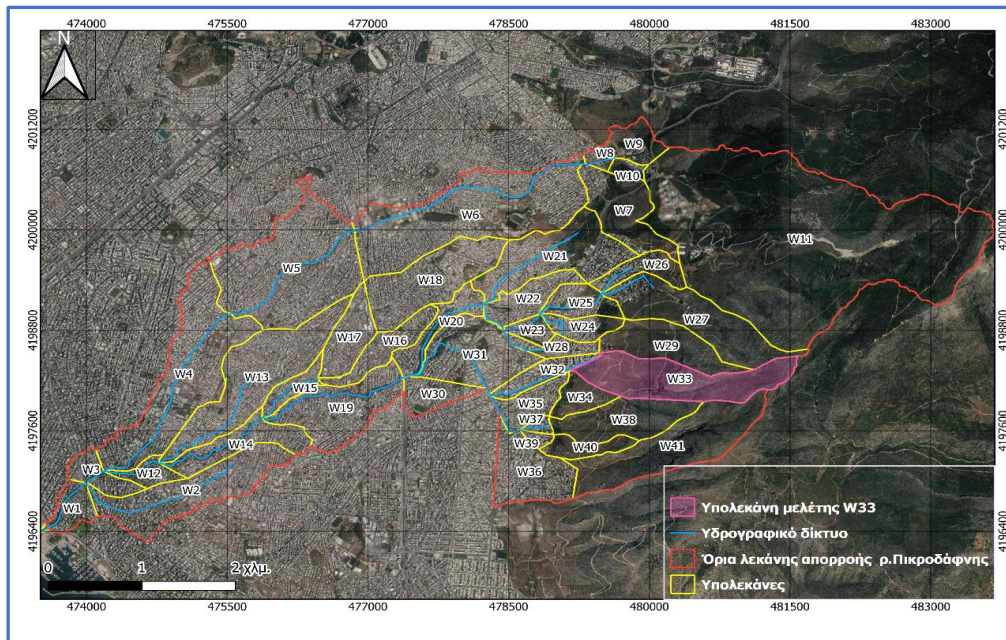
Σχήμα 2.10: Χάρτης πυρκαγιών στη λεκάνη κατά το διάστημα 1985- 2020.

Από υδρολογική σκοπιά λοιπόν, συνδυάζοντας όλες τις παραπάνω συνθήκες που περιγράφηκαν, οι αντικρουόμενες γειτονικές καλύψεις γης της περιοχής, δηλαδή από τη μία οι ανάντη, δασικές και θαμνώδεις εκτάσεις και από την άλλη οι κατάντη, χαμηλής κλίσεως, αστικές ζώνες, καθιστούν τις κατάντη, αστικοποιημένες περιοχές ιδιαίτερα επιρρεπείς σε πλημμύρες, ειδικά μετά από πυρκαγιές. Υπογραμμίζεται έτσι, η σημασία της διαχείρισης τόσο των πλημμυρών όσο και των πυρκαγιών με συνδυασμένο και ολοκληρωμένο τρόπο.

## 2.2 Περιοχή εφαρμογής μελέτης

### 2.2.1 Γενικά

Για την εφαρμογή μελέτης επιλέχθηκε η υπολεκάνη W33 από το σύνολο των 42 υπολεκάνων της Πικροδάφνης. Ως σημείωση, να αναφερθεί πως οι υπολεκάνες χωρίστηκαν έτσι με κριτήριο την ανάπτυξη του δικτύου όμβριων υδάτων για τον καθορισμό του πλημμυρικού κινδύνου στο ρέμα της Πικροδάφνης, στα πλαίσια της Προγραμματικής σύμβασης της Περιφέρειας Αττικής με τίτλο «Εκτίμηση κινδύνων σεισμού, πυρκαγιάς και πλημμύρας στην περιφέρεια Αττικής» (2021). Το μεγαλύτερο ποσοστό της περιοχής υπάγεται στο δήμο Ηλιούπολης και μόνο ένα μικρό βορειοδυτικά στο δήμο Βύρωνα.



Σχήμα 2.11: Περιοχή μελέτης σε σχέση με το σύνολο των υπολεκάνων του ρέματος Πικροδάφνης.

Πρόκειται για κατηφορική υπολεκάνη, στις πτυχώσεις του ορεινού όγκου του Υμηττού, που το σημείο εισόδου της ξεκινάει δυτικά από την κορυφογραμμή του και το σημείο εξόδου βρίσκεται ανατολικά στην αρχή του αστικού ιστού του δήμου Ηλιούπολης. Εκεί ξεκινάει ο υπόγειος αγωγός Σ2, υπάρχει φράγμα εισόδου, ενώ εδράζεται και η εθελοντική ομάδα Δασοπροστασίας Πυρόσβεσης Ηλιούπολης. Βόρεια της βρίσκεται η περιοχή του Καρέα και το Δημοτικό Κοιμητήριο της Ηλιούπολης, ενώ νότια η περιοχή του Πανοράματος. Εντός της λεκάνης, στο νότιο τμήμα βρίσκεται ένα από τα πολλά σπήλαια του Υμηττού το σπήλαιο Μπιμπέση, συχνός προορισμός για περιπατητικές διαδρομές. Κοντά στην έξοδο της λεκάνης υπάρχουν άλλα δύο φράγματα.

## 2.2.2 Παράγοντες καθορισμού περιοχής μελέτης

- Ελλιπής αντιπλημμυρική λειτουργία του υπάρχοντος δικτύου ομβρίων

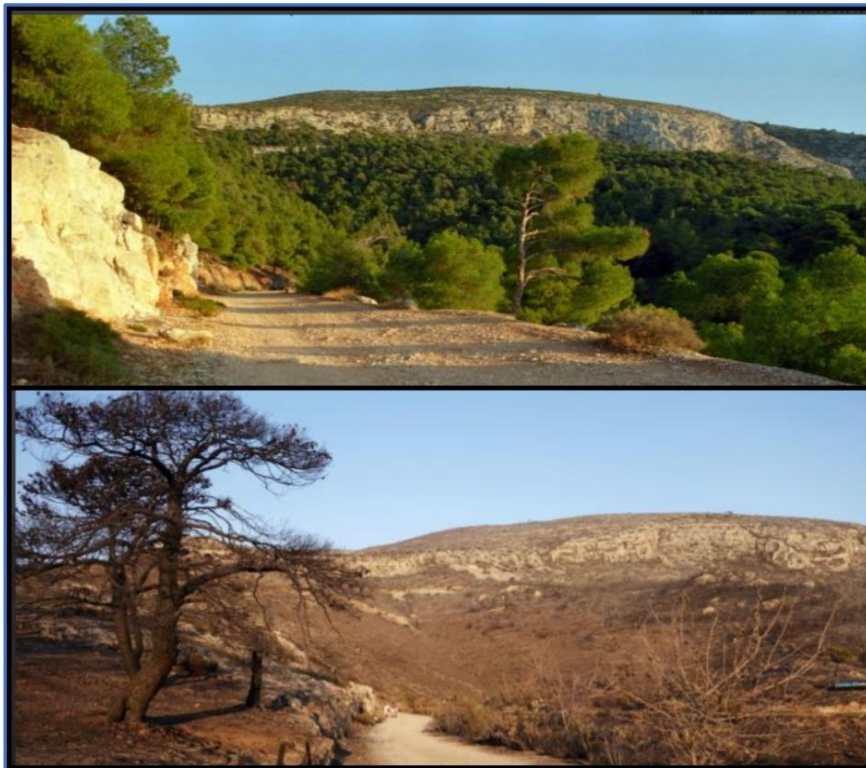
Τα όμβρια ύδατα, που καταλήγουν στην έξοδο της υπολεκάνης, καταλήγουν στο υπόγειο αγωγό Σ2 (βλ. σχήμα 2.2). Ο αγωγός αυτός κατασκευάστηκε τελικά το 2017, μαζί με τον αγωγό Σ3, από την Περιφέρεια Αττικής στα πλαίσια της «Αντιπλημμυρικής προστασίας των περιοχών της Αττικής που επλήγησαν από τις πυρκαγιές του Ιουλίου-Αυγούστου 1998», προκειμένου να ανακόψουν υψηλές ροές φερτών υλών υψηλές ροές φερτών υλών και την απότομη απορροή φερτών υλών (Βακάλης, 2019). Ωστόσο, δεν υλοποιήθηκαν τα προβλεπόμενα έργα εισόδου εντός του ορεινού όγκου, με αποτέλεσμα μόνο μέρος των ομβρίων να καταλήγει εντός των υλοποιημένων εσχάρων. Παρόμοια, ο αγωγός Σ1 δεν δέχεται το σύνολο των ομβρίων της περιοχής του Καρέα, με αποτέλεσμα το νερό να εκτρέπεται και να δημιουργείται νέα επιφανειακή ροή, γι' αυτό και βρίσκεται υπό κατασκευή ένας νέος κλάδος (Βακάλης, 2018).



Όσο για τα φράγματα τις υπολεκάνης μελέτης, από στοιχεία του δήμου δεν έχουν καθαριστεί εδώ και τρία χρόνια και είναι πλήρως φραγμένα. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι τα συχνά τοπικά πλημμυρικά φαινόμενα. Χαρακτηριστικά κατά τη περίοδο 2006-2018, στο Δήμο Ηλιούπολης καταγράφηκαν 46 πλημμυρικά συμβάντα, 6 εκ των οποίων κοντά στη περιοχή μελέτης και σε χρονικό διάστημα μέχρι κ ένα χρόνο μετά τη πυρκαγιά του 2015( I.A.A.Δ.Ε.Τ.-BEYOND).

➤ Οι επαναλαμβανόμενες πυρκαγιές στον Υμηττό

Οι πυρκαγιές του Υμηττού τα τελευταία χρόνια (1986, 1998, 2007, 2015, 2020) αποψίλωσαν την βλάστηση του βουνού, επιτρέποντας πλέον ανεμπόδιστα την κάθοδο μεγάλων ποσοτήτων νερού εντός του αστικού ιστού (Σχήμα 2.12). Η αρκετά εύφλεκτη θαμνοειδής φυτοκάλυψη της ευρύτερης περιοχής, καίγεται ολοσχερώς, με αποτέλεσμα κατά τις πρώτες καταιγίδες μετά τη φωτιά να παρατηρείται αυξημένη διάβρωση και μεταφορά φερτών υλών που φράζουν τους υπόγειους αγωγούς. Συνεπακόλουθα, οι εσχάρες υπερχειλίζουν και στους δρόμους παράτηρείται ανεξέλεκτη ροή. Ως το 1970 το 70% της περιοχής ήταν δασοσκεπής. Με στοιχεία του υπουργείου Γεωργίας, από το 1980 ως το 1993 στη δυτική πλευρά του Υμηττού εκδηλώθηκαν 24 πυρκαγιές και αφανίστηκαν 10.000 στρέμματα δάσους (www.dasarxeio.com).



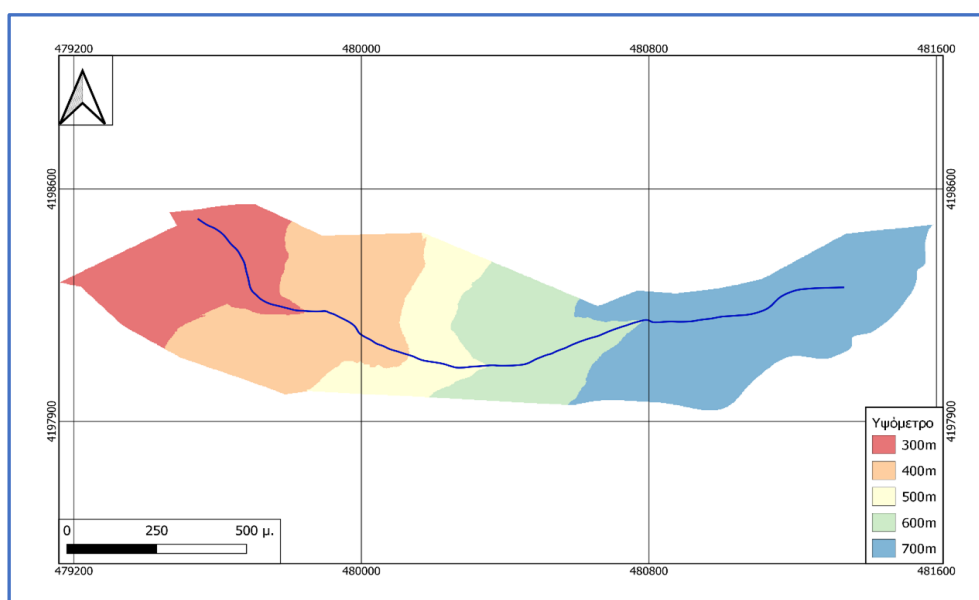
Σχήμα 2.12: Η περιοχή του Καρέα πριν και μετά τη πυρκαγιά του 2015 (www.dasarxeio.com).

➤ Απότομη αλλαγή κάλυψης γης από τα ανάντη προς τα κατόντη.

Η ανεκμετάλλευτη, φυσική έκταση ανάντη και ο αστικός ιστός κατάντη, συνδυαστικά με την κατηφορική κλίση της πλαγιάς, δυσχεραίνουν την ομαλή επιφανειακή ροή των ομβρίων, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε τοπικά πλημμυρικά συμβάντα, ειδικά κατά τους πρώτους μεταπυρικούς μήνες.

### 2.2.3 Δεδομένα περιοχής μελέτης

Η υπολεκάνη μελέτης έχει συνολική έκταση 4,85 km<sup>2</sup>. Το υψόμετρο της λεκάνης απορροής κυμαίνεται από 195,7 έως 783,5 m, με μέση τιμή τα 517 m. Το μορφολογικό της ανάγλυφο χαρακτηρίζεται λοφώδες. Το συνολικό μήκος της μισγάγκειας είναι 2,13 km με διεύθυνση ροής από τα βορειοανατολικά στα βορειοδυτικά (Σχήμα 2.13).

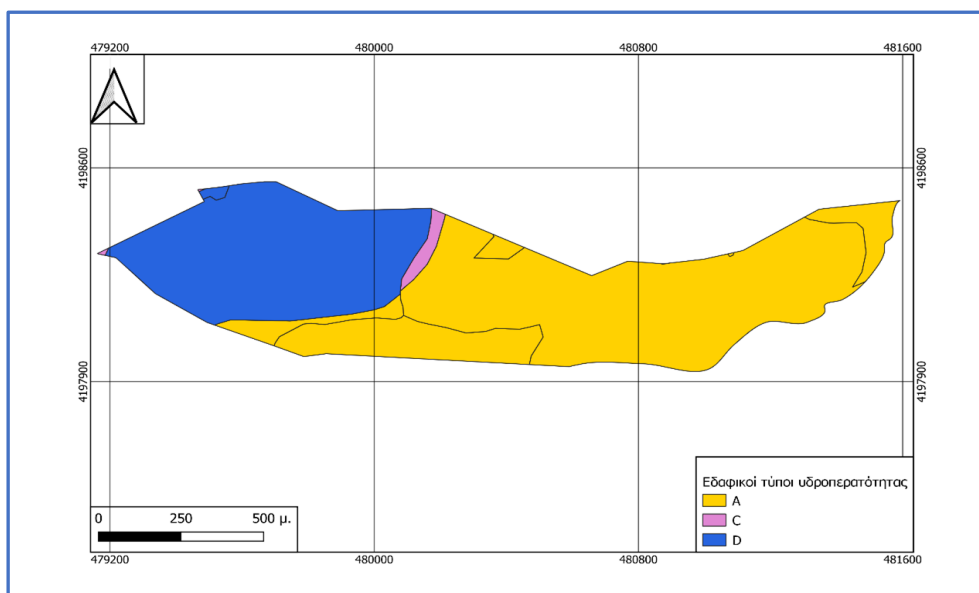


Σχήμα 2.13: Χάρτης ψηφιακού μοντέλου εδάφους και μισγάγκειας της υπολεκάνης μελέτης.

Από το Εθνικό Αστεροσκοπείο δόθηκαν τα εξής δεδομένα για τη λεκάνη απορροής του ρέματος Πικροδάφνης: χάρτες χρήσεων γης (CORINE 2017), υδροπερατότητας, συντελεστή απορροής, κάμενης έκτασης της πυρκαγιάς όπως και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Ακολούθησε μερική επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων, σε περιβάλλον QGIS, για την απομόνωση της περιοχής ενδιαφέροντος μας και για την αξιοποίηση των χαρτών που προκύπτουν στην εφαρμογή μελέτης.

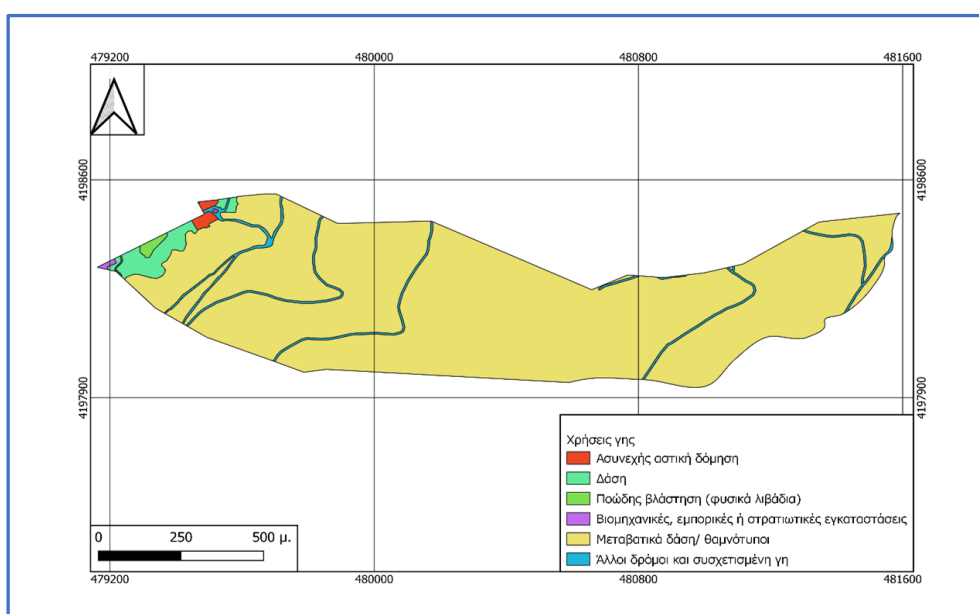
Όσον αφορά την υδροπερατότητα, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση των υδρολογικών τύπων της NRCS, διακρίνονται τέσσερις εδαφικοί τύποι: A, B, C και D που αντιστοιχούν σε υψηλή, μέτρια, μικρή και πολύ μικρή διηθητικότητα και περατότητα αντίστοιχα. Στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής και προς τα ανατολικά υπάρχει έδαφος τύπου A, δηλαδή ιδιαίτερα περατό (63,32%), σε αντίθεση με το δυτικό τμήμα της περιοχής, όπου υπάρχει

έδαφος τύπου D (35,48%). Στο κέντρο της υπολεκάνης υπάρχει ένα μικρό τμήμα με έδαφος τύπου C (1,20%) (Σχήμα 2.14).



Σχήμα 2.14: Χάρτης υδροπερατότητας υπολεκάνης μελέτης.

Σύμφωνα με το χάρτη χρήσεων γης, κυριαρχούν οι θαμνώδεις εκτάσεις, εκτάσεις με αραιή βλάστηση σχεδόν σε όλη την έκταση (96,8%), εκτός από ένα τμήμα στα δυτικά που καλύπτεται από δασικές εκτάσεις (2,9%). Η αστική δόμηση καταλαμβάνει μόνο το 0,3% της υπολεκάνης κοντά στο σημείο εξόδου της (Σχήμα 2.15).

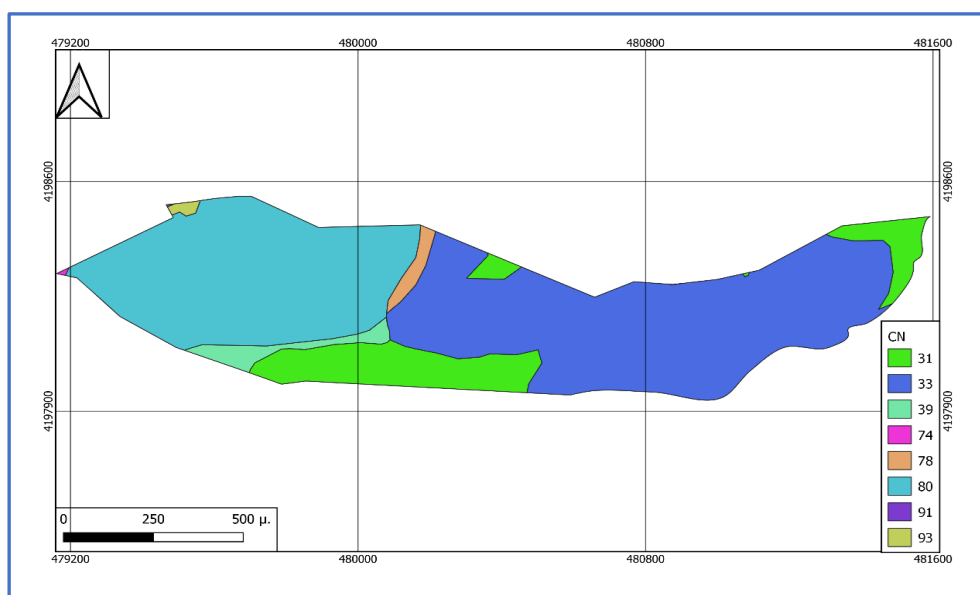


Σχήμα 2.15: Χάρτης χρήσεων γης υπολεκάνης μελέτης.

Σύμφωνα με τους χάρτες του συντελεστή απορροφής της υπολεκάνης, οι τιμές κυμαίνονται από 31%, στο δυτικό τμήμα υψηλής υδροπερατότητας, ως 93%, στις αστικές χρήσεις που είναι σχεδόν αδιαπέρατες. Έτσι, το ανατολικό τμήμα κοντά στην έξοδο της λεκάνης έχει υψηλή



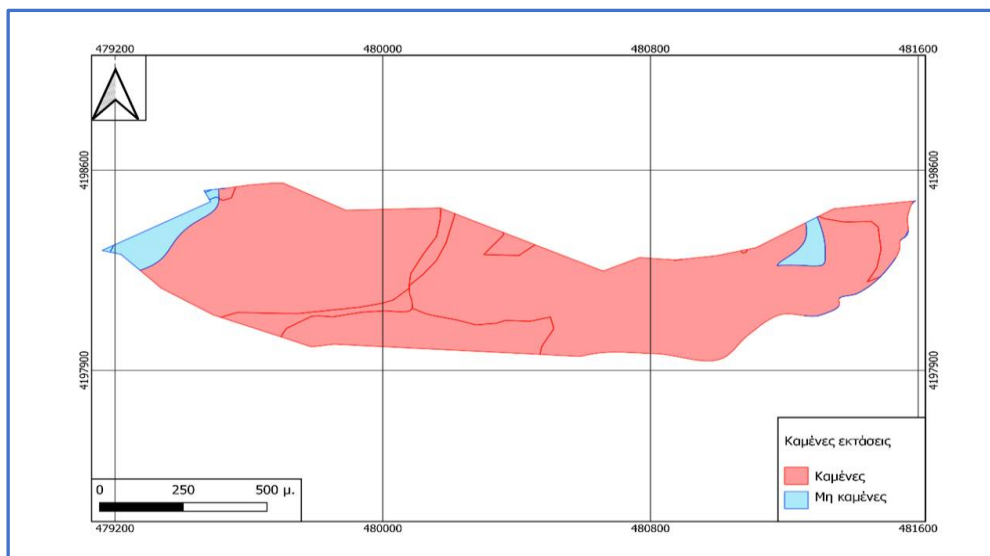
απορροή με τις τιμές να κυμαίνονται από 78% έως 93%, ενώ το δυτικό τμήμα χαμηλή με τιμές μεταξύ 31 και 39 (Σχήμα 2.16).



Σχήμα 2.16: Χάρτης συντελεστών απορροής CN υπολεκάνης μελέτης.

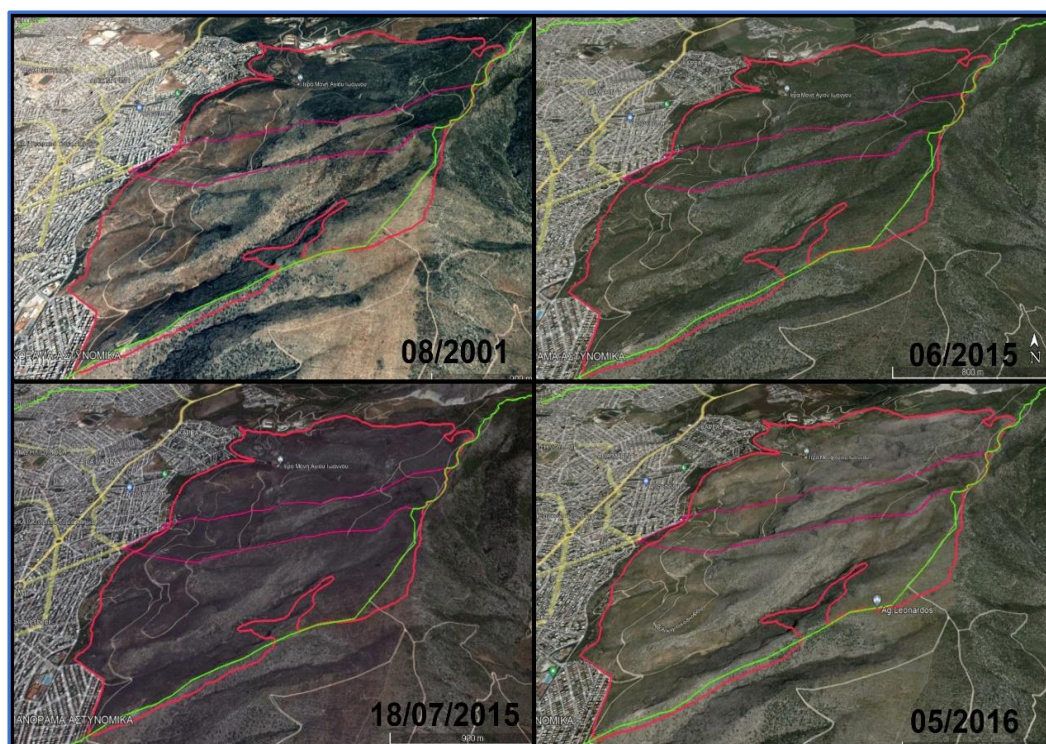
#### Πυρκαγιά 2015

Η πυρκαγιά που λαμβάνεται υπόψιν στην συγκεκριμένη μελέτη είναι αυτή που συνέβη στις 18/07/2015 (βλ. εδάφιο 2.1.7), συνολικής καμένης έκτασης 4,85 km<sup>2</sup>. Η φωτιά κατέκαψε σημαντική έκταση στους ορεινούς όγκους του Υμηττού, φτάνοντας δίπλα από την οικιστική ζώνη. Λόγω των ισχυρών ανέμων (7-8 κόμβων), πήρε διαστάσεις, δημιουργώντας ένα πύρινο μέτωπο χιλιομέτρων, που κάλυψε τον Καρέα, τον Βύρωνα, την Ηλιούπολη, την Αργυρούπολη καταλήγοντας στην Τερψιθέα της Γλυφάδας ([www.attikonima.gr](http://www.attikonima.gr)). Σε σχέση με το σύνολο της λεκάνης του ρέματος Πικροδάφνης, κάηκε το μεγαλύτερο μέρος των ορεινών όγκων του Υμηττού (20,1%), ενώ η υπολεκάνη μελέτης κάηκε σχεδόν ολόκληρη (96%). Το σύνολο της καμένης έκτασης κατά κύριο λόγο ήταν θαμνώδεις εκτάσεις (95,4%) και κάηκε ένα μικρό τμήμα αστικής χρήσεως στην έξοδο της λεκάνης (0,6%) (Σχήμα 2.17).

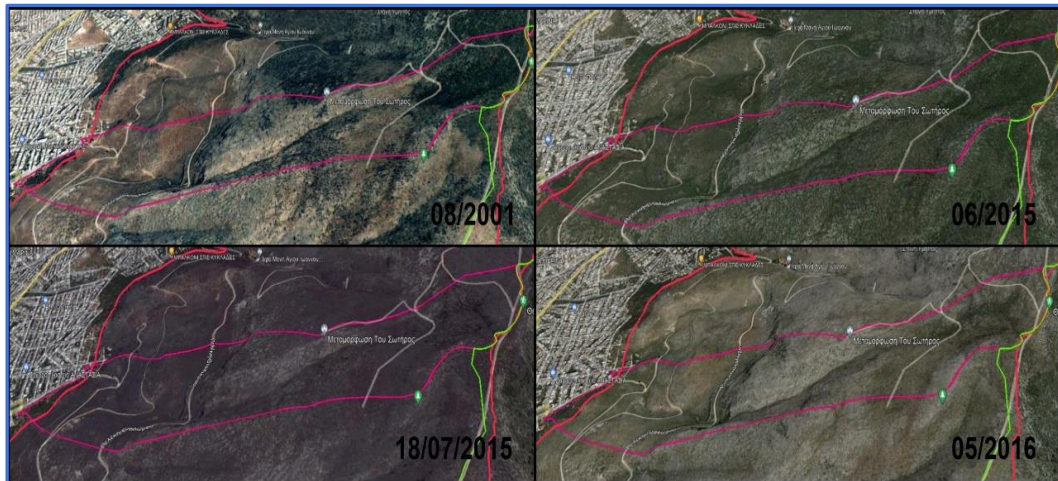


Σχήμα 2.17: Χάρτης καμένων εκτάσεων της υπολεκάνης μελέτης (πυρκαγιά 07/2015).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι επαναλαμβανόμενες πυρκαγιές στη δυτική πλευρά του Υμηττού τις τελευταίες τρεις δεκαετίες έχουν μειώσει κατά πολύ τη βλάστηση της περιοχής και τους ρυθμούς ανάπλασης της. Το 2001 υπήρχαν ακόμη εκτάσεις πρασίνου κοντά στις κορυφογραμμές του Υμηττού, ενώ η περιοχή του Καρέα ήταν σχετικά δασοσκεπής, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.18. Η πυρκαγιά του 2015 ήταν καθοριστική, καθώς απογύμνωσε τις παρυφές του όρους δίπλα από την Ηλιούπολη και την περιοχή του Καρέα (Σχήμα 2.18, 2.19).

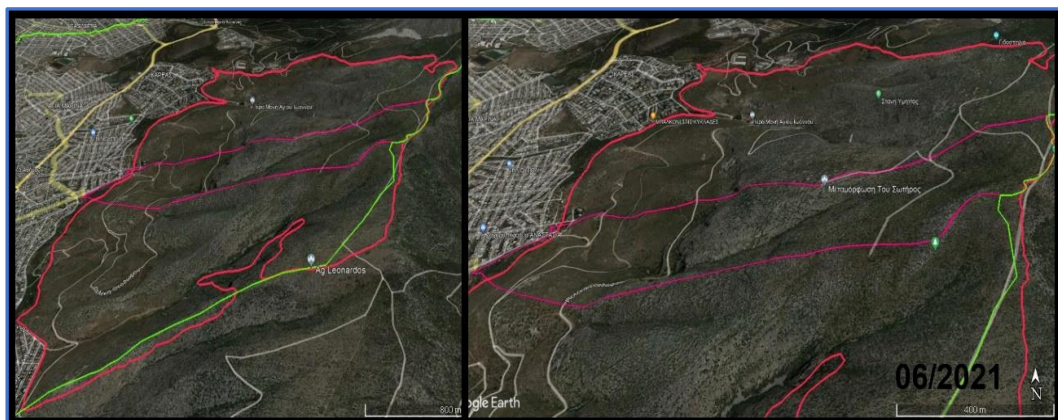


Σχήμα 2.18: Η καμένη έκταση της πυρκαγιάς στις 17/08/2015 σε χρονικά διαστήματα από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω. Η κάτω αριστερά δείχνει την καμένη έκταση μία μέρα μετά τη πυρκαγιά (Google earth).



Σχήμα 2.19: Η υπολεκάνη μελέτης σε χρονικά διαστήματα από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω. Η κάτω αριστερά εικόνα δείχνει την υπολεκάνη μία μέρα μετά τη πυρκαγιά (Google earth).

Ακόμα και 6 χρόνια μετά (06/2021), δεν υπάρχει ανάλογη επαναφορά της βλάστησης (Σχήμα 2.20) .



Σχήμα 2.20: Υφιστάμενη κατάσταση καμένης περιοχής από τη πυρκαγιά του 2015 (Google Earth).



## 3 Μεθοδολογικό Υπόβαθρο

### 3.1 Ορθολογική Μέθοδος

#### 3.1.1 Εισαγωγικά

Για τον υπολογισμό της πλημμυρικής παροχής εφαρμόζονται διάφορες μεθοδολογίες όπως εμπειρικοί τύποι, η ορθολογική μέθοδος, υδραυλικά και υδρολογικά προσομοιώματα διόδευσης πλημμύρων. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από τα συμπεράσματα που απαιτείται να εξαχθούν από την εκάστοτε έρευνα. Οι εμπειρικές μέθοδοι βασίζονται σε συσχετισμούς της παροχής με μια σειρά από παραμέτρους που έχουν επίδραση σε αυτή. Μερικές απ' αυτούς τους τύπους είναι οι εξής: τύπος του Kreps, τύποι του Fuller, τύπος των Klement-Wunderlich, Τύπος του Wundt.

Οι εμπειρικές μέθοδοι σταμάτησαν να εφαρμόζονται με την εμφάνιση της ορθολογικής μεθόδου, καθώς συνήθως δεν υφίστανται μετρήσεις της απορροής σε μια περιοχή για την περίοδο προ κατασκευής του δικτύου ή ακόμα και να υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα από μετρήσεις, δεν είναι αξιοποιήσιμα στο σχεδιασμό, διότι δεν είναι αντιπροσωπευτικά των μελλοντικών συνθηκών απορροής μετά την κατασκευή του δικτύου, δεδομένου ότι το δίκτυο μεταβάλλει τις συνθήκες ροής (Τσακίρης, 2010). Η ορθολογική μέθοδος είναι η πλέον διαδεδομένη και γιατί είναι απλή, αλλά και γιατί εξετάζει χωριστά την επίδραση, (α) της επιφάνειας που αποχετεύεται, η οποία προκύπτει από χάρτες, (β) της έντασης βροχής, που προκύπτει μετά από στατιστική ανάλυση βροχογραφικών δεδομένων στην περιοχή μελέτης, και κατάρτιση όμβριων καμπυλών και (γ) μιας σειράς άλλων τοπογραφικών, φυσιογραφικών και πολεοδομικών μεγεθών, που περιγράφονται από μια μοναδική παράμετρο, το συντελεστή απορροής. Είναι και η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί και σ' αυτή την εργασία και θα αναλυθεί παραπάνω στη συνέχεια (Κουτσογιάννης, 2011).

#### 3.1.2 Η εξίσωση $Q = C i A$

Η ορθολογική μέθοδος που έχει εισαχθεί το 1851 (Mulvaney), μετασχηματίζει τη βροχή σε απορροή με την απλή σχέση (Εξ. 3.1).

$$Q = C i A \quad \text{Εξ. 3.1}$$

Όπου,

$Q$ , η παροχή αιχμής της πλημμύρας ( $m^3/s$ )

$C$ , ο αδιάστατος συντελεστής απορροής

$i$ , η μέση (χρονικά και χωρικά) ένταση βροχής ( $mm/h$ ) και

A, η έκταση της λεκάνης απορροής ή της επιφάνειας που αποχετεύεται (km<sup>2</sup>).

### Παραδοχές

Προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος για την εκτίμηση παροχών σχεδιασμού, ακολουθούνται οι εξής παραδοχές :

- Η ένταση της βροχής σε όλη τη διάρκεια της είναι ομοιόμορφη, με ομοιόμορφη επίσης κατανομή πάνω στην υδρολογική λεκάνη. Η παραδοχή αυτή προσεγγίζεται στην πραγματικότητα, όταν οι υδρολογικές λεκάνες είναι μικρές.
- Για να φτάσει η πλημμυρική παροχή στην μέγιστη αιχμή το νερό πρέπει να φθάσει στην έξοδο της λεκάνης από όλα τα σημεία της, δηλαδή η διάρκεια της βροχής με την ομοιόμορφη ένταση πρέπει να είναι ίση με το χρόνο συγκέντρωσης,  $t_c$ , της λεκάνης απορροής. Αυτό υποδηλώνει ότι η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί για διάρκειες βροχής μικρότερες του  $t_c$ .

### 3.1.3 Όμβριες καμπύλες και υπολογισμός έντασης βροχής

Για την εφαρμογή της Ορθολογικής Μεθόδου, η ένταση της σταθερής βροχόπτωσης,  $i$ , λαμβάνεται από τις όμβριες καμπύλες της περιοχής μελέτης ή από διαγράμματα Έντασης-Διάρκειας Συχνότητας (Διάγραμμα ΕΔΣ), τα οποία περιέχουν την ίδια πληροφορία (Τσακίρης, 2010). Η κατάρτιση των καμπυλών αυτών είναι ουσιαστική προϋπόθεση για την ορθολογική εκτίμηση των παροχών όμβριων της περιοχής μελέτης.

Για την εκτίμηση των όμβριων καμπυλών ακολουθείται η πλέον σύγχρονη μεθοδολογία μελέτης των όμβριων καμπυλών ως στοχαστικών μοντέλων της έντασης βροχής (Koutsoyiannis, 2021). Χρησιμοποιώντας ορισμένες απλουστευτικές παραδοχές που είναι εύλογες σε μικρές χρονικές κλίμακες, της τάξης των λεπτών έως λίγων ημερών (Koutsoyiannis, 2021; Koutsoyiannis and Ilioroulou, 2021) προκύπτει ότι η γενική συναρτησιακή σχέση των όμβριων καμπυλών που προσδιορίζει την ένταση της βροχής  $x$  για χρονική κλίμακα  $k$  και περίοδο επαναφοράς  $T$  είναι η εξής (Εξ. 3.2):

$$x = \lambda \frac{(T/\beta)^\xi - 1}{(1 + k/\alpha)^\eta}, \quad \xi > 0 \quad \text{Εξ. 3.2}$$

Όπου,

$\lambda$ , παράμετρος κλίμακας με μονάδες έντασης βροχής, ίδιες με της  $x$  ( mm/h),

$\beta$ , παράμετρος χρονικής κλίμακας με μονάδες, ίδιες με της περιόδου επαναφοράς  $T$  (years),

$\alpha$ , παράμετρος χρονικής κλίμακας με μονάδες ίδιες με της χρονικής κλίμακας  $\eta$ , με  $\alpha \geq 0$ ,

$\eta$ , αδιάστατη παράμετρος, με  $0 < \eta < 1$  και

$\xi$ , η παράμετρος σχήματος ουράς της ανέλιξης, με  $\xi > 0$

Για την εκτίμηση των παραμέτρων των όμβριων καμπυλών εφαρμόζεται η γενική μέθοδος δύο βημάτων που αναπτύχθηκε από τον Κουτσογιάννη (Κουτσογιάννης, 1997, Koutsoyiannis et al., 1998, 2021). Από ενοποιημένο δείγμα βροχογράφων από όλη τη περιφέρεια Αττικής, εκτιμήθηκαν ενιαίες τιμές όλων των παραμέτρων χρονικής κλίμακας, εκτός από την παράμετρο κλίμακας η οποία διαφοροποιείται με βάση την ομάδα υψομέτρου που ανήκει, αν δηλαδή είναι μικρότερο ή μεγαλύτερο των 160m. Οι τελικές τιμές των παραμέτρων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.1:

Πίνακας 3.1: Παράμετροι των όμβριων καμπύλων Αττικής για κάθε ομάδα υψομέτρου (Εκτίμηση κινδύνων σεισμού, πυρκαγιάς & πλημμύρας στην Περιφέρεια Αττικής – Α' Μέρος, Ε.Α.Α., 10/2021-ιδία επεξεργασία).

Παράμετροι	Υψόμετρο λεκάνης < 160m	Υψόμετρο λεκάνης > 160m
a (h)	0.1	
η (-)	0.73	
ξ (-)	0.07	
λ (mm/h)	445	579
β (years)	0.07	

Για την εύρεση της κρίσιμης έντασης βροχής, θα πρέπει να καθοριστεί και η χρονική κλίμακα  $k$  που ισούται με τον χρόνο συγκέντρωσης για την ορθολογική μέθοδο  $t_c$  και η περίοδος επαναφοράς  $T$ . Έτσι, προκύπτει η εξίσωση έντασης βροχής  $i$  (mm/h) που θα αξιοποιηθεί στην παρούσα εργασία.

#### Χρόνος συγκέντρωσης $t_c$

Σαν διάρκεια βροχής για την εκτίμηση της έντασης χρησιμοποιείται ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής ( $t_c$ ). Ο χρόνος συγκέντρωσης είναι ίσος με τη διάρκεια που χρειάζεται για να φτάσει μια σταγόνα βροχής από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης στην υπό έλεγχο θέση, δηλαδή ως το σημείο εξόδου του κύριου υδατορεύματος.

Για τον Ελλαδικό χώρο, για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης για την κάλυψη των ελληνικών προδιαγραφών (ΠΔ 696, 1974) χρησιμοποιείται ο τύπος του Giandotti (Τσακίρης, 1995). Εφαρμόζεται για απλές υδρολογικές λεκάνες με φυσική κοίτη, ακανόνιστης διατομής που εμφανίζουν σαφώς μία και μόνο κύρια μισγάγκεια, χωρίς να αποτελούνται από περισσότερες της μίας σημαντικές υπολεκάνες και υπολογίζεται ως εξής (Εξ. 3.3):

$$t_c \text{ (h)} = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta z}} \quad \text{Εξ. 3.3}$$

Όπου,

A, η επιφάνεια της λεκάνης (km<sup>2</sup>),

L, το μήκος της κύριας μισγάγκειας (km) και

Δz, η υψομετρική διαφορά του μέσου υψομέτρου της λεκάνης από το υψόμετρο της εξόδου της (m).

Οι τοπογραφικοί παράμετροι που αξιοποιούνται για το χρόνο συρροής για τη παρούσα διπλωματική προκύπτουν μέσω των χαρτών της περιοχής μελέτης σε περιβάλλον QGIS.

### *Περίοδος επαναφοράς*

Η περίοδος επαναφοράς περιγράφει τον βαθμό προστασίας που παρέχει ένα δίκτυο αποχέτευσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η περίοδος επαναφοράς για την οποία έχει σχεδιαστεί το δίκτυο, τόσο μεγαλύτερη είναι η προστασία που αυτό παρέχει. Ανάλογα με το μέγεθος των αντιπλημμυρικών έργων ή φραγμάτων, έχουν εμπειρικά προκύψει διάφορες τυπικές τιμές περιόδου επαναφοράς. Οι τυπικές αυτές τιμές της περιόδου επαναφοράς είναι για αντιπλημμυρικά έργα και διευθετήσεις υδατορευμάτων 50 χρόνια ή περισσότερα. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60, συνήθως πραγματοποιούνται προσομοιώσεις για τρία σενάρια ένα ευμενές (50 χρόνια), ένα σύνηθες (100 χρόνια) και ένα δυσμενές (1000 χρόνια).

## **3.2 Ο συντελεστής απορροής CN**

Ως συντελεστής απορροής χρησιμοποιείται αριθμός καμπύλης CN, μία παράμετρος που περιγράφει ποσοτικά την επίδραση των χρήσεων γης, των συνθηκών του εδάφους, των εδαφικών τύπων αλλά και της προηγούμενης υγρασιακής κατάστασης του εδάφους και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της άμεσης απορροής μίας βροχόπτωσης.

### **3.2.1 Η μέθοδος SCS Curve Number**

Η παράμετρος αυτή προέκυψε μέσω της μεθολογίας SCS –CN (Soil Conservation Service Curve Number method) που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση των περισσευμάτων βροχής σ' ένα υδρολογικό μοντέλο. Χρησιμοποιείται ευρέως σε υδρολογικές μελέτες χάριν της απλότητας της και της μικρής απαίτησης σε δεδομένα, αφού ο τελικός της τύπος αποτελείται από μία μόνο παράμετρο την CN (Santra Mitra et al. 2015; Verma et al. 2017).

Η μέθοδος αυτή υπολογίζει τις υδρολογικές απώλειες μίας βροχόπτωσης με τη βοήθεια τριών μεταβλητών: του ύψους βροχής, της αρχικής κατάστασης υγρασίας του εδάφους, και του

υδρολογικού σύμπλοκου εδάφους- καλύμματος. Παρότι αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Προστασίας των Εδαφών από το Υπουργείο Γεωργίας των ΗΠΑ (U.S Department of Agriculture, Soil Conservation Service) αρχικά για εφαρμογές σε αγροτικές περιοχές, στη συνέχεια εφαρμόστηκε και σε άλλες χρήσεις γης, όπως αστικές ή περιαστικές λεκάνες απορροής αλλά και σε δασικές εκτάσεις (Mishra and Singh, 2003).

Αρνητικά σημεία της μεθόδου αποτελούν η αδυναμία συμπερίληψης της έντασης και χρονικής κατανομής της βροχόπτωσης, της επίδρασης της χωρικής κλίμακας και το γεγονός ότι η μοναδική παράμετρος CN είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη και δεν λαμβάνει με σαφή τρόπο τις προηγούμενες συνθήκες υγρασίας (Hawkins, 1993; Ponce and Hawkins, 1996; Michel et al., 2005).

Οι τιμές του αριθμού CN λαμβάνονται από πίνακες της SCS για διάφορα σύμπλοκα εδαφικών τύπων εδάφους και κάλυψης του εδάφους, για μέσες προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας των πέντε προηγούμενων ημερών. Οι τιμές θεωρητικά κυμαίνονται από 0 έως 100 (πρακτικά από 30 έως 98) και ακόμη και μικρές αποκλίσεις (της τάξης των 5 μονάδων) δίνουν μεγάλες διαφορές στην απορροή (μέχρι και 30-35%) (Υ.Π.Ε.Κ.Α., *Εκτίμηση αριθμού καμπύλης απορροής CN με την μεθοδολογία SCS*). Για αδιαπέρατες υδάτινες επιφάνειες η τιμή του CN είναι 100, ενώ για φυσικές επιφάνειες μικρότερη.

### **Κατηγορίες εδάφους**

Αρχικά, με βάση τους ρυθμούς διήθησης του νερού της βροχής στο έδαφος, δηλαδή την διαπερατότητα διακρίνονται οι εξής τέσσερις κατηγορίες εδάφους σύμφωνα με την SCS:

- **Ομάδα Α:** Εδάφη με μεγάλους ρυθμούς διήθησης, πρόκειται κυρίως για βαθιά εδάφη, ελαφρά με αδρή υφή, όπως π.χ. αμμώδη και χαλικιώδη με πολύ μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου.
- **Ομάδα Β:** Εδάφη με μέσους ρυθμούς διήθησης, εδάφη βαθιά έως μέτρια βαθιά, μέτριας υφής, π.χ. αμμώδης πηλός.
- **Ομάδα Γ:** Εδάφη με μικρούς ρυθμούς διήθησης, εδάφη με ορίζοντα που παρεμποδίζει τη διήθηση και εδάφη λεπτής υφής, π.χ. εδάφη από αργιλοπηλό, εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό.
- **Ομάδα Δ:** Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη λεπτής υφής που διογκώνονται σημαντικά όταν διαβραχούν, όπως πλαστικές άργιλοι, αμμοαργιλώδη, ιλοαργιλώδη και αργιλώδη εδάφη. Στην ίδια ομάδα περιλαμβάνονται εδάφη μικρού βάθους (<50cm) με σχεδόν αδιαπέρατους υποορίζοντες κοντά στην επιφάνεια.



Στον παρακάτω πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι υφές των εδαφών που υπάρχουν πάνω στα διάφορα πετρώματα του ελληνικού χώρου και άρα οι υδρολογικοί εδαφικοί τύποι τους.

Πίνακας 3.2: Υδρολογικοί εδαφικοί τύποι των κυριότερων πετρωμάτων στην Ελλάδα (Υ.Π.Ε.Κ.Α.).

Πέτρωμα	Υφή	Υδρολογικός τύπος
<b>A. Πλουτώνια πετρώματα</b>		
Γρανίτης	Αμμώδη ως πηλώδη	A
Συηνίτης	Βαρύτερα του Γρανίτη	B
Διορίτης	Αργιλώδη ή αργιλοπηλώδη	D
Γάββρος και Περιδοίτης	Πηλώδη μέχρι αργιλώδη	B, C, D
<b>B. Εκρηξιγενή</b>		
Διαβάσης	Αργιλώδη	D
Οφείτης	Λεπτή ή μέτρια λεπτή υφή	C, D
Ρυόλιθος	Αμμώδη	A
Τραχείτης	Αμμώδη	A
Ανδεσίτης	Αργιλώδη	D
Βασάλτης	Αργιλώδη	D
<b>Γ. Μηχανικά ιζηματογενή</b>		
Αμμόλιθοι και ψαμμίτες	Αμμώδη ως αμμοπηλώδη	A
Κροκαλοπαγή, λατυποπαγή	Αμμοπηλώδη	A
Σχιστή άργιλος, αργιλίτες	Αργιλώδη	D
Φλύσχος Αδριατικοϊόνιας ζώνης	Αμμοαργιλώδη ως Αργιλώδη	D
Φλύσχος Πίνδου	Ελαφρύτερα της προηγούμενης	B
Φλύσχος Τριπόλεως-Γαβρόβου	Ενδιάμεση υφή μεταξύ των δύο προηγούμενων.	C
<b>Δ. Χημικά και βιογενή ιζηματογενή</b>		
Σκληροί Ασβεστόληθοι	Αργιλοπηλώδη ως αργιλώδη	D
Ασβεστολιθικές μάργες	Πηλώδη ως αργιλοπηλώδη	C

Ε. Μεταμορφωσιγενή		
Γνεύσιος	Αμμοπηλώδη ως πηλώδη	A, B
Σχιστόλιθος (μαρμαρυγιακός)	Αμμοπηλώδη	A
Σχιστόλιθος (σερικιτικός)	Αμμώδη ως πηλοαμμώδη	A
Σχιστόλιθος (χλωριτικός)	Βαρύτερα από τα τρία παραπάνω	B
Αργιλικός σχιστόλιθος ή σχίστης	Βαριά εδάφη	D
Χαλαζίτης	Αμμώδη	A

### Συνθήκες υγρασίας

Στη συνέχεια, με βάση την αρχική κατάσταση υγρασίας δηλαδή με βάση τις προηγούμενες συνθήκες υγρασίας που προκύπτουν από το συνολικό ύψος βροχής των προηγούμενων πέντε ημερών η SCS διαμορφώνει τις εξής τρεις κατηγορίες:

- 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 μέσες συνθήκες υγρασίας τύπου II η SCS δίνει αναλυτικούς πίνακες για κάθε τύπου εδάφους και για διάφορες χρήσεις γης. Οι αριθμοί καμπύλης απορροής CN(II) προκύπτουν από τον συνδυασμό των χαρτών εδαφικών τύπων και κάλυψης εδάφους ως εξής (Πίνακας 3.3):

Πίνακας 3.3: Αριθμοί καμπύλης απορροής CN (Υ.ΠΕ.Κ.Α.).

Περιγραφή χρήσης γης	Υδρολογική Κατάσταση <sup>5</sup>	Υδρολογικός Τύπος εδάφους			
		A	B	C	D
Γυμνό έδαφος		77	86	91	94
Ευρείες γραμμικές καλλιέργειες σε κεκλιμένο έδαφος <sup>6</sup>	φτωχή	72	81	88	91
	καλή	67	78	85	89
Ευρείες γραμμικές καλλιέργειες σε βαθμίδες <sup>7</sup>	φτωχή	66	74	80	82
	καλή	62	71	78	81
Καλλιέργειες σιτηρών σε κεκλιμένο έδαφος	φτωχή	65	76	84	88
	καλή	63	75	83	87
Καλλιέργειες σιτηρών σε βαθμίδες	φτωχή	61	72	79	82
	καλή	59	70	78	81
Πυκνές καλλιέργειες ψυχανθών σε κεκλιμένο έδαφος	φτωχή	66	77	85	89
	καλή	58	72	81	85
Πυκνές καλλιέργειες ψυχανθών σε βαθμίδες	φτωχή	63	73	80	83
	καλή	51	67	76	80
Χορτολιβαδικές εκτάσεις <sup>8</sup>	φτωχή	68	79	86	89
	μέτρια	49	69	79	84
	καλή	39	61	74	80
Θάμνοι υψηλής πόες θάμνοι με υποβλάστηση αγρωστωδών και άλλων ποών <sup>9</sup>	φτωχή	48	67	77	83
	μέτρια	35	56	70	77
	καλή	30	48	65	73
Δενδρόκηποι ή δενδροκαλλιέργειες <sup>10</sup>	φτωχή	57	73	82	86
Δάση <sup>11</sup>	φτωχή	45	66	77	83
	μέτρια	36	60	73	79
	καλή	30	55	70	77
Δρόμοι					
Χωματόδρομοι		72	82	87	89
Χαλικόστρωτοι		76	85	89	91
Αστικές περιοχές		Για τις αστικές περιοχές ο αριθμός καμπύλης προκύπτει από το ποσοστό των αδιαπέρατων επιφανειών.			
Με μέσο μέγεθος οικοπέδων <0,5στρ και ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας 65%					
Με μέσο μέγεθος οικοπέδων 1 στρ. και ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας 40%					

Για τους άλλους δύο τύπους συνθηκών υγρασίας γίνεται αναγωγή του CN με βάση τις σχέσεις (Εξ. 2.4, Εξ. 2.5):

$$CN_i = \frac{0.42CN_{ii}}{1 - 0.0058CN_{ii}} \quad \text{Εξ. 3.4}$$

$$CN_{iii} = \frac{2.3CN_{ii}}{1 + 0.013CN_{ii}} \quad \text{Εξ. 3.5}$$

Τέλος, επειδή συνήθως μελετώνται σύνθετες εκτάσεις οπότε προκύπτουν διαφορετικές και ποικίλες τιμές CN για υποπεριοχές της λεκάνης γίνεται η εκτίμηση του μέσου συντελεστή απορροής από την εξής σχέση (Εξ. 2.6):

$$CN = \frac{CN_i A_i}{\sum A_i} \quad \text{Εξ. 3.6}$$

Όπου,

CN<sub>i</sub>, οι συντελεστές απορροής των επιμέρους εκτάσεων/ υπολεκάνων A<sub>i</sub>.

### 3.3 Εκτίμηση συντελεστή απορροής CN μετά από πυρκαγιά

#### 3.3.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση συντελεστή CN μετά από πυρκαγιά

Στη διεθνή βιβλιογραφία οι τρόποι καθορισμού του συντελεστή απορροής CN μπορούν να γίνουν είτε 1) μέσω εμπειρικών τιμών στις οποίες έχουν καταλήξει ανά τα χρόνια επιστήμονες, είτε 2) με ακριβείς υπολογισμούς μέσω ανάλυσης πραγματικών υδρολογικών παρατηρήσεων και συγκρίσεων της απόκρισης πριν και μετά την πυρκαγιά.

#### *Εμπειρικές μέθοδοι*

Σε πολλές έρευνες γύρω από την επίδραση των πυρκαγιών στην υδρολογική απόκριση μίας λεκάνης έχει συσχετισθεί ο συντελεστής απορροής CN με την ένταση της πυρκαγιάς (Livingston et al., 2005; Higginson and Jarnecke, 2007; Parathanasiou et al., 2015). Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι τιμές CN άρα και μεγαλύτερες και οι πλημμυρικές αιχμές .

Συνήθως ακολουθούνται τα εξής βήματα: 1) εντοπισμός της καμένης περιοχής μέσω δορυφορικές εικόνες, 2) δημιουργία χάρτη έντασης πυρκαγιάς που καταγράφονται στο δορυφόρο, 3) επαναπροσδιορισμός του χάρτη έντασης πυρκαγιάς. Επανελέγχος της περιοχής μετά τη πυρκαγιά, 4) προσδιορισμός εμπειρικών τιμών CN, ανάλογα με τον χάρτη έντασης της πυρκαγιάς.

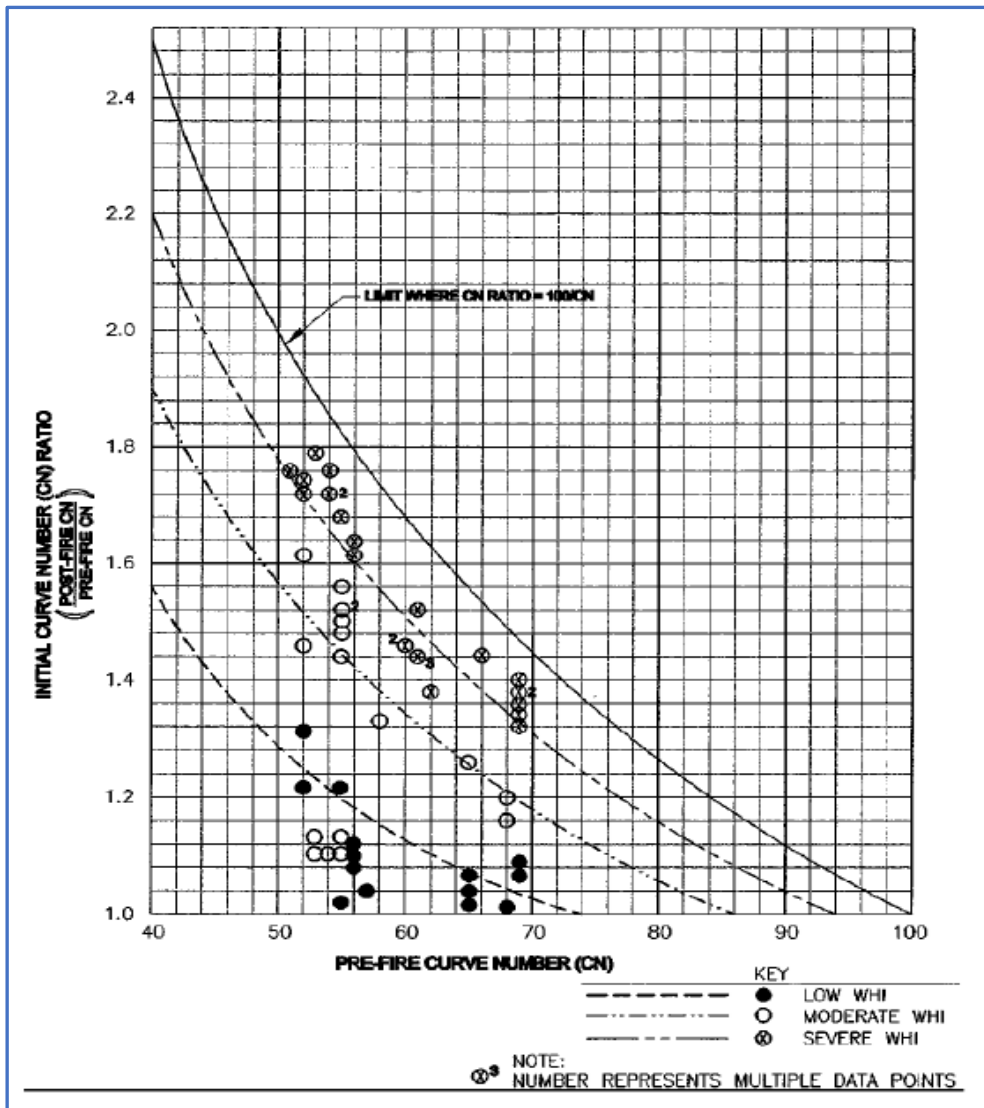
Ο Livingston και οι συνεργάτες του εκτίμησαν ένα εύρος τιμών για τις τιμές του συντελεστή απορροής μετά από πυρκαγιά το 2005, (Πίνακας 3.4) χρησιμοποιώντας υπολογισμένους αριθμούς CN και συγκρίνοντας τους αριθμούς προ και μετά πυρκαγιάς. Τα δεδομένα παράχθηκαν για 31 μικρές υπολεκάνες στο Los Alamos του Νέου Μεξικού, ΗΠΑ και για άλλες 24 που επλήγησαν από την πυρκαγιά Long Mesa το 2002 στο Εθνικό Πάρκο Mesa Verde στο Κολοράντο, ΗΠΑ. Τα αποτελέσματα της έρευνας τους ισχύουν για το Los Alamos και τις νοτιοδυτικές περιοχές πέριξ με παρόμοια υδρολογικά χαρακτηριστικά και παρόμοιες τιμές CN και λιγότερο για περιοχές με διαφορετικές βροχομετρικές μετρήσεις πριν από την πυρκαγιά. Πρώτα, λοιπόν ταξινόμησαν την εδαφική ένταση της πυρκαγιάς για την λεκάνη απορροής χρησιμοποιώντας τον πίνακα 3.5 ,ο οποίος καθορίζει τα ποσοστά υψηλής και μέτριας εδαφικής έντασης της πυρκαγιάς. Εν συνεχεία, με βάση μια γενική σχέση μεταξύ των CN πριν και μετά τη πυρκαγιά, καθόρισαν τις πρώιμα μεταπυρκαγιάς τιμές του αριθμού απορροής (Διάγραμμα 3.1).

Πίνακας 3.4: Εκτιμώμενες μεταπυρκαγιάς τιμές CN για κάθε ένταση πυρκαγιάς (Livingston et al., 2005- ίδια επεξεργασία).

Εδαφική ένταση πυρκαγιάς	Εκτιμώμενος αριθμός CN
Μη καμένο	55 ως 75
Χαμηλή	80 ως 83
Μέτρια, εδάφη με ψηλή υδροπερατότητα	87
Μέτρια, εδάφη με χαμηλή υδροπερατότητα	89
Υψηλή, εδάφη με ψηλή υδροπερατότητα	92
Υψηλή, εδάφη με χαμηλή υδροπερατότητα	95

Πίνακας 3.5: Ταξινόμηση των υδρολογικών επιπτώσεων πυρκαγιάς βάσει του ποσοστού έκτασης με υψηλή εδαφική ένταση πυρκαγιάς (Livingston et al., 2005- ίδια επεξεργασία).

Ποσοστό υπολεκάνων υψηλής εδαφικής έντασης πυρκαγιάς	Ταξινόμηση Υδρολογικών Επιπτώσεων Πυρκαγιών (Wildfire Hydrologic Impact)
0-6	Χαμηλή
7-48	Μέτρια
49-80	Ψηλή



Διάγραμμα 3.1: Σχέσεις συντελεστή απορροής CN πριν τη πυρκαγιά και κατά τη πρώιμη μεταπυρική περίοδο για κάθε ένταση πυρκαγιάς (Livingston et al., 2005).

Ο Cerrelli το 2005 πρότεινε τις παρακάτω εκτιμώμενες τιμές CN μεταπυρικά με βάση την ένταση της πυρκαγιάς αλλά και την ομάδα υδροπερατότητας του εδάφους. Το πεδίο μελέτης του ήταν πυρκαγιές του Εθνικού Δάσους Bitterroot, όπου και υπήρχε έλλειμμα δεδομένων για μετά την πυρκαγιά. Έτσι, με τη βοήθεια των μηχανικών του NRCS της Μοντάνα δημιούργησαν μια κατευθυντήρια γραμμή, με βάση τον υπάρχοντα πίνακα χρήσης γης NRCS CN/χρήσης γης, που παρόλο που δεν επιβεβαιώθηκαν ή βελτιώθηκαν έδωσαν πετυχημένα αποτελέσματα για τα δεδομένα απορροής και βροχοπτώσης που χρησιμοποιήθηκαν.

Οι μελετητές της ομάδας BAER λόγω της περιορισμένης μελέτης γύρω από την απορροή μετά από πυρκαγιά, ακολούθησαν απλούς εμπειρικούς κανόνες για την εκτίμηση των τιμών CN μεταπυρικά (Foltz et al. 2009). Για παράδειγμα, στην Ειδική Έκθεση Υδρολογίας του Salt Creek

BAER (Higginson και Jarnecke 2007), χρησιμοποίησαν τους ακόλουθους κανόνες για τον προσδιορισμό των CN μετά την πυρκαγιά.

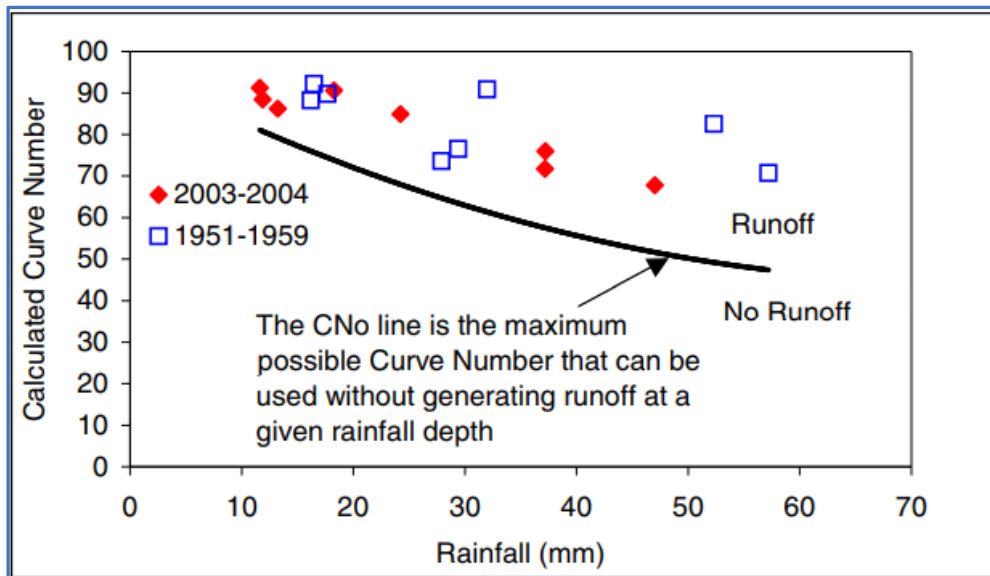
- CN μετά από υψηλής έντασης πυρκαγιά = CN πριν τη πυρκαγιά +15
- CN μετά από μέτριας έντασης πυρκαγιά = CN πριν τη πυρκαγιά +10
- CN μετά από χαμηλής έντασης πυρκαγιά = CN πριν τη πυρκαγιά +5
- Μέγιστη τιμή CN = 100

Άλλοι ερευνητές (Batelis and Nalbantis, 2014; Leopardi and Scorzini, 2015; Yochum and Norman, 2015) επιλέγουν να αντικαταστήσουν τις μεταπυρικές τιμές του CN με άλλες τιμές από τους γνωστούς πίνακες που αντιστοιχούν σε χρήσεις γης που είναι πιο αντιπροσωπευτικές για τις συνθήκες μετά την πυρκαγιά (Konstantinos X. Soulis 2018).

#### *Ακριβείς υπολογισμοί CN μεταπυρικά*

Σύμφωνα με την δεύτερη προσέγγιση, ακολουθούνται συνήθως τα εξής: 1) υπολογισμός των ύψων βροχής για τη πραγματική βροχοπτώση μετά τη πυρκαγιά και αξιοποίηση τους για τον υπολογισμό του περισεύματος βροχής, 2) υπολογισμός παροχής αιχμής και κατάρτιση δοκιμαστικού υδρογραφήματος άμεσης απορροής, 3) διαδοχικές αλλαγές του CN και ταυτόχρονη μεταβολή του χρόνου συγκέντρωσης  $t_c$  μέχρι να προσεγγιστεί η τιμή της παροχής αιχμής. Αυτός είναι και ο τελικός συντελεστής απορροής μεταπυρικά (Αλωνιστιώτη, 2011).

Ο Canfield και οι συνεργάτες του όπως και οι Springer και Hawkins (2005) προσδιόρισαν τις μεταπυρικές τιμές του συντελεστή μέσα από μελέτες που είχαν ως βάση τα βροχομετρικά δεδομένα πριν και μετά τις πυρκαγιές που εξέταζαν. Πιο συγκεκριμένα, ο Canfield και οι συνεργάτες του (2005) χρησιμοποίησαν δεδομένα βροχοπτώσεων και απορροής για συμβάντα καλοκαιρινών μουσώνων που συνέβησαν στο Marshall Gulch (Pima County, AZ, ΗΠΑ) κατά τη δεκαετία του 1950, όπως και δεδομένα μετά από πυρκαγιές το 2003 και το 2004, για να υπολογίσουν τις τιμές CN, χρησιμοποιώντας την ασυμπτωτική μέθοδο προσδιορισμού CN που προτάθηκε από τον Hawkins (1993). Παρότι αναμένονταν αύξηση της CN σε συνθήκες μετά τη πυρκαγιά, δεν σημειώθηκε κάτι τέτοιο στη μελέτη τους και λόγω σφαλμάτων που υπήρχαν στις βροχομετρικές μετρήσεις αλλά και λόγω του μεγάλου χρονικού διαστήματος των 40 χρόνων. (Διάγραμμα 3.2)



Διάγραμμα 3.2: Υπολογισμός τιμών αριθμού καμπύλης πριν και μετά τη πυρκαγιά στην περιοχή Marchall Gulch (Canfield et. al., 2005).

Σε παρόμοια συμπεράσματα σχετικά με την απόκριση κατέληξαν και οι Springer και Hawkins (2005) οι οποίοι χρησιμοποίησαν υδρολογικά δεδομένα πριν και μετά την πυρκαγιά που έγινε στο Νέο Μεξικό τον Μαΐο του 2000. Βασίστηκαν και εκείνοι στην ασυμπτωτική μέθοδο του Hawkins και παρατήρησαν αύξηση στις ροές αιχμής κατά δύο τάξεις μεγέθους μεταπυρικά.

Οι Cydzik και Hogue (2009) και ο Chen και οι συνεργάτες του (2013) εκτίμησαν επίσης την αλλαγή CN μετά από δασικές πυρκαγιές, μέσω της βαθμονόμησης υδρολογικών μοντέλων για περιορισμένο αριθμό γεγονότων πριν και μετά την πυρκαγιά.

### Έλλειμα

Γενικά, η εκτίμηση των τιμών CN μετά από δασικές πυρκαγιές αποτελεί πεδίο περιορισμένης έρευνας. Η μεταβλητότητα στο κλίμα, το έδαφος, την κάλυψη γης, τις γεωμορφολογικές συνθήκες χρειάζεται να ληφθούν υπόψιν για την ανάλυση της υδρολογικής απόκρισης και την πρόληψη του αυξημένου πλημμυρικού κινδύνου μετά από μία πυρκαγιά. Σύμφωνα με το συνέδριο σχετικά με τις Υδρολογικές Αναλύσεις των Συνθηκών Μετά την Πυρκαγιά (NRCS (Natural Resources Conservation Service. 2015), η έλλειψη δεδομένων πεδίου στις καμένες λεκάνες απορροής και η φτωχή σχετική έρευνα για την επαλήθευση της επίδρασης στον συντελεστή απορροής εμποδίζει τη μοντελοποίηση απορροής μεταπυρικά με επιβεβαιωμένους αριθμούς καμπύλων CN.



### 3.3.2 Μέθοδος Παπαθανασίου

Στη διατριβή της Παπαθανασίου («Ανάπτυξη μεθοδολογίας εκτίμησης της δυναμικής εξέλιξης πλημμυρικού κινδύνου στο χρόνο σε περιαστικό περιβάλλον υπό μεταπυρικές συνθήκες», 2018) αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο για τη θεωρητική εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου υπό μεταπυρικές συνθήκες εστιάζοντας στις μεσογειακές περιαστικές λεκάνες απορροής. Στόχος ήταν η μεθοδολογία να εφαρμοστεί σε άλλες περιοχές με παρόμοια υδρομετεωρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Ουσιαστικά, εκτιμήθηκαν η εξέλιξη διαφόρων υδρολογικών παραμέτρων δυναμικά στον χρόνο και η ένταση επίδρασης τους μέσω ανάλυσης ευαισθησίας. Η περιοχή μελέτης που δοκιμάστηκε η μέθοδος είναι η λεκάνη απορροής του ρέματος της Ραφήνα. Οι υδρολογικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για τη περίοδο μετά τον Αύγουστο του 2009 που σημειώθηκε σημαντική δασική πυρκαγιά. Οι σχέσεις που εξήγαγε θα αξιοποιηθούν και στη παρούσα εργασία, αφού και οι δυο περιοχές μελέτης αποτελούν τυπικές περιαστικές μεσογειακές λεκάνες που πλήττονται τους καλοκαιρινούς μήνες από πυρκαγιές και τους χειμερινούς από πλημμύρες.

#### *Υδρολογική επαναφορά*

Προτού εξηγηθεί αναλυτικά η πορεία που ακολουθήθηκε, είναι σημαντικό να εστιαστεί η προσοχή στην έννοια της υδρολογικής επαναφοράς. Η υδρολογική επαναφορά είναι το στάδιο εκείνο όπου η απόκριση της καμένης λεκάνης απορροής έχει επανέλθει από υδρολογική σκοπιά στην κατάσταση που βρισκόταν πριν από τη πυρκαγιά (Parathanasiou et al., 2015). Αποτελεί χρονικό όριο για την εκτίμηση των υδρολογικών παραμέτρων, αφού μέχρι τότε θα έχουν επανέλθει στις τιμές που είχαν πριν την πυρκαγιά.

Το μέγεθος της υδρολογικής επαναφοράς εξαρτάται από την ένταση της πυρκαγιάς, τη βλάστηση, το ποσοστό βροχόπτωσης μετά τη πυρκαγιά, τη ποσότητα και τις διεργασίες διάβρωσης που μπορεί να έχει υποστεί το έδαφος της πληγείσας περιοχής.

Όσον αφορά την ένταση της πυρκαγιάς, ο υδρολογικός χρόνος ανάκαμψης για σοβαρά καμένες περιοχές μπορεί να υπερβαίνει τα τέσσερα χρόνια, ενώ για χαμηλής έντασης μπορεί να είναι ένα έτος (Brown, 1972).

Ο τύπος της βλάστησης παίζει ρόλο στον ρυθμό ανάκτησης της βλάστησης, άρα επακόλουθα και στο ρυθμό υδρολογικής επαναφοράς. Η ανάκτηση της βλάστησης στους σκληρόφυλλους θάμνους, φυτά αρκετά ανθεκτικά στη φωτιά, γίνεται εντός μερικών χρόνων (Viedma et al., 1997; Pausas and Verdú, 2005), ενώ η ανάκτηση για βόρεια δάση μπορεί να διαρκέσει ακόμη και δεκαετίες (Nerstad et al., 1999). Τα λιβάδια μπορούν να αναγεννηθούν αρκετά σύντομα, καθώς μετά από μία πυρκαγιά η χλωώδης κάλυψη του εδάφους ανακτάται εντός εβδομάδων

(Carey et al., 2003). Σε τυπικά μεσογειακά συστήματα ενώ η βλάστηση τα πρώτα χρόνια ανακτάται γρήγορα, τα επόμενα ο ρυθμός ανάκτησης μειώνεται σημαντικά (Marzano et al., 2012). Τα είδη φυτών των μεσογειακών περιοχών παρουσιάζουν μερική αποκατάσταση μετά από ένα χρόνο, κατά τον δεύτερο χρόνο έχουν ακόμη πιο εκτεταμένη ανάκτηση, ενώ κρίσιμη περίοδος θεωρείται η πρώτη άνοιξη μετά τη πυρκαγιά (Keeley, 2009). Για το ποσοστό της βροχοπτώσης είναι σημαντικό να συλλέγονται επαρκή και αντιπροσωπευτικά δεδομένα από τους βροχομετρητές για την κατάσταση πριν και μετά τη πυρκαγιά, ώστε να αποφεύγονται υποεκτιμήσεις στα ύψη και τις εντάσεις των βροχοπτώσεων. Το μέγεθος της διάβρωσης όπως και η μορφή της επηρεάζουν σημαντικά τον χρόνο υδρολογικής ανάκαμψης. Για παράδειγμα, σε πληγείσες περιοχές που έχουν αυξημένη επιφανειακή διάβρωση παρατηρείται μειωμένος ρυθμός υδρολογικής επαναφοράς (Brown, 1972).

Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει για διάφορα υδρολογικά χαρακτηριστικά, το χρονικό διάστημα που αρκεί για την επαναφορά τους στις αρχικές τιμές πριν από την πυρκαγιά. Για το ρυθμό απορροής, οι Rulli και Rosso θεωρούν τα δύο χρόνια αρκετά για την επαναφορά στις αρχικές τιμές, ενώ οι Moody και Martin (2001) σε έρευνα τους σε δασικές ζώνες στο Κολοράντο καταλήγουν σε μία περίοδο ανάκαμψης 3- 4 χρόνων. Για τις ροές αιχμής, οι Springer και Hawkins (2005) για τη πυρκαγιά Cerro Grande στο Νέο Μεξικό εκτιμούν ως χρόνο επαναφοράς τα τρία χρόνια. Για την ανάκτηση μεταφοράς ιζημάτων χρειάζεται να περάσουν χρόνια. Ο Inbar και οι συνεργάτες του (1998) προτείνουν τρία με τέσσερα χρόνια για τις μεσογειακές περιοχές. Σύμφωνα με τους Moody και Martin (2001), μια περίοδος 4-5 ετών είναι απαραίτητη για την ανάκτηση των ρυθμών μεταφοράς ιζημάτων σε επηρεασμένη δασική έκταση στο Κολοράντο. Τέλος, για την αποκατάσταση της διάβρωσης οι Moody και Martin (2001) εκτίμησαν τουλάχιστον 3- 4 χρόνια για τις καμένες δασικές εκτάσεις του Κολοράντο, ενώ οι Rulli και Rosso (2007) για τις μεσογειακές περιοχές εκτιμούν ότι η αποκατάσταση μπορεί να διαρκέσει από δύο ως δέκα χρόνια.

Ολοκληρώνοντας, οι περιοχές που εξετάζονται τόσο στη παρούσα διπλωματική, όσο και στη διατριβή της Παπαθανασίου είναι μεσογειακές. Αυτό σημαίνει ότι οι πυρκαγιές συμβαίνουν τέλη καλοκαιριού και κρίσιμες κρίνονται οι πρώτες δύο περίοδοι άνοιξης (συχνές βροχοπτώσεις, αρχικό στάδιο ανάκαμψης βλάστησης) όπως έχει αναφερθεί παραπάνω. Με βάση λοιπόν τις παραπάνω βιβλιογραφικές αναφορές, μπορεί να θεωρηθεί ως χρόνος υδρολογικής επαναφοράς διάστημα των δύο ως τεσσάρων χρόνων, ανάλογα με την ένταση της πυρκαγιάς.

### *Χωροχρονική επίδραση*

Η υδρολογική επίδραση μίας πυρκαγιάς σε μία λεκάνη απορροής εξετάζεται χωροχρονικά λαμβάνοντας υπόψιν την έκταση και την ένταση της πυρκαγιάς, συνδυαστικά με τον ρυθμό επαναφοράς στην αρχική υδρολογική συνθήκη της λεκάνης.

Σχετικά με την χωρική επίδραση, αρχικά χωρίστηκαν πέντε κλάσεις για την ένταση της πυρκαγιάς: πολύ μεγάλη σφοδρότητα (i), μεγάλη σφοδρότητα (ii), μέτρια σφοδρότητα (iii), χαμηλή σφοδρότητα (iv) και μηδενική σφοδρότητα (αφορά εκτάσεις που δεν επλήγησαν από την πυρκαγιά). Η πιο διαδεδομένη μέθοδος και αυτή που χρησιμοποιήθηκε και στη διατριβή της Παπαθανασίου για την απεικόνιση της σφοδρότητας είναι η δημιουργία χαρτών έντασης πυρκαγιάς, κάνοντας χρήση δορυφορικής τηλεπισκόπησης μέσω δορυφορικών. Στην εν λόγω έρευνα ωστόσο, λόγω της μικρής έκτασης της πυρκαγιάς, ήταν αδύνατη η λήψη επαρκών εικόνων, γι' αυτό και θεωρήθηκαν διαφορετικές εντάσεις πυρκαγιάς για κάθε σενάριο για όλη τη λεκάνη απορροής.

Για την χρονική επίδραση της πυρκαγιάς δεν εκτιμάται μόνο η επίδραση αμέσως μετά τη πυρκαγιά, αλλά και η δυναμική επίδραση στον χρόνο μέχρι την υδρολογική επαναφορά του συστήματος, όπως προαναφέρθηκε και στο εδάφιο για την υδρολογική επαναφορά παραπάνω.

Συνδυάζοντας λοιπόν, χωρική και χρονική επίδραση προκύπτουν τα εξής:

- Πληγείσες περιοχές με χαμηλής ή μέτριας έντασης πυρκαγιάς χρειάζονται προσεγγιστικά 2 χρόνια μέχρι να επέλθει υδρολογική επαναφορά.
- Πληγείσες περιοχές με υψηλής έντασης πυρκαγιάς χρειάζονται προσεγγιστικά 3 χρόνια μέχρι να επέλθει υδρολογική επαναφορά.
- Πληγείσες περιοχές με πολύ υψηλής έντασης πυρκαγιάς χρειάζονται προσεγγιστικά 4 χρόνια μέχρι να επέλθει υδρολογική επαναφορά.

Έτσι, για την παρακολούθηση των υδρολογικών παραμέτρων στο χρόνο μετά από μία πυρκαγιά, σε μεσογειακή περιοχή, μέχρι την υδρολογική επαναφορά μπορούν να αξιοποιηθούν τα χρονικά παράθυρα των 7 (1η άνοιξη μετά την πυρκαγιά), 12 (1<sup>ο</sup> έτος), 19 (2η άνοιξη μετά την πυρκαγιά), 24 (2<sup>ο</sup> έτος), 36 (3<sup>ο</sup> έτος) και 48 μηνών (4<sup>ο</sup> έτος).

### *Αρχικές συνθήκες υγρασίας*

Πρωτότυπο σημείο στη διατριβή της Παπαθανασίου είναι και η εξέταση επιρροής της υγρασίας του εδάφους στην υδρολογική απόκριση μετά από μία πυρκαγιά. Παρότι συνήθως βιβλιογραφικά οι συνθήκες υγρασίας αγνοούνται ή θεωρούνται μόνο κανονικές συνθήκες υγρασίας, η ίδια μελέτησε τις περιπτώσεις των υγρών και ξηρών συνθηκών πριν και μετά τη πυρκαγιά. Συνεκτίμησε την επίδραση τους μαζί με τις άλλες παραμέτρους (ένταση πυρκαγιάς, περίοδος επαναφοράς), για να αποφύγει την υποεκτίμηση στην απόκριση της λεκάνης απορροής. Δεν υιοθέτησε την μέθοδο SCS για τον υπολογισμό του CN που οδηγούσε συχνά σε μη επαρκή αποτελέσματα, όπως υποεκτιμήσεις για υγρές συνθήκες και περεκτιμήσεις για ξηρές συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Συγκεκριμένα, επέλεξε πλημμυρικά γεγονότα με κανονικές, υγρές και ξηρές αρχικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας, εφάρμοσε διαφορετικές τιμές CN ανάλογα με τη περίπτωση και συνέκρινε τα προσομοιωμένα αποτελέσματα με τα παρατηρούμενα διαθέσιμα δεδομένα στη περιοχή μελέτης της. Αποτέλεσμα της βαθμονόμησης ήταν η εξαγωγή νέων παραμέτρων, που καθορίζουν την επίδραση της υγρασίας εδάφους και θα παρουσιαστούν παρακάτω. Στην εν λόγω εργασία θα θεωρηθούν μεταβαλλόμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας τόσο για την περίοδο πριν, όσο για την περίοδο μετά την πυρκαγιά.

### *Υδρολογικοί παράμετροι πριν και μετά τη πυρκαγιά*

Επόμενο βήμα αποτελεί η επιλογή των αντιπροσωπευτικών υδρολογικών παραμέτρων που θα εκτιμήσουν ποσοτικά την επίδραση της πυρκαγιάς στην υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης απορροής. Έπειτα από βιβλιογραφική ανασκόπηση, η Παπαθανασίου κατέληξε στις εξής πέντε παραμέτρους: ο Αριθμός Καμπύλης (CN), οι Αρχικές Απώλειες (IA), η Τυπική Υστέρηση (TP), ο Συντελεστής Αιχμής (CP) και ο Συντελεστής Muskingum K. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η επίδραση του αριθμού καμπύλης είναι σημαντικότερη από τους υπολοίπους συντελεστές. Η Παπαθανασίου ωστόσο δεν κρίνει αμελητέα την αξία τους, γι' αυτό τους περιλαμβάνει στην έρευνα της. Στη δεδομένη εργασία θα μελετηθεί μόνο η επίδραση του CN.

### *Παράμετροι πριν τη πυρκαγιά*

Πρώτα, εκτιμήθηκαν οι παράμετροι πριν τη πυρκαγιά για κανονικές, υγρές και ξηρές συνθήκες με βάση τα όσα προαναφέρθηκαν. Για την συνεκτίμηση των εδαφικών συνθηκών υγρασίας η Παπαθανασίου χρησιμοποίησε την εξίσωση 3.7. Ο συσχετισμός των μεταπυρικών τιμών κανονικών, υγρών και ξηρών συνθηκών υγρασίας εφαρμόζεται κατά τον ίδιο τρόπο όπως και στην αρχική κατάσταση πριν τη πυρκαγιά.

$$X_{\text{dry,wet}} = c X_{\text{normal}} + d \quad \text{Εξ. 3.7}$$

Όπου,

X, μία υδρολογική παράμετρος είτε πριν τη πυρκαγιά (af), είτε μετά (pf),

c, d, συντελεστές που εξαρτώνται από τις κατά περίπτωση συνθήκες εδαφικής υγρασίας (βλ. πίνακα 3.6).

Πίνακας 3.6: Οι παράμετροι c και d για ξηρές και υγρές συνθήκες υγρασίας για τις υδρολογικές παραμέτρους CN, IA, TP, CP και K (Papathanasiou, 2018-ιδία επεξεργασία).

Παράμετροι	c	d
CN <sub>dry</sub>	1	-7
CN <sub>wet</sub>	1	7
IA <sub>dry</sub>	1	3
IA <sub>wet</sub>	1	-3
TP <sub>dry</sub>	1	0.05
TP <sub>wet</sub>	1	-0.05
CP <sub>dry</sub>	1	Min (0.05,0.7)
CP <sub>wet</sub>	0	0.4
K <sub>dry</sub>	1.3	0
K <sub>wet</sub>	0.7	0

Για τον συντελεστή απορροής συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση του συντελεστή απορροής για ξηρές συνθήκες (Εξ. 3.8) και αύξηση για υγρές (Εξ. 3.9):

$$CN_{\text{dry}} = CN - 7 \quad \text{Εξ. 3.8}$$

$$CN_{\text{wet}} = CN + 7 \quad \text{Εξ. 3.9}$$

Στην εν λόγω εργασία, για τις τιμές για διαφορετικές συνθήκες υγρασίας χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω εξισώσεις.

### Παράμετροι μετά τη πυρκαγιά

Η Παπαθανασίου για την αλλαγή των τιμών των υδρολογικών παραμέτρων μετά από μία πυρκαγιά έλαβε υπόψιν τα εξής δύο σημεία: 1) την απότομα μειωμένη με τον χρόνο επίδραση της πυρκαγιάς στις παραμέτρους αυτές, 2) τα χαρακτηριστικά χρονικά παράθυρα των 7, 12, 19, 24, 36 και 48 μηνών στην ανάπτυξη της βλάστησης.

Με βάση τα παραπάνω, θεωρήσε ότι οι υδρολογικές παράμετροι μεταπυρικά ακολουθούν λογαριθμικό προφίλ στο χρόνο. Έτσι, για κανονικές συνθήκες υγρασίας οι σχέσεις μεταπυρικά είναι οι εξής (Εξ. 3.10- 3.14):

$$CN_{pf,FS}(t) = CN_{af} + a_{CN,FS} \ln(t) + b_{CN,FS} \quad \text{Εξ. 3.10}$$

$$IA_{pf,FS}(t) = IA_{af} + a_{CN,FS} \ln(t) + b_{CN,FS} \quad \text{Εξ. 3.11}$$

$$TP_{pf,FS}(t) = TP_{af} [a_{CN,FS} \ln(t) + b_{CN,FS}] \quad \text{Εξ. 3.12}$$

$$CP_{pf,FS}(t) = \text{MAX} [(CP_{af} + a_{CN,FS} \ln(t) + b_{CN,FS}), 0.4] \quad \text{Εξ. 3.13}$$

$$K_{pf,FS}(t) = K_{af} [a_{CN,FS} \ln(t) + b_{CN,FS}] \quad \text{Εξ. 3.14}$$

Όπου,

**pf**, ο δείκτης που αντιστοιχεί σε μεταπυρικές συνθήκες (post-fire),  
**af**, ο δείκτης που αντιστοιχεί σε συνθήκες πριν την πυρκαγιά (ante-fire),  
**FS**, ο δείκτης που υποδεικνύει τη σφοδρότητα της πυρκαγιάς (fire severity), που εξαρτάται από το % των εκτάσεων που έχουν πληγεί εντός κάθε κλάσης σφοδρότητας πυρκαγιάς,  
**t**, ο χρόνος μετά την εκδήλωση της πυρκαγιάς (μήνες) και  
**a, b**, παράμετροι που εξαρτώνται από τη σφοδρότητα της πυρκαγιάς και τις οριακές συνθήκες για την εκτίμηση των μεταπυρικών τιμών κάθε παραμέτρου.

Σχετικά με τις οριακές συνθήκες, υπάρχουν τα ανώτερα όρια ( $h_{FS,tupper}$ ) -αναφέρονται στη πρώτη μεταπυρική περίοδο ( $t_{upper}$ )- και τα κατώτερα ( $h_{FS,tlower}$ ), που αναφέρονται στη περίοδο λίγο πριν την υδρολογική επαναφορά ( $t_{lower}$ ). Για να υπολογιστούν οι παράμετροι **a, b**, θα πρέπει πρώτα να καθοριστούν τα  $t_{upper}$  και  $t_{lower}$  και οι οριακές τιμές για κάθε ένταση πυρκαγιάς, καθώς ισχύει (Εξ. 3.15):

$$h_{X,FS,t} = a_{X,FS} \ln(t) + b_{X,FS} \quad \text{Εξ. 3.15}$$

Όπου,

**X**, η εκάστοτε υδρολογική παράμετρος.

Ως  $t_{upper}$ , ορίζεται το διάστημα των 7 πρώτων μηνών μετά τη πυρκαγιά. Η διατριβή της Παπαπαθανασίου, όπως και η παρούσα έρευνα βασίστηκαν στα αποτελέσματα των Higginson και Jarnecke (2007) σχετικά με τις τιμές των CN την πρώτη μεταπυρική περίοδο υπό κανονικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Πρότειναν αύξηση των τιμών CN μετά τη πυρκαγιά ( $h_{CN,FS,tupper}$ ) κατά 5, 10, 15 μονάδες για πυρκαγιές χαμηλού, μέτριου, υψηλού δείκτη έντασης πυρκαγιάς (FS). Στα πλαίσια της εργασίας όπως και στη διατριβή της Παπαπαθανασίου, θεωρείται αναλογικά και αύξηση 20 μονάδων για πυρκαγιές πολύ υψηλού FS.



Η περίοδος  $t_{lower}$  διαφέρει ανάλογα με την ένταση της πυρκαγιάς. Οι περιοχές που έχουν καεί πιο έντονα χρειάζονται μεγαλύτερη περίοδο επαναφοράς σε σχέση με τις ελαφρά καμένες περιοχές. Χρησιμοποιώντας ως σταθερά, τα χρονικά παράθυρα των 7, 12, 19, 24, 36 και 48 μηνών ως μεταβατικές περιόδους υδρολογικής ανάκαμψης, για πολύ υψηλής έντασης πυρκαγιά (FS= i) θεωρείται ως  $t_{lower}$  το διάστημα 36 -48 μηνών, για υψηλής (FS=ii) θεωρείται το διάστημα 24-36 μηνών και για μέτρια και χαμηλής έντασης (FS=iii και iv) θεωρείται κοινό διάστημα 19-24 μηνών. Δεδομένου πως σύντομα θα αποκατασταθεί η υδρολογική ανάκαμψη, προτείνονται αυξήσεις τιμών CN ( $h_{CN,FS,tlower}$ ) για τη χρονική περίοδο  $t_{lower}$  κατά 1, 2, 3 και 4 μονάδες για πυρκαγιές χαμηλής, μέτριας, ψηλής και πολύ υψηλής έντασης πυρκαγιάς αντίστοιχα.

Η Παπαθανασίου καθόρισε ανώτερα και κατώτερα όρια και για τις υπόλοιπες υδρολογικές παραμέτρους, ακολουθώντας εκτεταμένη βιβλιογραφική έρευνα και τα συνόπισε στο παρακάτω πίνακα 3.7:

Πίνακας 3.7: Ανώτερα ( $t_{upper}$ ) και κατώτερα ( $t_{lower}$ ) όρια για κάθε υδρολογική παράμετρο (CN, IA, TP, CP, K) και για κάθε ένταση πυρκαγιάς (FS=i, ii,iii, iv) (Parathanasiou, 2018-ιδία επεξεργασία).

Παράμετροι	FS (κλάση έντασης πυρκαγιάς)			
	i	ii	iii	iv
$h_{CN,FS,tupper}$	20	15	10	5
$h_{CN,FS,tlower}$	4	3	2	1
$h_{IA,FS,tupper}$	-10	-8	-6	-4
$h_{IA,FS,tlower}$	-1			
$h_{TP,FS,tupper}$	0.6	0.7	0.8	0.9
$h_{TP,FS,tlower}$	0.9	0.9	0.95	0.97
$h_{CP,FS,tupper}$	-0.1	-0.08	-0.06	-0.04
$h_{CP,FS,tlower}$	-0.04	-0.04	-0.02	-0.01
$h_{K,FS,tupper}$	0.75	0.8	0.85	
$h_{K,FS,tlower}$	0.95			

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας αυτές τις οριακές τιμές των  $h_{FS,tupper}$  και  $h_{FS,tlower}$  για δεδομένα  $t_{upper}$  και  $t_{lower}$ , υπολόγισε τις τιμές των συντελεστών  $a_{FS}$  και  $b_{FS}$ . Ειδικότερα, οι εξισώσεις για τον συντελεστή απορροής CN, που αποτελεί τον συντελεστή ενδιαφέροντος στη παρούσα εργασία, παίρνουν την εξής μορφή (Εξ. 3.16- 3.19):

$$CN_{pf,FS=i}(t) = CN_{af} + (-8.31 \ln(t) + 36.17) \quad \text{Εξ. 3.16}$$

$$CN_{pf,FS=ii}(t) = CN_{af} + (-7.33 \ln(t) + 29.26) \quad \text{Εξ. 3.17}$$

$$CN_{pf,FS=iii}(t) = CN_{af} + (-6.50 \ln(t) + 22.63) \quad \text{Εξ. 3.18}$$

$$CN_{pf,FS=iv}(t) = CN_{af} + (-3.25 \ln(t) + 11.32) \quad \text{Εξ. 3.19}$$

Τέλος, οι εξισώσεις μεταπυρικά για ξηρές (Εξ. 3.20- 3.23) και υγρές συνθήκες εδαφικής υγρασίας (Εξ. 3.24-3.27) λαμβάνοντας υπόψιν τους συντελεστές c, d είναι οι ακόλουθες:

$$CN_{pf,dry,FS=i}(t) = [CN_{af} + (-8.31 \ln(t) + 36.17)] - 7 \quad \text{Εξ. 3.20}$$

$$CN_{pf,dry,FS=ii}(t) = [CN_{af} + (-7.33 \ln(t) + 29.26)] - 7 \quad \text{Εξ. 3.21}$$

$$CN_{pf,dry,FS=iii}(t) = [CN_{af} + (-6.50 \ln(t) + 22.63)] - 7 \quad \text{Εξ. 3.22}$$

$$CN_{pf,dry,FS=iv}(t) = [CN_{af} + (-3.25 \ln(t) + 11.32)] - 7 \quad \text{Εξ. 3.23}$$

$$CN_{pf,wet,FS=i}(t) = [CN_{af} + (-8.31 \ln(t) + 36.17)] + 7 \quad \text{Εξ. 3.24}$$

$$CN_{pf,wet,FS=ii}(t) = [CN_{af} + (-7.33 \ln(t) + 29.26)] + 7 \quad \text{Εξ. 3.25}$$

$$CN_{pf,wet,FS=iii}(t) = [CN_{af} + (-6.50 \ln(t) + 22.63)] + 7 \quad \text{Εξ. 3.26}$$

$$CN_{pf,wet,FS=iv}(t) = [CN_{af} + (-3.25 \times \ln(t) + 11.32)] + 7 \quad \text{Εξ. 3.27}$$

Τέλος, επειδή η περιοχή μελέτης έχει τμήματα με διαφορετικούς συντελεστές απορροής και καθώς η καμένη έκταση αποτελεί ένα τμήμα αυτής, θα υπολογιστεί ακολούθως ο μεταπυρικός σταθμισμένος συντελεστής απορροής (Εξ.3.28):

$$CN_{pf} = \sum_i p_i [c(CN_{afi} + a \ln(t) + b) + d] \quad \text{Εξ. 3.28}$$

Όπου,

$p_i$ , το ποσοστό καμένης ή μη καμένης έκτασης ως προς τη συνολική έκταση της υπολεκάνης,  $a, b$ , προκύπτουν από τον πίνακα 3.8.

Πίνακας 3.8: Τιμές συντελεστών  $a, b$  για κάθε κλάση έντασης πυρκαγιάς κατά Παπαθανασίου.

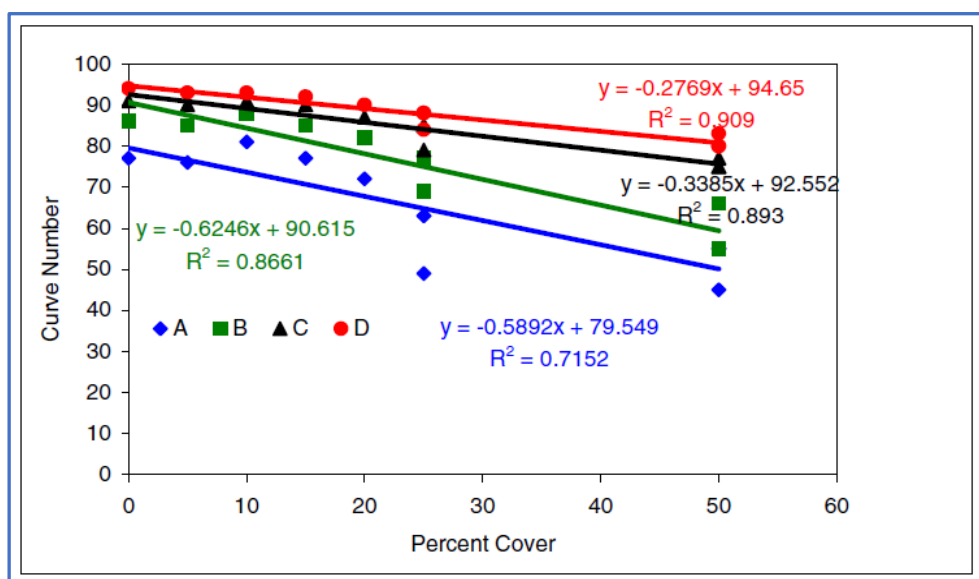
Ένταση πυρκαγιάς	a (-)	b (-)
FS= i	-8,31	+36,17
FS= ii	-7,33	+29,26
FS= iii	-6,5	+22,63
FS= iv	-3,25	+11,32

Να σημειωθεί το προφανές πως όταν ένα τμήμα δεν είναι καμένο δεν θα επηρεάζεται από τους συντελεστές  $a$  και  $b$  παρά μόνο από τους συντελεστές εδαφικής υγρασίας.

### 3.3.3 Μέθοδος Goodrich

Άλλη μία μέθοδος που θα εφαρμοστεί για τον προσδιορισμό του αριθμού καμπύλης CN μεταπυρικά είναι η μέθοδος που αναπτύχθηκε από τον Goodrich και άλλους ερευνητές το 2005. Προσπαθώντας να αναδείξουν την υδρολογική αλλαγή πριν και μετά από πυρκαγιές, διαμόρφωσαν το υδρολογικό μοντέλο AGWA και το εφάρμοσαν σε μία περιοχή που κάηκε το 2003 κοντά στο Tucson της Αριζόνα. Το εν λόγω μοντέλο έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί υδρολογικές προσομοιώσεις προ και μετά πυρκαγιάς, όπως και να εμφανίζει την αλλαγή στην υδρολογική απόκριση.

Για την εκτίμηση του πλημμυρικού όγκου μεταπυρικά, επέλεξαν να τροποποιήσουν το συντελεστή απορροής. Εδώ κύρια βαρύτητα έχει το ποσοστό κάλυψης κάθε χρήσης γης που καταστράφηκε στην πληγείσα περιοχή και η επίδραση του στο συντελεστή απορροής. Οι τιμές του συντελεστή τροποποιούνται μετά τη πυρκαγιά ανάλογα με το ποσοστό κάλυψης που καταστράφηκε, λαμβάνοντας υπόψιν και τις χρήσεις γης (Cronshey et al., 1986) και οι τιμές αυτές δίνονται για κάθε ομάδα υδροπερατότητας (A, B, C, D). Για το ποσοστό επιφάνειας που καταστράφηκε, δηλαδή κάηκε, παίζει ρόλο και η κατηγορία έντασης της πυρκαγιάς. Στο διάγραμμα 3.3 φαίνονται οι ισχυρές σχέσεις των τιμών CN και του ποσοστού κάλυψης για κάθε ομάδα υδροπερατότητας.



Διάγραμμα 3.3: Σχέσεις συντελεστή απορροής CN και ποσοστού κάλυψης γης για κάθε ομάδα υδροπερατότητας (Goodrich et al., 2005).

Έπειτα από επεξεργασία, διαμορφώθηκε τελικά ο παρακάτω πίνακας 3.9 που προτείνει συγκεκριμένες τιμές CN μεταπυρικά, με βάση το ποσοστό κάλυψης που κάηκε, για κάθε χρήση γης και για κάθε ομάδα υδροπερατότητας ξεχωριστά.

Πίνακας 3.9: Τιμές συντελεστή απορροής CN συναρτήσει της ομάδας υδροπερατότητας, της χρήσης γης και του ποσοστού κάλυψης κάθε χρήσης που κάηκε (Goodrich et al., 2005- ίδια επεξεργασία).

Χρήσεις γης	Ποσοστό κάλυψης	Ομάδα υδροπερατότητας εδάφους			
		A	B	C	D
Άγονο	0	77	86	91	94
Χέρσο	5	76	85	90	93
Υψηλή αστικοποίηση	10	81	88	91	93
Χαμηλή αστικοποίηση	15	77	85	90	92
Μεταβατική αστικοποίηση	20	72	82	87	90
Θαμνώδεις εκτάσεις	25	63	77	85	88
Βοσκότοποι	25	49	69	79	84
Φυλλοβόλα δάση	50	55	55	75	80
Αειθαλή δάση	50	45	66	77	83
Μεικτά δάση	50	55	55	75	80

### Παραδοχές

Στην εργασία θα θεωρηθούν παραδοχές ίδιες με εκείνες που αναφέρονται στη μεταπτυχιακή εργασία «Διερεύνηση της επίδρασης των δασικών πυρκαγιών στην υδρολογική απόκριση λεκάνων απορροής της Ανατολικής Αττικής» (Αλωνιστιώτη, 2011), καθώς οι χωρικές συνθήκες είναι αρκετά παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται και εδώ. Με περιοχή μελέτης την λεκάνη απορροής της Ραφήνας και με συμβάν πυρκαγιάς τη φωτιά του Αυγούστου του 2009, εξετάστηκε η μεταβολή της υδρολογικής απόκρισης μίας λεκάνης μεταπυρικά, μέσω εκτίμησης διαφόρων υδρολογικών παραμέτρων .

Σε πληγείσες περιοχές που επικρατεί μεσογειακή βλάστηση, ακόμη κι αν δεν υπάρχουν πληροφορίες για την ένταση πυρκαγιάς του κάθε καμένου τμήματος, είναι εμπειρικά γνωστό πως τέτοιες περιοχές είναι επιρρεπείς στη φωτιά και όταν καίγονται, καίγονται ολοσχερώς. Έτσι, δάσοι κωνοφόρων, φυσικοί βοσκότοποι, σκληροφυλλική βλάστηση, μεταβατικές δασώδεις- θαμνώδεις εκτάσεις θα είναι άγονες μετά τη πυρκαγιά, με ποσοστό κάλυψης 0% και τιμές CN για τις ομάδες υδροπερατότητας A, B, C και D 77, 86, 91, 94 αντίστοιχα.

Όσον αφορά τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις, η συμπεριφορά τους διαφέρει ανάλογα με τη πρακτική καλλιέργειάς τους. Για παράδειγμα, όταν ασκούνται ορθές καλλιεργητικές πρακτικές (αμπελώνες), τότε κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς θα συμπεριφέρονται ως καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Αν έχουν παραμεληθεί ή εφαρμόζονται λάθος πρακτικές, θα συμπεριφέρονται ως

θαμνώδεις εκτάσεις. Συχνά, υπάρχει έλλειψη δεδομένων για την πραγματική κατάσταση αυτών των εκτάσεων. Γι' αυτό, θεωρείται ότι οι αμπελώνες συμπεριφέρονται ως χέρσες εκτάσεις, λαμβάνοντας τις τιμές από το πίνακα για τις ομάδες υδροπερατότητας A, B, C και D 76, 85, 90, 93, ενώ τα σύνθετα συστήματα καλλιέργειας ως λιβαδικές ή δασικές εκτάσεις, λαμβάνοντας τιμές αντίστοιχα 77, 89, 91,94.

Για τις αστικές χρήσεις γης (διακεκομμένη και μη αστική οικοδόμηση, χώροι οικοδόμησης), αυτές δεν μεταβάλλονται κάπως όσον αφορά τη κάλυψη τους μετά από πυρκαγιά, τότε και οι τιμές CN παραμένουν ίδιες.

Καθώς στην έρευνα του Goodrich και των συνεργατών του δεν λαμβάνονται υπόψιν οι συνθήκες υγρασίας εδάφους, για τη συγκεκριμένη εργασία λήφθηκαν υπόψιν στους υπολογισμούς του αριθμού CN οι σχέσεις που προκύπτουν από την μέθοδο SCS-Curve Number(εξ. 3.4, 3.5).

Έτσι, για τη εφαρμογή στη μελέτη περιοχής ο μεταπυρικός σταθμισμένης συντελεστής απορροής ( $CN_{pf}$ ) θα υπολογιστεί βάσει της παρακάτω εξίσωσης (Εξ. 3.29):

$$CN_{pf} = \sum_i p_i \left[ \left( \frac{\alpha CN_{afi,normal}}{\beta + \gamma CN_{afi,normal}} \right) \frac{CN_{pfi,normal}}{CN_{afi,normal}} \right] \quad \text{Εξ. 3.29}$$

Όπου,

$p_i$ , το ποσοστό καμένης ή μη καμένης έκτασης ως προς συνολική έκταση υπολεκάνης όπως και στη μέθοδο Παπαθανασίου,

$\alpha, \beta, \gamma$ , οι αδιάστατες παράμετροι που εξαρτώνται από τις εδαφικές συνθήκες υγρασίας και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.10. Οι ίδιες παράμετροι θα χρησιμοποιηθούν για την συνεκτίμηση των εδαφικών συνθηκών υγρασίας στους αρχικούς συντελεστές απορροής πριν τη φωτιά, όταν εφαρμόζεται η μέθοδος Goodrich για τον υπολογισμό των μεταπυρικών συντελεστών απορροής στην παρούσα εργασία.

Πίνακας 3.10: Παράμετροι εδαφικών συνθηκών υγρασίας της μεθόδου SCS- Curve Number.

	Παράμετροι εδαφικών συνθηκών υγρασίας		
Συνθήκες υγρασίας	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Κανονικές	1	1	0
Ξηρές	+ 0,42	1	-0,0058
Υγρές	+2,3	+1	+0,0013

Δηλαδή, ο σταθμισμένος συντελεστής απορροής πριν τη πυρκαγιά( $CN_{af}$ ) προκύπτει ως εξής (Εξ. 3.30):

$$CN_{af} = \sum_i p_i \left( \frac{aCN_{afi,normal}}{b + cCN_{afi,normal}} \right) \quad \text{Εξ. 3.30}$$

Τέλος, η συγκεκριμένη μέθοδος δεν εξετάζει τη μεταβολή των υδρολογικών παραμέτρων δυναμικά στο χρόνο όπως συμβαίνει στη διατριβή της Παπαθανασίου (Parathanasiou, 2018). Οι τιμές που προτάθηκαν αφορούν το σύντομο διάστημα αμέσως μετά τη πυρκαγιά.

## 3.4 Ανάλυση Ευαισθησίας με τη Μέθοδο Monte-Carlo

### 3.4.1 Γενικά

Η μέθοδος Monte Carlo είναι ένα στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιείται σε διαφορετικούς τομείς όπως τα χρηματοοικονομικά, τη διαχείριση έργων, την ενέργεια, τη κατασκευή, τη μηχανική, την έρευνα και ανάπτυξη, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, τις μεταφορές και το περιβάλλον.

Ιστορικά η μέθοδος αυτή έγινε ευρύτερα γνωστή από τους J. von Neumann και S. Ulam, σε μια έρευνα πάνω στις ατομικές βόμβες στον Δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο (Eckhardt R., 1987). Πρώτοεμφανίστηκε σε δημοσίευση στο περιοδικό Journal of the American Statistical Association, "The Monte Carlo Method" από τους Metropolis και Ulam το 1949.

Η προσομοίωση Monte Carlo προσδιορίζεται ως στατιστική προσομοιωτική μέθοδος. Στατιστική προσομοίωση ορίζεται οποιαδήποτε μέθοδος που χρησιμοποιεί σειρές τυχαίων αριθμών για να εκτελέσει την προσομοίωση (πχ. ρουλέτα του καζίνο). Εξάγει κατανομές πιθανών τιμών αποτελέσματος (κατανομή πιθανοτήτων), αφού πρώτα αντικαταστήσει ένα εύρος τιμών (κατανομή πιθανότητας) για οποιοδήποτε παράγοντα που έχει εγγενή αβεβαιότητα. Έπειτα, ακολουθεί επαναληπτική διαδικασία που χρησιμοποιεί κάθε φορά ένα διαφορετικό σύνολο τυχαίων τιμών από τις συναρτήσεις πιθανότητας, υπολογίζει και καταγραφεί τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Το  $n$  πλήθος των επαναλήψεων εξαρτάται από τον αριθμό των παραμέτρων που εξετάζονται και από τα πεδία που καθορίζονται για αυτές και συνήθως είναι μεγάλο (πάνω από 1000 προσομοιώσεις), προκειμένου εξαχθούν στατιστικά αξιόπιστα αποτελέσματα (Πολύζος, 2013).

Αν και τα αποτελέσματα δεν είναι πάντα προσεγγιστικά, η μέθοδος Monte Carlo αποτελεί την μόνη λύση όταν η εφαρμογή αναλυτικών μεθόδων είναι ανέφικτη ή δυσχερής, καθώς δεν

απαιτεί απλόποιητικές παραδοχές ή πληρότητα δεδομένων. Η μέθοδος πλεονεκτεί σε σχέση με τη ντετερμινιστική ανάλυση καθώς μπορεί να παράγει ( [www.palisade.com](http://www.palisade.com) ) :

- Πιθανολογικά Αποτελέσματα, που δείχνουν όχι μόνο τι θα μπορούσε να συμβεί, αλλά και πόσο πιθανό είναι το κάθε αποτέλεσμα.
- Γραφικά Αποτελέσματα διαφορετικών αποτελεσμάτων και πιθανοτήτων εμφάνισής τους.
- Ανάλυση ευαισθησίας, όπου ποσοτικοποιείται η επίδραση της κάθε παραμέτρου, συγκρίνονται οι δείκτες ευαισθησίας και δείχνονται ποιες εισροές είχαν υψηλότερη επίδραση στα τελικά αποτελέσματα, μία διαδικασία που στην ντετερμινιστική ανάλυση καθίσταται δύσκολη.
- Ανάλυση σεναρίου, όπου υπάρχει πρόσβαση στις τιμές των παραμέτρων που καταλήγουν σε συγκεκριμένα αποτελέσματα. Αντιθέτως, στη προσπάθεια ανάλυσης ευαισθησίας στα ντετερμινιστικά μοντέλα συναντάται δυσκολία μοντελοποίησης διαφορετικών συνδυασμών τιμών για διαφορετικές εισόδους για την παραγωγή εξόδων διαφορετικών σεναρίων. Η προσομοίωση Monte Carlo έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση ευαισθησίας από πολλούς ερευνητές (Gardner et al., 1980; Hornberger and Spear, 1981; Kung, 1989; Harlin and Hung, 1992).
- Συσχέτιση Εισροών, όπου εξετάζονται εύκολα αλληλεξαρτώμενες σχέσεις μεταξύ παραμέτρων εισόδου, δηλαδή η θετική ή αρνητική συσχέτιση μεταξύ ζευγών παραμέτρων.

### 3.4.2 Monte Carlo και υδρολογία

Η επιστημονική κοινότητα έχει εστιάσει το ενδιαφέρον της στην έντονη αβεβαιότητα πρόβλεψης των πλημμυρών, που προκύπτουν από εγγενείς αβεβαιότητες στα υδρολογικά και υδραυλικά δεδομένα εισόδου (Efstratiadis et al., 2014), στους αλγόριθμους διόδευσης πλημμύρας (Dimitriadis et al., 2016) όπως και λανθασμένες μετρήσεις και αβεβαιότητες στη δομή των μοντέλων. Συχνά φαινόμενο αποτελεί κατά την εφαρμογή μοντέλων πλημμύρας να λαμβάνεται μόνο η περίοδος επαναφοράς ως παράμετρος αβεβαιότητας (Efstratiadis et al., 2014). Για τη βελτίωση των προβλέψεων πλημμυρικών γεγονότων λοιπόν, καθίσταται αναγκαία η εστίαση στη ποσοτικοποίηση της ευαισθησίας των παραμέτρων της πλημμύρας.

Στα έντονα μη γραμμικά μοντέλα, όπως είναι αυτά που προσομοιώνουν τις υδρολογικές διεργασίες, δεν είναι εύκολο να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της αβεβαιότητας των παραμέτρων στο παραγόμενο υδρογράφημα και στις επιμέρους συνιστώσες του (πλημμυρική αιχμή και πλημμυρικός όγκος) ή να προσδιοριστεί η συνδυασμένη επίδραση δύο παραμέτρων



στο αποτέλεσμα με τις κλασικές γραμμικές μεθόδους. Γι' αυτό, σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει να χρησιμοποιηθούν άλλες προσεγγίσεις, όπως είναι η προσομοίωση Monte Carlo.

Η μέθοδος Monte Carlo έχει εφαρμοστεί συχνά σε θέματα σχετικά με την υδρολογία πλημμυρών. Πιο συγκεκριμένα, τις τελευταίες τρεις δεκαετίες έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε εφαρμογές για την υδρολογική προσομοίωση και την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου σε πολλές περιοχές της ευρωπαϊκής ηπείρου, αλλά και σε λεκάνες της Βόρειας Αμερικής (Vogel et. al., 2001).

Οι Harlin and Kung (1992), προσδιόρισαν την ευαισθησία του αποτελέσματος του μοντέλου σε κάθε παράμετρο, διερευνώντας την πιθανότητα να οδηγηθούν σε ικανοποιητική προσομοίωση με μία συγκεκριμένη τιμή μιας παραμέτρου. Η προσομοίωση Monte Carlo έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την απάντηση του αντίστροφου ερωτήματος, δηλαδή πόσο μεγάλο είναι το διάστημα για κάθε παράμετρο στο οποίο υπάρχει πιθανότητα να λάβουμε ικανοποιητική προσομοίωση (Seibert, 1997).

### 3.4.3 Μεθοδολογία

Στην παρούσα εργασία θα ποσοτικοποιηθεί η επίδραση διάφορων πηγών αβεβαιότητας που επηρεάζουν την απορροή μετά από πυρκαγιά, μέσω εφαρμογής της μεθόδου Monte Carlo. Σε κάθε προσομοίωση αρχικά, εισάγονται αυτόχρονα τυχαίες τιμές υδρολογικών, τοπογραφικών παραμέτρων αλλά και παραμέτρων που σχετίζονται με τις συνθήκες υγρασίας του εδάφους και τα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς. Ως αποτέλεσμα της κάθε επανάληψης, παράγεται και καταγράφεται μία μεταπυρική παροχή εξόδου. Ακολουθεί ανάλυση ευαισθησίας της παροχής σε σχέση με τις όλες τις μεταβλητές εισόδου, χρησιμοποιώντας τυπική στατιστική ανάλυση. Συγκεκριμένα, σε περιβάλλον Microsoft Excel, για τις N προσομοιώσεις υπολογίζονται τα κύρια στατιστικά χαρακτηριστικά, εξάγονται q-q και box-plots, όπως και γραφήματα του συντελεστή διακύμανσης της παροχής εξόδου σε σχέση με όλες τις παραμέτρους εισόδου.

#### Βηματισμοί

##### 1 Καθορισμός εξίσωσης

Για τον υπολογισμό της παροχής στην έξοδο της λεκάνης θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση 3.1. της Ορθολογικής Μεθόδου. Για τη μέση ένταση της βροχόπτωσης,  $i$ , θα χρησιμοποιηθεί η συναρτησιακή σχέση των όμβριων καμπύλων (Εξ. 3.2), λαμβάνοντας τις παραμέτρους  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  από τον πίνακα 3.1 ( $\xi = 0,07$ ,  $\eta = 0,73$ ,  $\alpha = 0,1$  h και  $\beta = 0,07$  years). Έτσι, προκύπτει η εξίσωση 3.31:

$$i = \frac{\lambda (T/0,07)^{0,07} - 1}{(1 + k/0,1)^{0,73}} \quad \text{Εξ. 3.31}$$

Για τον υπολογισμό του μεταπυρικού συντελεστή απορροής στην εξίσωση, αρχικά θεωρείται ένας σταθμισμένος, μέσος συντελεστής απορροής για την υδρολογική λεκάνη πριν τη πυρκαγιά. Στη συνέχεια, υπολογίζονται ξεχωριστά οι συντελεστές για το καμένο τμήμα και το μη καμένο τμήμα. Το άθροισμα τους αποτελεί τον τελικό συντελεστή απορροής (Εξ.3. 32) . Έτσι,

$$CN_{total} = CN_{burned} + CN_{unburned} \Rightarrow \quad \text{Εξ. 3.32}$$

$$CN_{total} = p_i CN_{pf} + (1 - p_i) CN_{in} \quad \text{Εξ. 3.33}$$

Όπου,

$CN_{total}$ , ο τελικός συντελεστής απορροής της θεωρητικής λεκάνης,

$CN_{burned}$ , ο σταθμισμένος συντελεστής απορροής καμένης έκτασης,

$CN_{unburned}$ , ο σταθμισμένος συντελεστής απορροής μη καμένης έκτασης,

$p_i$ , το ποσοστό καμένης έκτασης ως προς συνολική έκταση λεκάνης,

$CN_{pf}$ , ο συντελεστής απορροής μεταπυρικά κατά Παπαθανασίου,

$CN_{in}$ , ο συντελεστής απορροής για την έκταση που δεν έχει καεί.

Όλοι οι συντελεστές έχουν εύρος 0-100%.

Ο υπολογισμός του συντελεστή απορροής μεταπυρικά ( $CN_{pf}$ ) γίνεται σύμφωνα με τη μέθοδο Παπαθανασίου, σε σχέση με τις πιθανές συνθήκες εδαφικής υγρασίας (εξίσωση 3.7, πίνακας 3.6) και σε σχέση με τις πιθανές κλάσεις εντάσεως της πυρκαγιάς (εξίσωση 3.10, πίνακας 3.8). Ο συντελεστής θα υπολογιστεί για δύο χρονικά παράθυρα, για τον 1<sup>ο</sup> και τον 12<sup>ο</sup> μήνα μετά το συμβάν της πυρκαγιάς, δηλαδή για  $t = 1 \text{ month}$  και  $t = 12 \text{ month}$ . Η παράμετρος  $c$  που εξαρτάται από τις εδαφικές συνθήκες υγρασίας παραλείπεται γιατί είναι μονάδα. Έτσι, τελικά προκύπτει (Εξ. 3.34),

$$CN_{pf} = (CN_{af} + a \ln(t) + b) + d \quad \text{Εξ. 3.34}$$

Για τον μέσο σταθμισμένο συντελεστή απορροής πριν τη πυρκαγιά ( $CN_{in}$ ) λαμβάνονται υπόψιν οι τρεις πιθανές συνθήκες υγρασίας (ξηρές, κανονικές, υγρές), επίσης σύμφωνα με τη Παπαθανασίου. Έτσι, προκύπτει (Εξ. 2.32),

$$CN_{in} = CN_{af} + d \quad \text{Εξ. 3.35}$$

Ο τελικός συντελεστής απορροής μεταπυρικά δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$CN_{total} = p_i [(CN_{af} + a \ln(t) + b) + d] + (1 - p_i)(CN_{af} + d) \quad \text{Εξ. 3.36}$$

Τελικά, η εξίσωση της μεταπυρικής παροχής  $Q$  ( $m^3/s$ ) προκύπτει ως εξής:

$$Q = \{p_i[(CN_{af} + a \ln(t) + b) + d] + (1 - p_i)(CN_{af} + d)\} \frac{[\lambda (T/0,07)^{0,07} - 1]}{(1+k/0,1)^{0,73}} A \quad \text{Εξ. 3.37}$$

## 2 Ρυθμίσεις παραμέτρων

Από την τελική εξίσωση 3.37 προκύπτει ότι οι παράμετροι που θα λάβουν τυχαίες τιμές για 9000 προσομοιώσεις και θα εξάγουν 9000 διαφορετικές παροχές εξόδου είναι οι ακόλουθες:  $p_i$ ,  $CN_{af}$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $d$ ,  $\lambda$ ,  $T$ ,  $k$  και  $A$ . Απ' αυτές, οι παράμετροι  $p_i$ ,  $CN_{af}$ ,  $T$ ,  $k$  και  $A$  είναι συνεχείς μεταβλητές, ενώ οι  $a$ ,  $b$ ,  $d$  και  $\lambda$  διακριτές.

Για τις συνεχείς μεταβλητές, οι ανεξάρτητες τυχαίες τιμές προκύπτουν από την ομοιόμορφη κατανομή στο εύρος τιμών της κάθε μίας μεταβλητής και με αντίστοιχο βηματισμό εμφάνισης. Το εύρος για ορισμένες τιμές είναι προκαθορισμένο, ενώ για άλλες θεωρείται εμπειρικά ένα ανώτατο και κατώτατο όριο που μπορεί να αλλάζει ανάλογα με την εφαρμογή μελέτης. Μαζί με τον προσδιορισμό βηματισμού, αποφεύγεται ένα τεράστιο πλήθος πιθανών τιμών εισόδου και προκύπτουν αποτελέσματα ρεαλιστικά, αξιόπιστα και ακριβή.

Για τις υπό εξέταση διακριτές μεταβλητές, για κάθε μία εξ' αυτών υπάρχει διαφορετικό  $n$  πλήθος ισοκατανεμημένων διακριτών τιμών, που αποτελούν ενδεχόμενα εμφάνισης για κάθε προσομοίωση. Τα έυρη τιμών και οι βηματισμοί εμφάνισης για όλες τις παραμέτρους εισόδου παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα 3.11.

Πίνακας 3.11: Παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση ευαισθησίας και το εύρος πιθανών τιμών τους.

Παράμετροι	Σύμβολα και μονάδες μέτρησης	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Βήμα
ποσοστό καμένης έκτασης ως προς τη συνολική έκταση λεκάνης	<b><math>p_i</math> (%)</b>	0	1	0.1
Συντελεστής απορροής πριν τη πυρκαγιά	<b><math>CN_{af}</math> (%)</b>	0	1	0.01
Περίοδος επαναφοράς	<b><math>T</math> (y)</b>	10	1000	10
Διάρκεια βροχής	<b><math>k</math> (h)</b>	0.5	24	0.5
Έκταση λεκάνης απορροής	<b><math>A</math> (km<sup>2</sup>)</b>	0.5	10000.5	100
Ζεύγος παραμέτρων που εξαρτώνται από την ένταση πυρκαγιάς	<b><math>a</math> (-)</b>	[-8.31, -7.33, -6.55, -3.25]		
	<b><math>b</math> (-)</b>	[+36.17, +29.26, +22.63, +11.32]		
Παράμετρος που εξαρτάται από τις συνθήκες εδαφικής υγρασίας	<b><math>d</math> (-)</b>	[0, -7, +7]		
Συντελεστής που εξαρτάται από το ποσοστό επιφάνειας της λεκάνης απορροής που είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο υψομετρικά από 160 m	<b><math>\lambda</math> (mm/h)</b>	[579, 445]		

Πιο αναλυτικά για τα εύρη τιμών,

- Το ποσοστό  $p_i$  αποτελεί χαρακτηριστικό της πυρκαγιάς και είναι το ποσοστό καμένης έκτασης ως προς συνολική έκταση της υδρολογικής λεκάνης Έχει εύρος τιμών [0, 1] με βήμα εμφάνισης 0.1, δηλαδή το πλήθος των ενδεχομένων είναι 11.
- Ο συντελεστής  $CN_{af}$  αποτελεί την υδρολογική παράμετρο του συντελεστή απορροής με εύρος τιμών [0, 1] και βήμα εμφάνισης 0.01, δηλαδή το πλήθος ενδεχομένων είναι 101.
- Οι συντελεστές  $a$ ,  $b$  είναι αδιάστατες παράμετροι που εξαρτώνται από την ένταση της πυρκαγιάς και αλλάζουν ταυτόχρονα σαν ζεύγος. Παίρνουν τιμές σύμφωνα με τον πίνακα 3.8. Το εύρος τιμών τους δηλαδή είναι για τον συντελεστή  $a$  [-8.31; -7.33; -6.55; -3.25] και για τον συντελεστή  $b$  [+36.17; +29.26; +22.63; +11.32].

- Ο συντελεστής  $d$  είναι αδιάστατη παράμετρος που εξαρτάται από τις εδαφικές συνθήκες υγρασίας και λαμβάνει τιμές σύμφωνα με τον πίνακα 3.6. Το εύρος τιμών του είναι: [0; -7; +7].
- Ο συντελεστής  $\lambda$  (mm/h) εξαρτάται από το ποσοστό επιφάνειας της λεκάνης απορροής που είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο υψομετρικά από τα 160 m και οι τιμές του λαμβάνονται απ'ο τον πίνακα 3.1. Το εύρος του δηλαδή είναι [579; 445].
- Για τη περίοδο επαναφοράς  $T$  (years), επιλέχθηκε ένα διάστημα που περιέχει το πιο ευμενές ( $T= 50$  έτη) και το πιο δυσμενές σενάριο εμφάνισης πλημμύρας ( $T = 1000$  έτη). Το εύρος τιμών είναι [10, 1000 ] και το βήμα εμφάνισης της παραμέτρου είναι ανά 10 χρόνια, δηλαδή το πλήθος ενδεχομένων είναι 101.
- Για τη διάρκεια βροχής  $k$  (h), επιλέχθηκε εύρος τιμών [0.5, 24] με βήμα εμφάνισης τις 0.5 ώρες. Η ανώτατη τιμή των 24 ωρών χρησιμοποιείται συχνά για το σχεδιασμό υετογραφημάτων.
- Για την έκταση της λεκάνης  $A$ (km<sup>2</sup>), θωρήθηκε ότι οι τιμές της κυμαίνονται στο διάστημα [0.5, 10000.5] με βήμα εμφάνισης τα 100 km<sup>2</sup>. Η ανώτερη τιμή τέθηκε λαμβάνοντας υπόψιν τη μεγαλύτερη λεκάνη απορροής της Ελλάδας, αυτή του Αλιάκμονα (12410km<sup>2</sup>) (geodata.gov.gr).

### 3 Εφαρμογή προσομοιώσεων και εξαγωγή των παροχών

Στη συνέχεια, για τη δειγματοληψία τυχαίων τιμών από τα παραπάνω εύρη των παραμέτρων εισόδου χρησιμοποιήθηκαν σε περιβάλλον Excel: για τις συνεχείς μεταβλητές, η συνάρτηση RAND() συνδυαστικά με τη συνάρτηση VLOOKUP(), ενώ για τις διακριτές, οι RANDBETWEEN() μαζί με την IF(). Χαρακτηριστικό της RAND() όσο και της RANDBETWEEN() είναι πως κάθε φορά που υπολογίζεται το φύλλο εργασίας, αποδίδεται ένας νέος τυχαίος αριθμός.

Αναλυτικά, η συνάρτηση RAND() επιστρέφει έναν τυχαίο αριθμό ομοιόμορφης κατανομής, που είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 0 και μικρότερος του 1. Στη συνέχεια, μέσω της VLOOKUP(), γίνεται αναζήτηση της τυχαία τιμής της RAND() στη στήλη που περιέχει όλες τις πιθανές τιμές της υπό εξέταση παραμέτρου και θα επιστραφεί η τιμή της παραμέτρου που ταιριάζει περισσότερο με τη τυχαία τιμή.

Η συνάρτηση RANDBETWEEN() επιστρέφει έναν τυχαίο ακέραιο αριθμό, μεταξύ δύο δεδομένων αριθμών. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται η συνάρτηση IF() για να εμφανίσει τη τιμή του εύρους με την οποία η τυχαία τιμή έχει αντιστοιχία. Αυτό γίνεται χωρίζοντας το εύρος τιμών σε ισομεγέθη διαστήματα.

Η ταυτόχρονη αλλαγή όλων των παραμέτρων εισόδου και παράλληλα ο υπολογισμός της μεταπυρικής παροχής (εξ. 3.37) πραγματοποιείται για 9000 σενάρια, ώστε να διασφαλιστεί

μια ικανοποιητική ακρίβεια στις στατιστικές εκτιμήσεις και να αποφευχθεί το υπερβολικό υπολογιστικό κόστος (Dimitriadis et. al., 2016).

#### 4 Υπολογισμός κινούμενων όρων

Ακολουθούν οι υπολογισμοί των κινούμενων μέσων όρων, της κινούμενης τυπικής απόκλισης και του κινούμενου συντελεστή διακύμανσης για τις 9000 παροχές. Στόχος είναι να φτάσουν σε συγκεκριμένες σταθερές τιμές μετά από ένα πλήθος προσομοιώσεων. Για τον υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών, παραμένει σταθερή η πρώτη τιμή και προστίθεται κάθε φορά μία νέα τιμή μέχρι να προστεθεί και η τελευταία 9000ή τιμή στους υπολογισμούς. Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για τη μέση τιμή, τη τυπική απόκλιση είναι οι AVERAGE() και STDEV(). Ο συντελεστής διακύμανσης αποτελεί το πηλίκο της τυπικής απόκλισης ως προς τη μέση τιμή.

#### 5 Υπολογισμός μέτρων λοξότητας, κύρτωσης και συντελεστή μεταβλητότητας

Οι συντελεστές λοξότητας και κύρτωσης περιγράφουν τη μορφή της δειγματος των παροχών που έχουν εξαχθεί. Συγκεκριμένα, εξάγουν συμπεράσματα για το είδος της συμμετρίας της και την αιχμηρότητα της καμπύλης. Ο δε συντελεστής μεταβλητότητας εκφράζει την ομοιογένεια του δείγματος. Για τον υπολογισμό του συντελεστή λοξότητας και κύρτωσης σε περιβάλλον Excel χρησιμοποιούνται οι συναρτήσεις SKEW() και KURT().

#### 6 Κατασκευή θηκογραμμάτων (box plots) και q-q plots

Μέσω των box plots και των q-q plots, αποτυπώνονται γραφικά τα κυριότερα στοιχεία της κατανομής που υπολογίστηκαν και παραπάνω.

Για την κατασκευή του box plot, αρχικά γίνεται εκτίμηση της 1<sup>ης</sup> (Q1), της 3<sup>ης</sup> τεταρτητόμου (Q3) και της διαμέσου σε περιβάλλον Excel με τη χρήση των συναρτήσεων QUARTILE.EXC() και MEDIAN(). Κατασκευάζεται λοιπόν, ένα ορθογώνιο με αυθαίρετο μήκος βάσεων, με κάτω βάση στη Q1 και πάνω βάση στη Q3. Ακόμη, χαράσσονται δύο ευθείες ως συνέχεια του θηκογράμματος από το μέσον των βάσεων: η άνω οριακή τιμή που ισούται με  $Q3 + 1,5(Q3 - Q1)$  και η κάτω οριακή τιμή που ισούται με  $Q1 - 1,5(Q3 - Q1)$ . Οι τιμές που βρίσκονται εκτός του εύρους των οριακών τιμών ονομάζονται εξωτερικές τιμές και παριστάνονται ως σημεία. Εσωτερικά του ορθογωνίου, απεικονίζεται η διάμεσος ως ευθεία παράλληλη στις βάσεις και η μέση τιμή της κατανομής σημειοκά.

Έτσι, σ' ένα θηκόγραμμα εντός του ορθογωνίου δίνεται το κεντρικό διάστημα με το 50% των παρατηρήσεων, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές και η θέση της διαμέσου μας μπορούν να περιγράψουν τη συμμετρία της κατανομής της μεταβλητής (Ραπτάκη, 2017).

Η κατασκευή γραφικών παραστάσεων των δειγματικών ποσοστημορίων (άξονας  $y$ ) ως προς τα θεωρητικά ποσοστημόρια (άξονας  $x$ ) της κανονικής κατανομής μπορεί να δείξει αν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προέρχονται από την κανονική κατανομή. Συγκεκριμένα, η προσαρμογή είναι καλή, όταν τα δειγματικά ποσοστημόρια είναι κοντά στην γραμμή, που αναπαριστά τα θεωρητικά ποσοστημόρια (Φουσκάκης, 2022).

Τα βήματα για τον υπολογισμό των θεωρητικών ποσοστημορίων στο Excel είναι: 1) η κατάταξη των παροχών σε αύξουσα σειρά, μέσω της συνάρτησης RANK.AVG(), 2) Ο υπολογισμός των εκατοστομηρίων, μέσω της εξίσωσης  $(x_i - 0,5)/n$ , όπου  $x_i$  η θέση της τιμής όπως προέκυψε από το βήμα (1) και  $n$  το πλήθος των δεδομένων, 3) Ο υπολογισμός των κανονικών θεωρητικών ποσοστημορίων με τη χρήση της συνάρτησης NORM.S.INV() για κάθε εκατοστημόριο που προέκυψε από το βήμα (2).

Για τον υπολογισμό των δειγματοληπτικών ποσοστημορίων, χρησιμοποιήθηκε για όλες τις παροχές η συνάρτηση STANDARDIZE().

#### 7 Κατασκευή διαγραμμάτων ευαισθησίας ως προς κάθε παράμετρο εισόδου

Το τελευταίο βήμα για την ανάλυση ευαισθησίας είναι να αποτυπωθεί γραφικά η σχέση μεταξύ της ευαισθησίας της μεταβλητής παροχής σε σχέση με κάθε μεταβλητή εισόδου. Επειδή κάθε παράμετρος έχει διαφορετικές μονάδες, επιλέγεται η ευαισθησία να προσδιοριστεί με βάση τον συντελεστή διακύμανσης που είναι αδιάστατος συντελεστής. Συγκεκριμένα, θα υπολογιστεί ο συντελεστής διακύμανσης έναντι ομαδοποιημένων δειγμάτων κάθε μεταβλητής εισόδου. Η διαδικασία για κάθε παράμετρο είναι η εξής:

- Ταξινόμηση των παροχών και των τιμών εισόδου σε αύξηση σειρά με βάση τις τιμές εισόδου, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση SORT().
- Υπολογισμός των συντελεστών διακύμανσης για κάθε ομάδα δειγμάτων. Οι ομάδες είναι 3: ομάδα χαμηλών, ομάδα μεσαίων και ομάδα ψηλών τιμών. Για τις συνεχείς μεταβλητές, ο συντελεστής προκύπτει από κάθε μία ισομεγεθής συστάδα τιμών. Ενδεικτικά, για πλήθος προσομοιώσεων 9000 υπολογίζεται ο  $C_v$  για χαμηλές τιμές για τις πρώτες 3000 ταξινομημένες παροχές, για μεσαίες τιμές για τις επόμενες 3000 και για ψηλές για τις τελευταίες 3000. Για τις διακριτές μεταβλητές, θα εξαχθεί ο συντελεστής διακύμανσης των παροχών για κάθε διακριτή τιμή της παραμέτρου.
- Κατασκευή του διαγράμματος, όπου στον άξονα  $y$  δίνονται οι τιμές του συντελεστή διακύμανσης του βήματος 2 και στον άξονα  $x$  δίνονται οι τιμές των παραμέτρων



εισόδου, όπου για τις συνεχείς παραμέτρους δίνεται ο μέσος όρος για κάθε ισομεγέθη ομάδα τιμών, ενώ για τις διακριτές η κάθε διακριτή τιμή του εύρους.

## 4 Σενάρια για την εφαρμογή μελέτης

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η υδρολογική απόκριση της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης με βάση την αλληλεπίδραση της περιόδου επαναφοράς και των χαρακτηριστικών της πυρκαγιάς με τις εδαφικές συνθήκες υγρασίας, πριν και μετά την πυρκαγιά. Για το λόγο αυτό, ορίστηκαν διαφορετικά σενάρια μελέτης στα οποία διερευνάται η ποσοστιαία μεταβολή των παραμέτρων της παροχής αιχμής και του ομοιόμορφου βάθους ροής, κάτω από την επίδραση και την μεταβολή των παραγόντων που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Τα εν λόγω σενάρια μελέτης δημιουργήθηκαν με βάση όλες τις πιθανές εδαφικές συνθήκες πριν και μετά την πυρκαγιά. Οι πιθανές εδαφικές συνθήκες υγρασίας πριν και μετά την πυρκαγιά, χαρακτηρίζονται ως:

- 1 Κανονικές συνθήκες υγρασίας (Normal soil conditions)
- 2 Ξηρές συνθήκες υγρασίας (Dry soil conditions)
- 3 Υγρές συνθήκες υγρασίας (Wet soil conditions)

Κατ' επέκταση, προκύπτουν εννιά διαφορετικές περιπτώσεις σε ότι αφορά τις εν λόγω συνθήκες.

Σε κάθε σενάριο, υπολογίσθηκαν οι μεταπυρικές παροχές αιχμής και τα μεταπυρικά ομοιόμορφα βάθη ροής, για τέσσερις κλάσεις έντασης πυρκαγιάς ( $FS = i, ii, iii, iv$ ), οι οποίες επηρεάζουν την υδρολογική απόκριση της λεκάνης κατά τη μέθοδο Παπαθανασίου και για τρεις διαφορετικές μεταπυρικές περιόδους επαναφοράς ( $T = 50, 100$  και  $1000$  έτη), από την πλέον συνήθη ( $50$  έτη) ως την πλέον δυσμενή ( $1000$  έτη).

Για λόγους σύγκρισης και πληρότητας, παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα των υπολογισμών, όπως προέκυψαν και από την μέθοδο Goodrich.

Έχοντας εκτιμήσει τα μεγέθη των παροχών και των βαθών ροής πριν τη πυρκαγιά για τις 3 πιθανές εδαφικές συνθήκες υγρασίας, προκύπτουν τελικά οι μεταβολές των παροχών αιχμής και των ομοιομόρφων βαθών ροής πριν και μετά τη πυρκαγιά για τα 9 διαφορετικά σενάρια εδαφικών συνθηκών υγρασίας.

Σε κάθε μια από τις 9 περιπτώσεις, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί και στατιστική επεξεργασία για να διερευνηθεί η επίδραση στην παροχή αιχμής και στο ομοιόμορφο βάθος ροής της έντασης πυρκαγιάς, θεωρώντας σταθερή την μεταπυρική περίοδο επαναφοράς και ίση με  $50$  έτη, ως την πλέον τυπική περίπτωση. Επιπλέον, για να διερευνηθεί η επίδραση στην παροχή αιχμής και στο ομοιόμορφο βάθος ροής της περιόδου επαναφοράς

πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί και στατιστική επεξεργασία, θεωρώντας σταθερή την ένταση της πυρκαγιάς και ίση με  $FS = i$ , δηλαδή πολύ ισχυρή ένταση πυρκαγιάς.

Τα σενάρια μελέτης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Σενάρια μελέτης βάσει των εδαφικών συνθηκών υγρασίας πριν και μετά τη πυρκαγιά.

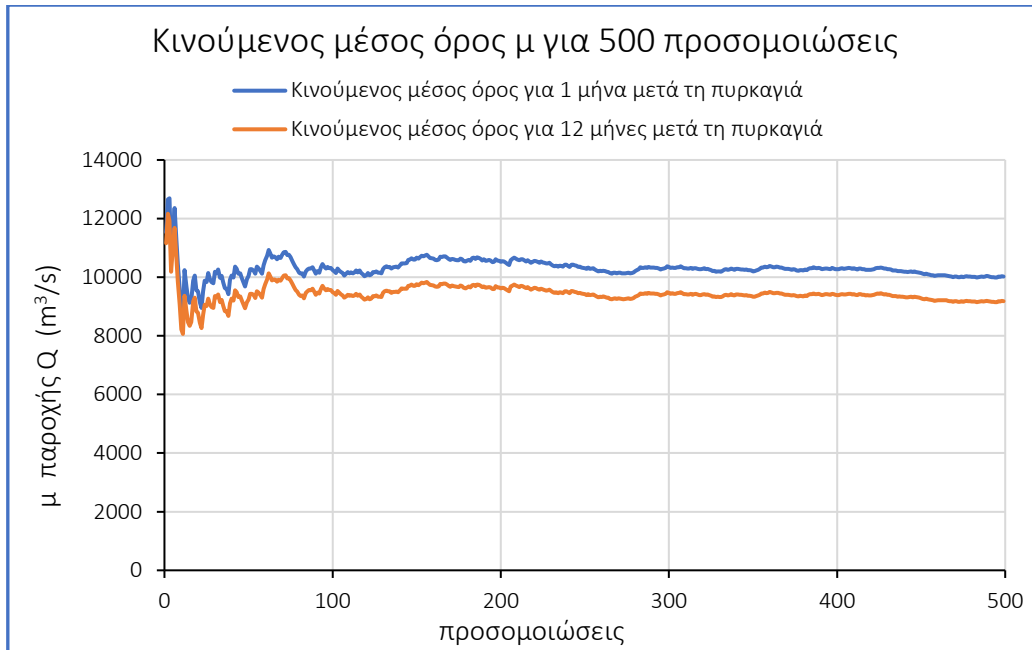
A/A	Εδαφική υγρασία πριν την πυρκαγιά	Εδαφική υγρασία μετά την πυρκαγιά
1	Κανονική	Κανονική
2	Κανονική	Ξηρή
3	Κανονική	Υγρή
4	Ξηρή	Κανονική
5	Ξηρή	Ξηρή
6	Ξηρή	Υγρή
7	Υγρή	Κανονική
8	Υγρή	Ξηρή
9	Υγρή	Υγρή

## 5 Αποτελέσματα

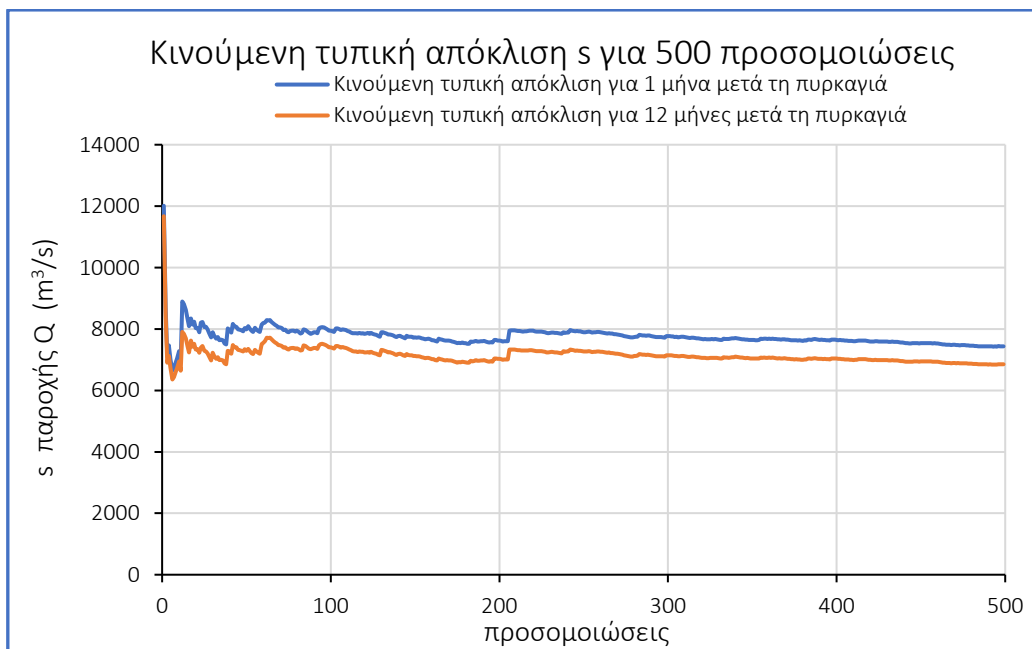
### 5.1 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρων που επηρεάζουν την υδρολογική απόκριση μετά από πυρκαγιά

Στο παρόν υποκεφάλαιο περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα της θεωρητικής εφαρμογής, δηλαδή τα αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας της μεταπυρικής παροχής ως προς διάφορες παραμέτρους που επιδρούν στην υδρολογική απόκριση μετά από πυρκαγιά. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 3.4.3, προέκυψαν συμπεράσματα τόσο για το υπό εξέταση δείγμα μεταπυρικών παροχών, όσο και για τον ποσοτικό προσδιορισμό της εκάστοτε παραμέτρου εισόδου στο μέγεθος της παροχής μετά από πυρκαγιά.

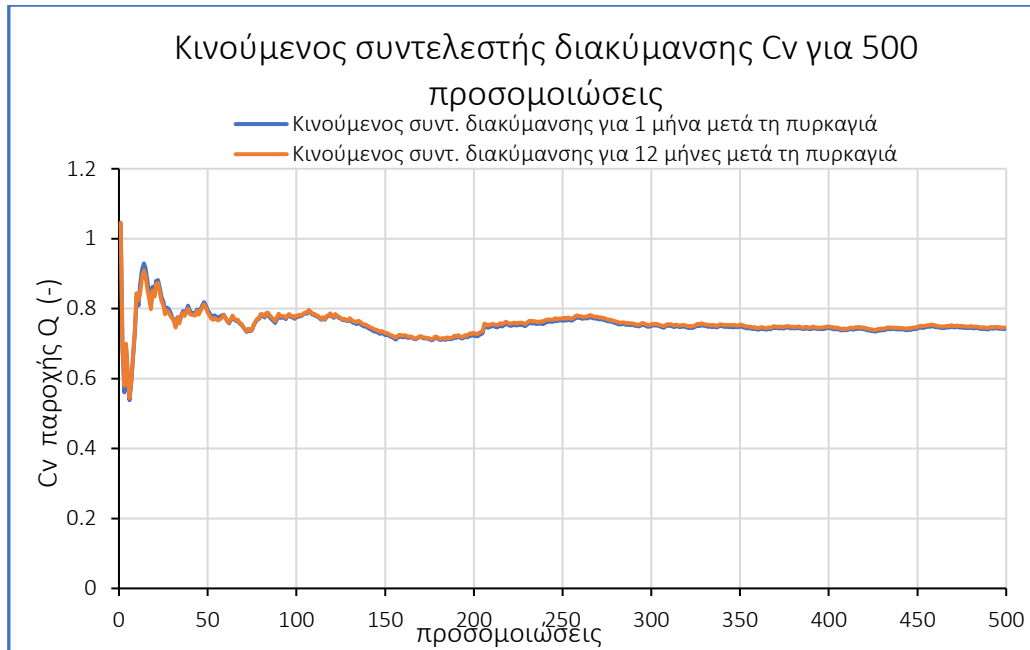
Αρχικά, υπολογίστηκαν και αποτυπώθηκαν σε διαγράμματα ο κινούμενος μέσος όρος, η κινούμενη τυπική απόκλιση και ο κινούμενος συντελεστής διακύμανσης για τις 9000 παροχές εξόδου. Αυτές προέκυψαν από τα 9000 σενάρια που πραγματοποιήθηκαν με τυχαίες τιμές παραμέτρων εισόδου όπως παρουσιάστηκε και στο κεφάλαιο 3.4.3. Δεδομένου ότι οι παράμετροι εισόδου είναι 8, πραγματοποιούνται 9000 προσομοιώσεις, ώστε προκύψουν ακριβείς στατιστικές εκτιμήσεις. Παρατηρήθηκε λοιπόν, σταθεροποίηση των στατιστικών μεγεθών στο πλήθος αυτό με τις τιμές να αρχίζουν να σταθεροποιούνται ήδη στις 500 προσομοιώσεις (Διαγράμματα 5.1, 5.2, 5.3). Η διαδικασία αυτή διαμορφώθηκε για δύο χρονικά παράθυρα: για 1 μήνα μετά από τη πυρκαγιά και για 12 μήνες μετά. Ο κινούμενος μέσος όρος για ένα μήνα μετά σταθεροποιήθηκε περίπου σε παροχή με τιμή  $9800 \text{ m}^3/\text{s}$  και η κινούμενη τυπική απόκλιση σε παροχή με τιμή περίπου ίση με  $7200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Οι αντίστοιχες τιμές για 12 μήνες μετά, όπως ήταν αναμενόμενο είναι σαφώς μειωμένες ( $8900 \text{ m}^3/\text{s}$  και  $6600 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Ο δε συντελεστής διακύμανσης σταθεροποιείται σε πολύ κοντινές τιμές τόσο για τον 1<sup>ο</sup> μήνα (0,73) όσο και για τον 12<sup>ο</sup> (0,74).



Διάγραμμα 5.1: Κινούμενος μέσος όρος  $\mu$  της παροχής  $Q$  ( $m^3/s$ ) για 500 προσομοιώσεις με τυχαίες τιμές των παραμέτρων εισόδου για 1 και 12 μήνες μετά τη πυρκαγιά.



Διάγραμμα 5.2: Κινούμενη τυπική απόκλιση  $s$  της παροχής  $Q$  ( $m^3/s$ ) για 500 προσομοιώσεις με τυχαίες τιμές των παραμέτρων εισόδου για 1 και 12 μήνες μετά τη πυρκαγιά.



Διάγραμμα 5.3: Κινούμενος συντελεστής διακύμανσης της παροχής  $Q$  ( $m^3/s$ ) για 500 προσομοιώσεις με τυχαίες τιμές των παραμέτρων εισόδου για 1 και 12 μήνες μετά τη πυρκαγιά.

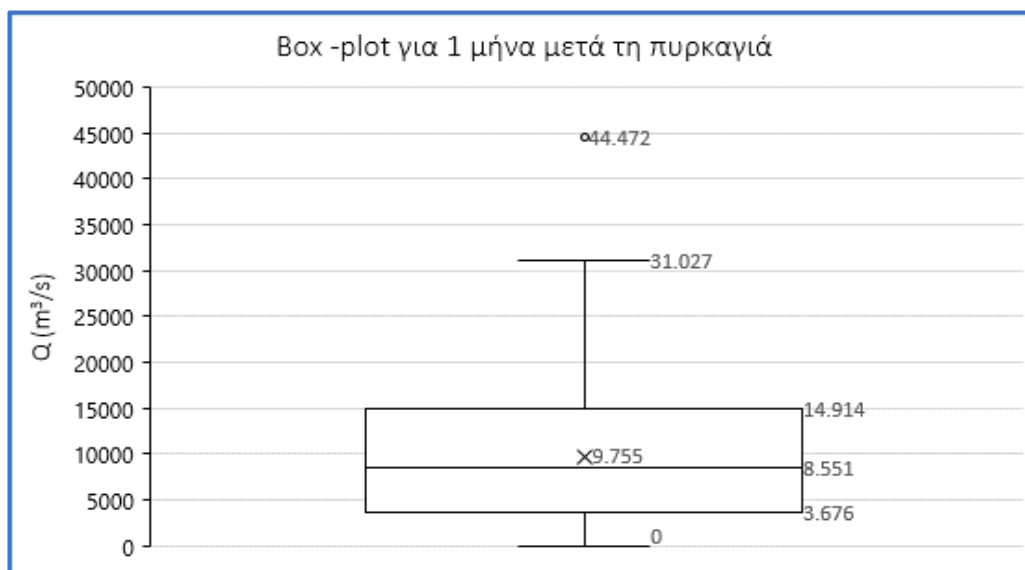
Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν βασικά στατιστικά μεγέθη για την ολοκληρωμένη περιγραφή της κατανομής του δείγματος των παροχών και τα αποτελέσματα- παρόμοια για τις χρονικές περιόδους των 1 και 12 μηνών- παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1. Προκύπτει λοιπόν, ένα δείγμα παροχών αρκετά ανομοιογενές (συντελεστής διακύμανσης  $C_v = 0,74 > 0,1$ ), με θετική ασυμμετρία, αφού ο συντελεστής λοξότητας λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του μηδέν. Τέλος, οι αρνητικές τιμές του συντελεστή κυρτότητας δείχνουν την κατανομή ως πλατύκυρτη, δηλαδή δεν έχει έντονη αιχμή προς το μέσο και οι περισσότερες παροχές δεν συγκεντρώνονται γύρω απ' αυτό.

Πίνακας 5.1: Στατιστικά μεγέθη του συνόλου δείγματος παροχών  $Q$  ( $m^3/s$ ).

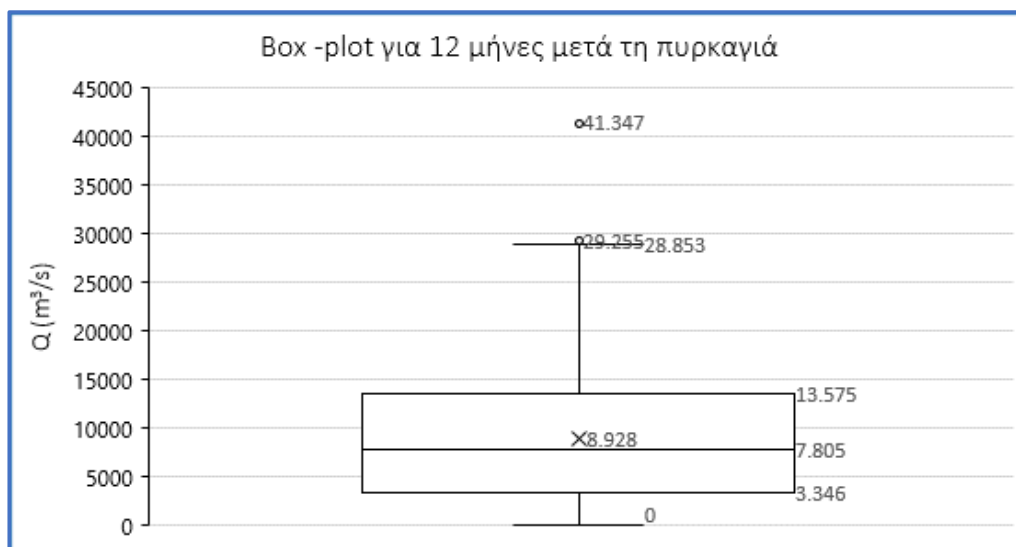
Μεταβλητή	Χρονική περίοδος μετά τη πυρκαγιά	Συντελεστής Διακύμανσης	Συντελεστής Λοξότητας	Συντελεστής Κύρτωσης
Παροχή $Q$ ( $m^3/s$ )	1 μήνας	0,74	0,64	-0,14
	12 μήνες	0,74	0,68	-0,02

Το είδος της κατανομής και η μορφή της απεικονίζονται και γραφικά μέσω των παρακάτω box-plots και q-q plots και για τις δύο χρονικές περιόδους (Διαγράμματα 5.4, 5.5, 5.6, 5.7). Στα θηκογράμματα οι τιμές των παροχών είναι συμμετρικές ως προς τη διάμετρο ( $8551 m^3/s$  για  $t = 1$  μήνα και  $7805 m^3/s$  για  $t = 12$  μήνες μετά), εξακριβώνοντας ότι το δείγμα ακολουθεί κανονική κατανομή. Το 50% των τιμών της κατανομής- παροχές εντός του ορθογώνιου παραλληλόγραμμου του box-plot- τείνουν κυρίως προς το χαμηλό όριο του δείγματος

δείχνοντας την ελαφρώς θετική ασυμμετρία του. Για ένα μήνα μετά τη πυρκαγιά συγκεκριμένα, το μισό πλήθος των παροχών κυμαίνεται από 3676 m<sup>3</sup>/s ως 14914 m<sup>3</sup>/s και για 12 μήνες μετά, από 3346 m<sup>3</sup>/s ως 1357 m<sup>3</sup>/s. Η ελάχιστη τιμή του δείγματος είναι προφανώς η μηδενική παροχή, ενώ η μέγιστη παροχή είναι 31027 m<sup>3</sup>/s για ένα μήνα μετά και 28853 m<sup>3</sup>/s για 12 μήνες μετά. Σημαντική είναι και η παρουσία έκτροπων τιμών στα θηκογράμματα και των δύο χρονικών παραθύρων που αναγράφονται με σημειακή σήμανση.



Διάγραμμα 5.4: Θηκόγραμμα της παροχής εξόδου  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) για 9000 προσομοιώσεις και για 1 μήνα μετά τη πυρκαγιά.

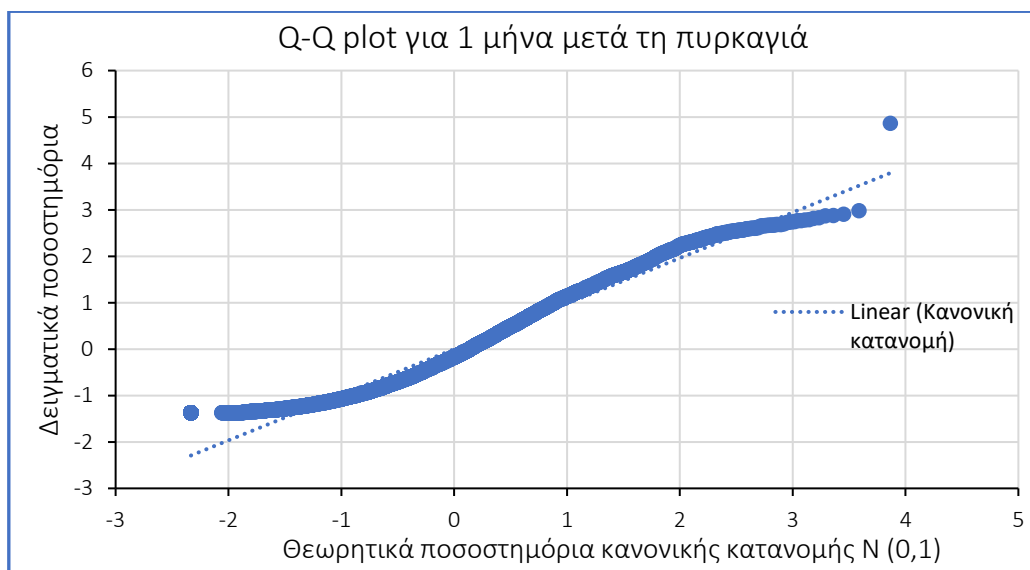


Διάγραμμα 5.5: Θηκόγραμμα της παροχής εξόδου  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) για 9000 προσομοιώσεις και για 12 μήνες μετά τη πυρκαγιά.

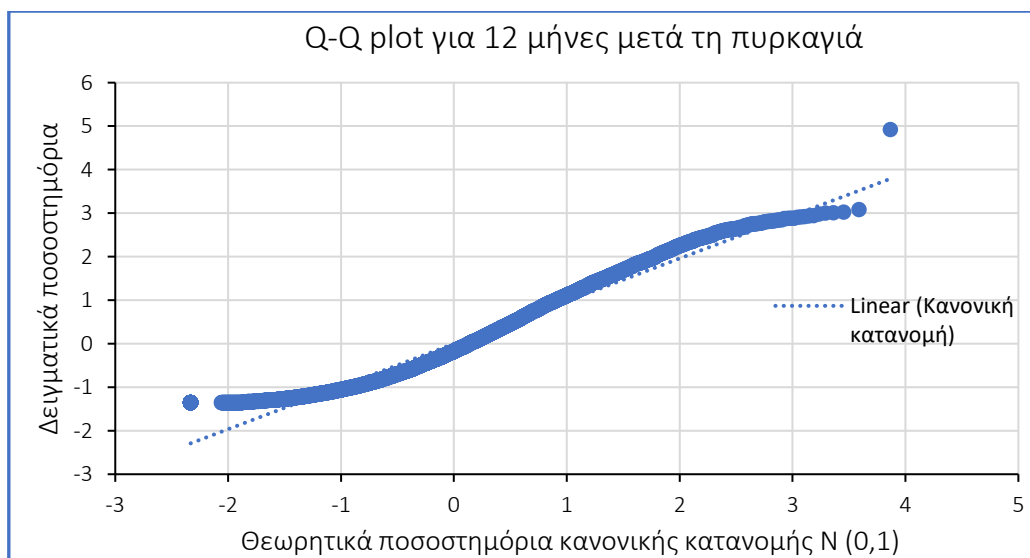
Στα qq-plots και των δύο χρονικών περιόδων φαίνεται ότι τα δειγματικά ποσοστημόρια πλησιάζουν τη γραμμή των θεωρητικών ποσοστημόριων κανονικής κατανομής στο



μεγαλύτερο τμήμα της, εκτός από τις ακραίες τιμές της κατανομής που παρουσιάζουν μικρές ουρές σε σχέση με τη γραμμή, χωρίς ωστόσο να παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις. Το δείγμα συνεπώς των 9000 παροχών ακολουθεί κανονική κατανομή. Όπως φαίνεται από την αριστερή ουρά του διαγράμματος, οι χαμηλές τιμές δεν είναι τόσο χαμηλές όσο προβλέπεται ενώ στη δεξιά ουρά, δηλαδή στις υψηλές τιμές του δείγματος υπάρχουν κάποιες ακραίες, ιδιαίτερα υψηλές τιμές (έκτροπες τιμές), όπως φαίνονται και στα θηκογράμματα παραπάνω. Τέλος, οι μικρές ουρές του δείγματος και οι μικρές αποκλίσεις από την γραμμή της κανονικής κατανομής αποδεικνύουν ξανά τη χαμηλή αιχμηρότητα της υπό μελέτη κατανομής.

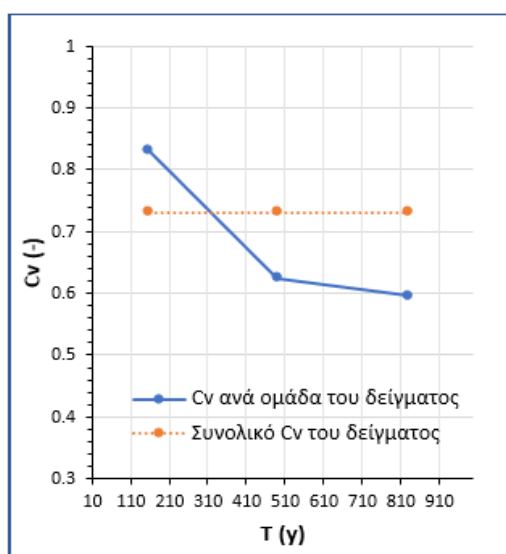


Διάγραμμα 5.6: Q-Q plot της παροχής εξόδου  $Q$  ( $m^3/s$ ) για 9000 προσομοιώσεις και για 1 μήνα μετά τη πυρκαγιά.

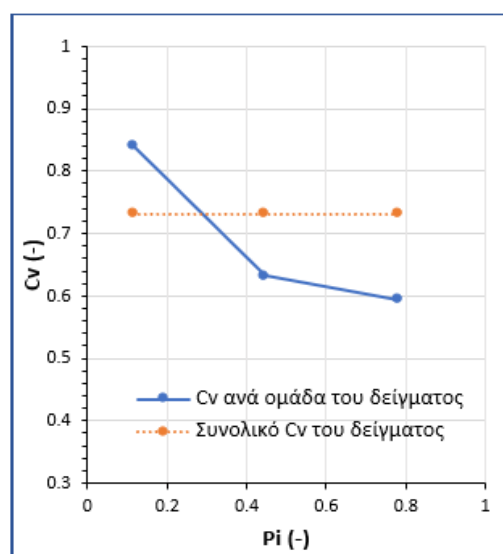


Διάγραμμα 5.7: Q-Q plot της παροχής εξόδου  $Q$  ( $m^3/s$ ) για 9000 προσομοιώσεις και για 12 μήνες μετά τη πυρκαγιά.

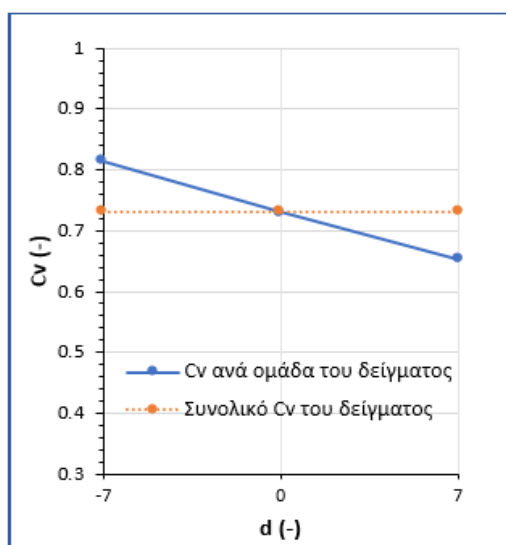
Για την ανάλυση ευαισθησίας της μεταπυρικής παροχής ως προς κάθε παράμετρο εισόδου και προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση αβεβαιότητας μεγεθών με διαφορετικές μονάδες μέτρησης, υπολογίστηκαν οι αδιάστατοι συντελεστές διακύμανσης των παροχών που προκύπτουν για κάθε παράμετρο. Επειδή τα αποτελέσματα ήταν σχεδόν ίδια για τις περιόδους των 1 και 12 μηνών μεταπυρικά, επαρκεί η παρουσίαση των γραφημάτων για το χρονικό παράθυρο του 1ου μήνα. Στη συνέχεια, αποτυπώθηκαν γραφικά στο παρακάτω διάγραμμα 4.8 μαζί με τους συντελεστές διακύμανσης για το σύνολο του δείγματος. Επειδή οι παράμετροι  $a$ ,  $b$  αποτελούν ζεύγος παραμέτρων που εξαρτώνται από την ένταση πυρκαγιάς, η συσχέτιση τους με τις παροχές εξόδου είναι κοινή και μπορεί να εκφραστεί μέσω του του διαγράμματος  $C_v$ -  $b$ .



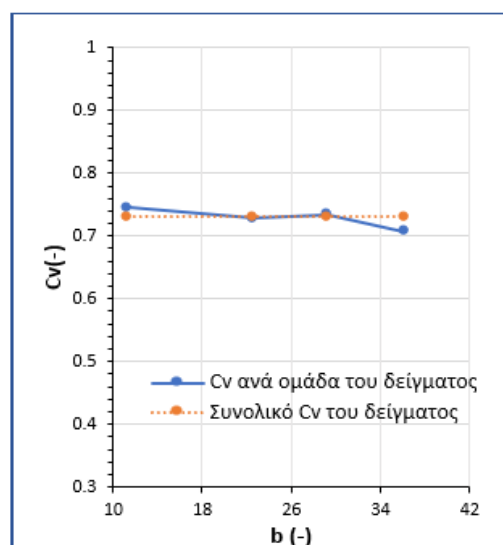
(α)



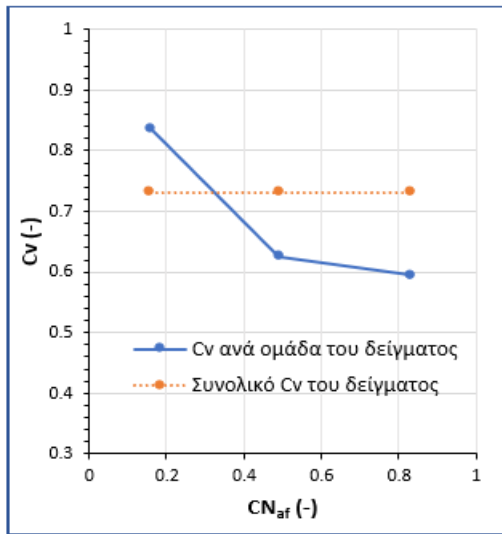
(β)



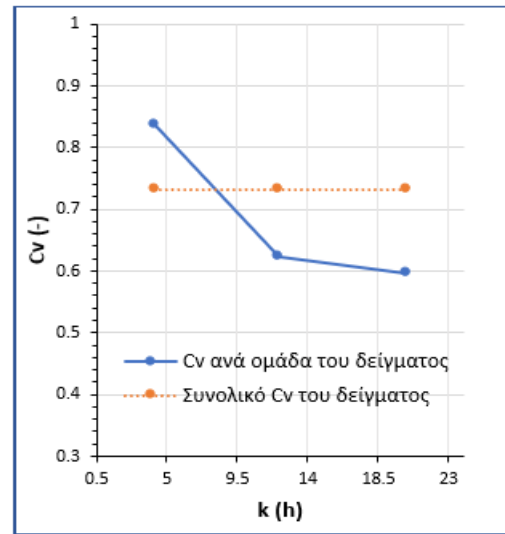
(γ)



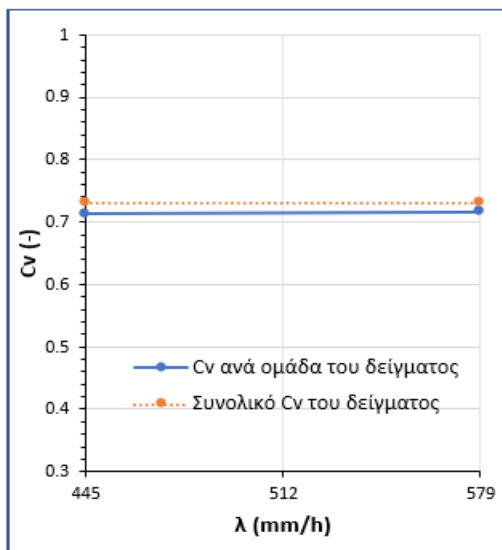
(δ)



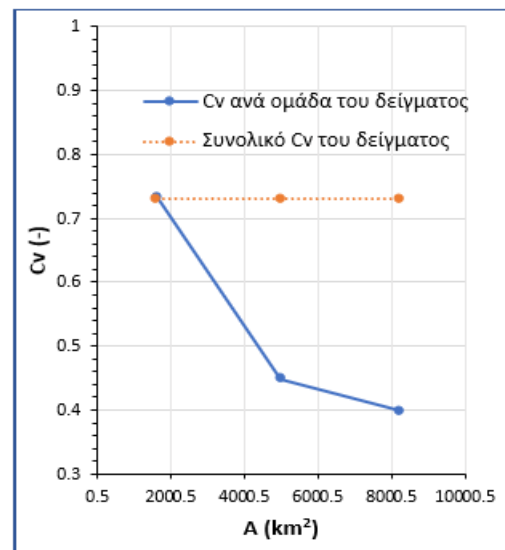
(ε)



(ζ)



(στ)



(η)

Διάγραμμα 5.8: Συντελεστής διακύμανσης  $C_v$  έναντι των ομαδοποιημένων παραμέτρων εισόδου.

Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα 5.8α παρουσιάζεται η ευσθησία της παροχής ένα μήνα μετά τη πυρκαγιά ως προς την παράμετρο  $T$  (years), περίοδο επαναφοράς, με τις μέσες τιμές ομάδων με χαμηλές, μεσαίες και ψηλές τιμές για εύρος πιθανών τιμών από 10 ως 1000 έτη. Ακολούθως, στο 5.8β ως προς το  $\rho_i$  (-), το ποσοστό καμένης έκτασης, με τις μέσες τιμές ομάδων με χαμηλές, μεσαίες και ψηλές τιμές για εύρος τιμών από 0 ως 1, στο 5.8γ ως προς τη παράμετρο  $d$  (-), που εξαρτάται από τις συνθήκες υγρασίας και λαμβάνει τιμές -7,0,+7, στο 5.8δ ως προς τη  $b$  (-) παράμετρο, που εξαρτάται από την ένταση της πυρκαγιάς και λαμβάνει τιμές +36.17, +29.26, +22,63, +11,32, στο 5.8ε ως προς τον αρχικό συντελεστή απορροής,  $CN_{af}$  (-), με τις μέσες τιμές ομάδων με χαμηλές, μεσαίες και ψηλές τιμές για εύρος από 0 ως 1, στο 5.8στ ως προς τη διάρκεια βροχής,  $k$  (h), με τις μέσες τιμές ομάδων με χαμηλές, μεσαίες και ψηλές τιμές για εύρος από 0.5 ως 24 ώρες, στο 5.8ζ ως προς το μέγεθος  $\lambda$  (mm/h), που

εξαρτάται από το ποσοστό επιφάνειας της λεκάνης απορροής που είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο υψομετρικά από 160 m και λαμβάνει τιμές 445 και 579 mm/h και στο 5.8η ως προς την έκταση λεκάνης απορροής,  $A$  ( $\text{km}^2$ ), με τις μέσες τιμές ομάδων με χαμηλές, μεσαίες και ψηλές τιμές για εύρος από 0.5 ως 10000.5  $\text{km}^2$ .

Σ' όλα τα διαγράμματα εκτός από εκείνα των συντελεστών  $b$  και  $\lambda$ , παρατηρείται μείωση του συντελεστή διακύμανσης, όσο αυξάνονται οι τιμές των παραμέτρων. Οι συντελεστές διακύμανσης της παροχής ως προς τις παραμέτρους εισόδου  $b$  και  $\lambda$  δεν μεταβάλλονται, όσο αλλάζουν οι τιμές τους (Διαγράμματα 5.8 δ, στ). Αυτό σημαίνει πρακτικά πως η παροχή αιχμής μεταπυρικά διατηρεί σταθερή συμπεριφορά, ανεξάρτητα από τις τιμές των δύο παραμέτρων, δηλαδή έχει μικρή ευαισθησία ως προς τα δύο μεγέθη.

Τα μεγέθη  $T$ ,  $p_i$ ,  $CN_{af}$  και  $k$  παρουσιάζουν παρόμοια εύρη συντ. διακύμανσης από 0,84- για την ομάδα χαμηλών τιμών των παραμέτρων εισόδου - ως 0,6 - για την ομάδα ψηλών τιμών (Διαγράμματα 5.8 α, β, ε, ζ).

Όσον αφορά την ευαισθησία της παροχής ως προς τον συντελεστή υγρασίας  $d$  (Διάγραμμα 5.8γ), παρουσιάζεται μία αναλογία μεταξύ ξηρών και υγρών συνθηκών. Η παροχή παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία ως προς τις ξηρές συνθήκες σε σχέση με τις υγρές.

Τέλος, ο συντελεστής διακύμανσης για το μέγεθος  $A$  είναι μικρότερος για όλες τις τιμές του από τον συνολικό συντελεστή διακύμανσης του δείγματος. Συγκεκριμένα, οι τιμές του συντ. διακύμανσης της παροχής ως προς την έκταση της λεκάνης κυμαίνονται από 0,74 για χαμηλές τιμές του  $A$  μέχρι 0,4 για ψηλές τιμές του  $A$  (Διάγραμμα 5.8η).

## 5.2 Αποτελέσματα εφαρμογής στην περιοχή μελέτης

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τα διαφορετικά σενάρια μελέτης, όπως αυτά περιεγράφηκαν στο κεφάλαιο 4. Τα υπό εξέταση μεγέθη είναι αυτό των παροχών αιχμών και του ομοιόμορφου βάθους. Λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις πιθανές συνθήκες εδαφικής υγρασίας, τις πιθανές κλάσεις έντασης πυρκαγιάς και τις πιθανές περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά προκύπτουν 36 διαφορετικές πιθανές περιπτώσεις-σενάρια- για τη Μέθοδο Παπαθανασίου και 6 για τη μέθοδο Goodrich.

### 5.2.1 Παραδοχές

Για τα εν λόγω σενάρια πραγματοποιήθηκαν οι εξής παραδοχές για κάθε μια μεθοδολογία υπολογισμού που ακολουθήθηκε:

- Οι παροχές αιχμής προέκυψαν βάσει της ορθολογικής μεθόδου (βλ. εξίσωση 3.1).
- Για τον υπολογισμό του ομοιόμορφων βάθων ροής χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Manning. Γι' αυτό το σκοπό, θεωρήθηκε ορθογωνικό πλάτος διατομής  $b = 1 \text{ m}$  και συντελεστής manning  $n = 0,015$ . Η κλίση της υπολεκάνης μελέτης προέκυψε μέσω του μήκους της μισγάγκειας  $L$  και της υψομετρικής διαφοράς ανάμεσα στο ανάντη και στο κατάντη σημείο της υπολεκάνης  $\Delta z$ , μεγέθη που βρέθηκαν μέσω χαρτών ψηφιακού μοντέλου εδάφους της υπολεκάνης σε περιβάλλον QGIS.
- Ο συντελεστής  $\lambda$ , που εμπεριέχεται στην εξίσωση της όμβριας καμπύλης, επιλέχθηκε να έχει τιμή  $579 \text{ mm/h}$ , εφόσον το μεγαλύτερο τμήμα της υπολέκανης μελέτης έχει υψόμετρο μεγαλύτερο των  $160 \text{ m}$ .
- Για τις τιμές των παροχών αιχμής και του ομοιόμορφου βάθους ροής πριν τη πυρκαγιά, θεωρήθηκε βροχόπτωση με περίοδο επαναφοράς  $T = 50$  χρόνια.
- Οι παροχές αιχμής μεταπυρικά για τη μέθοδο Παπαθανασίου υπολογίστηκαν για τα χρονικά παράθυρα των 1 και 12 μηνών μετά τη πυρκαγιά. Λόγω των δυσμένεστερων συνθηκών που υπάρχουν ένα μήνα μετά τη πυρκαγιά, αξιοποιήθηκαν μόνο αυτά για τη στατιστική επεξεργασία των διαφόρων σεναρίων.

Από τους χάρτες του κεφαλαίου 2.2.3, έχουν εξαχθεί δεδομένα που αξιοποιούνται για τον υπολογισμό των υπό μελέτη μεγεθών τόσο για πριν όσο και για μετά τη πυρκαγιά. Για παράδειγμα, το μήκος της μισγάγκειας και η υψομετρική διαφορά μεταξύ κατάντη και μέσου υψομέτρου της λεκάνης αξιοποιούνται για τον υπολογισμό του χρόνου συρροής  $t_c$ , ο οποίος περιλαμβάνεται στην εξίσωση

έντασης της βροχόπτωσης και συνεπακόλουθα και στις εξισώσεις των παροχών αιχμής. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται χρήσιμα τοπογραφικά δεδομένα της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 5.2: Τοπογραφικά δεδομένα περιοχής εφαρμογής μελέτης.

Τοπογραφικά δεδομένα περιοχής μελέτης	
Εμβαδό A (km <sup>2</sup> )	0,88
Κλίση εδάφους J (-)	0,239
Μήκος μισγάγκειας L (km)	2,038
Υψομετρική διαφορά του μέσου υψομέτρου της λεκάνης από το υψόμετρο της εξόδου της Δz (m)	321,3

Με βάση τον χάρτη του συντελεστή απορροής (Σχήμα 2.16) και τον χάρτη καμένων εκτάσεων (Σχήμα 2.17) της υπολεκάνης μελέτης, προέκυψαν το σύνολο των καμένων και μη καμένων τμημάτων όπως επίσης και οι αρχικοί συντελεστές απορροής αυτών (Πίνακας 5.3). Απ' αυτά τα δεδομένα, προκύπτουν ο σταθμισμένος συντελεστής απορροής πριν πυρκαγιά (θεωρώντας όλες τις περιοχές του πίνακα μη καμένες) και ο σταθμισμένος μεταπυρικός συντελεστής απορροής για τις δύο μεθόδους.

Πίνακας 5.3: Καμένα και μη καμένα τμήματα της υπολεκάνης και οι αρχικοί συντελεστές απορροής τους.

A/A	Χαρακτηρισμός τμήματος	Ποσοστό τμήματος προς συνολική έκταση υπολεκάνης ρ <sub>i</sub> %	Συντελεστής απορροής πριν τη πυρκαγιά CN <sub>af</sub>
1	Καμένο	3,73	31
2	Καμένο	9,72	31
3	Καμένο	0,01	31
4	Καμένο	46,13	33
5	Μη καμένο	1,36	33
6	Καμένο	2,38	39
7	Μη καμένο	0,04	74
8	Καμένο	1,16	78
9	Μη καμένο	0,01	91
10	Μη καμένο	2,85	80
11	Καμένο	32,32	80
12	Μη καμένο	0,19	93
13	Μη καμένο	0,12	93

Επιπλέον, με βάση τον χάρτη υδροπερατότητας (Σχήμα 2.14) και τον χάρτη χρήσεων γης (Σχήμα 2.15) της υπολεκάνης μελέτης, συνδυαστικά με τον πίνακα μεταπυρικών συντελεστών απορροής της μεθόδου Goodrich (Πίνακας 3.9), προκύπτουν οι μεταπυρικοί συντελεστές κατά Goodrich για κάθε ένα από τα καμένα ή μη καμένα τμήματα της υπολεκάνης (Πίνακας 5.4). Οι μεταπυρικοί αυτοί συντελεστές μαζί με τα ποσοστά καμένης/μη καμένης έκτασης αξιοποιούνται για τον υπολογισμό του σταθμισμένου μεταπυρικού συντελεστή απορροής κατά Goodrich.

Πίνακας 5.4: Μεταπυρικοί συντελεστές απορροής κατά Goodrich για όλα τα τμήματα της υπολεκάνης.

A/A	Χρήσεις γης	Χαρακτηρισμός τμήματος υπολεκάνης	Συντελεστής απορροής μετά τη πυρκαγιά $CN_{pf,normal}$
1	Θαμνώδεις εκτάσεις- εκτάσεις με αραιή βλάστηση	Καμένο	77
2	Θαμνώδεις εκτάσεις- εκτάσεις με αραιή βλάστηση	Καμένο	77
3	Θαμνώδεις εκτάσεις- εκτάσεις με αραιή βλάστηση	Καμένο	77
4	Θαμνώδεις εκτάσεις- εκτάσεις με αραιή βλάστηση	Καμένο	77
5	Θαμνώδεις εκτάσεις- εκτάσεις με αραιή βλάστηση	Μη καμένο	33
6	Θαμνώδεις εκτάσεις- εκτάσεις με αραιή βλάστηση	Καμένο	77
7	Βιομηχανική ή εμπορική ζώνη	Μη καμένο	74
8	Θαμνώδεις εκτάσεις- εκτάσεις με αραιή βλάστηση	Καμένο	91
9	Διακεκομμένη αστική δόμηση	Μη καμένο	91
10	Δάσος	Μη καμένο	80
11	Θαμνώδεις εκτάσεις- εκτάσεις με αραιή βλάστηση	Καμένο	94
12	Διακεκομμένη αστική δόμηση	Μη καμένο	93
13	Διακεκομμένη αστική δόμηση	Μη καμένο	93

Όσον αφορά τις αρχικές συνθήκες πριν τη πυρκαγιά, οι παροχές αιχμής προέκυψαν πολλαπλασιάζοντας τον σταθμισμένο συντελεστή απορροής CN για όλες τις πιθανές συνθήκες υγρασίας με την ένταση της βροχόπτωσης (Εξισώσεις 3.2, 3.3, Πίνακας 5.2), θεωρώντας περίοδο επαναφοράς T=50 έτη. Για τον υπολογισμό του συντελεστή απορροής πριν τη πυρκαγιά, αξιοποιήθηκαν για τη μέθοδο Παπαθανασίου η εξίσωση 3.7, για τη μέθοδο Goodrich η εξίσωση 3.30, ενώ και για τις δύο μεθόδους λήφθηκε υπόψιν ο πίνακας 5.3.



Στο πίνακα 5.5 παρουσιάζονται οι αρχικές τιμές της παροχής και του ομοιόμορφου βάθους ροής πριν από τη πυρκαγιά, για τις διαφορετικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας, για την εφαρμογή της μεθόδου Παπαθανασίου.

Πίνακας 5.5: Αρχικές τιμές παροχής ( $Q_{sf}$ ) και ομοιόμορφου βάθους ροής ( $y_{sf}$ ) πριν τη πυρκαγιά κατά Παπαθανασίου.

Αρχικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας	Q (m <sup>3</sup> /s)	y (m)
Κανονικές	10,8	0,74
Ξηρές	9,3	0,66
Υγρές	12,3	0,83

Στο πίνακα 5.6 παρουσιάζονται οι αρχικές τιμές της παροχής και του ομοιόμορφου βάθους πριν από την πυρκαγιά, για τις διαφορετικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας, για την εφαρμογή της μεθόδου Goodrich.

Πίνακας 5.6: Αρχικές τιμές παροχής ( $Q_{sf}$ ) και ομοιόμορφου βάθους ροής ( $y_{sf}$ ) πριν τη πυρκαγιά κατά Goodrich .

Αρχικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας	Q (m <sup>3</sup> /s)	y (m)
Κανονικές	10,8	0,74
Ξηρές	7,3	0,55
Υγρές	14,4	0,93

Όσον αφορά τα μεγέθη μετά τη πυρκαγιά, οι μεταπυρικές παροχές αιχμής υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας τον μεταπυρικό σταθμισμένο συντελεστή απορροής CN με την ένταση της βροχόπτωσης (ίδιες εξισώσεις με αυτές για τα αρχικά μεγέθη). Για τον υπολογισμό του συντελεστή απορροής μετά τη πυρκαγιά, αξιοποιήθηκαν για τη μέθοδο Παπαθανασίου η εξίσωση 3.28 μαζί με τους πίνακες 3.8 και 3.6, για τη μέθοδο Goodrich η εξίσωση 3.29 μαζί με τους πίνακες 3.10 και 5.4, ενώ και για τις δύο μεθόδους λήφθηκε υπόψιν ο πίνακας 5.3.

Πρόέκυψαν έτσι, οι μεταπυρικές παροχές σύμφωνα με τη μέθοδο Παπαθανασίου (για όλες τις πιθανές κλάσεις έντασης πυρκαγιάς) και τη μέθοδο Goodrich, για όλες τις πιθανές συνθήκες εδαφικής υγρασίας και για όλες τις ενδεχόμενες περιόδους επαναφοράς. Ακολούθησαν και οι υπολογισμοί των ομοιόμορφων βάθων ροής μετά τη πυρκαγιά κατά Manning,.

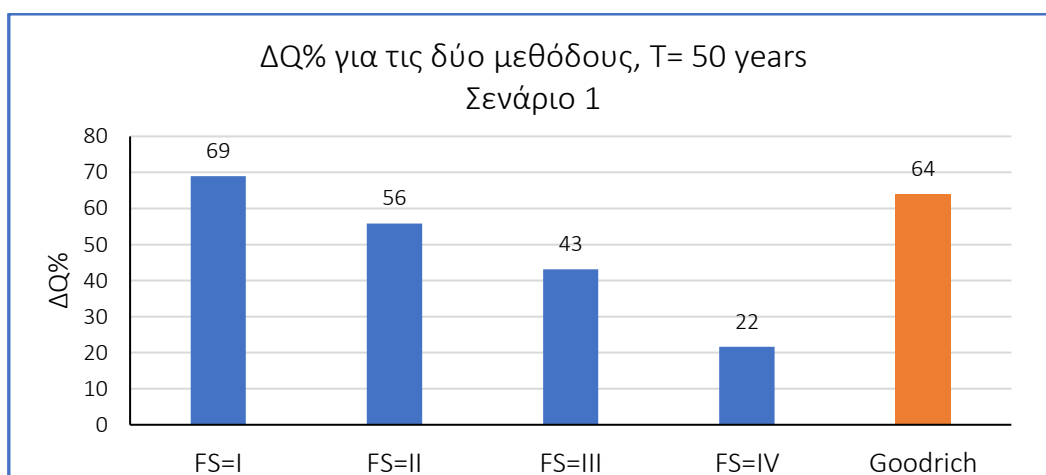
Τελικά, υπολογίστηκαν όλες οι ποσοστιαίες μεταβολές των παροχών και των βαθών ροής για το κάθε σενάριο που έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 4. Τα μεγέθη αυτά παρουσιάζονται στη συνέχεια, μέσω πινάκων και διαγραμμάτων, ώστε να διευκολυνθεί η σύγκριση τους.

### 5.2.2 Σενάριο 1: Μεταβολές μεγεθών υπό κανονικές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και κανονικές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (N- N)

Για το πρώτο σενάριο (N- N), παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές των παροχών αιχμής και των ομοιόμορφων βαθών ροής, για βροχόπτωση μετά τη πυρκαγιά με περίοδο επαναφοράς T=50 έτη. Συγκεκριμένα, φαίνονται οι μεταβολές των μεγεθών για τη μέθοδο Παπαθανασίου – για όλες τις κλάσεις πυρκαγιάς- και οι μεταβολές για τη μέθοδο Goodrich (Διαγράμματα 5.9 και 5.10). Στους πίνακες 5.7 και 5.8 φαίνονται οι αρχικές και οι τελικές τιμές, όπως επίσης και οι ποσοστιαίες μεταβολές των παροχών και των βαθών ροής.

Πίνακας 5.7: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 1 (N- N).

Παπαθανασίου				Goodrich		
	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%
FS= i	10,8	18,3	69	10,8	17,8	64
FS= ii		16,9	56			
FS= iii		15,5	43			
FS= iv		13,2	22			

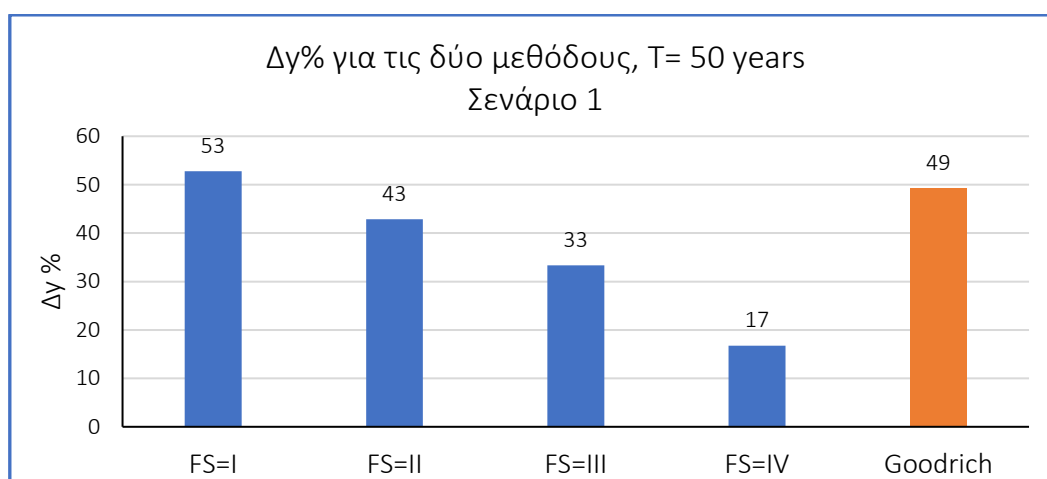


Διάγραμμα 5.9: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 1 (N- N).

Στο διάγραμμα 5.9 παρατηρείται μεγαλύτερη μεταβολή των παροχών (69%) και των βαθών ροής (53%) για πολύ ισχυρή ένταση πυρκαγιάς (FS= i) και μείωση αυτής, όσο μειώνεται η κλάση. Στον πίνακα 5.8, το βάθος ροής μετά τη πυρκαγιά, υπερβαίνει το 1 m και για τη μέθοδο Παπαθανασίου, για κλάσεις σφοδρότητας i και ii (1,14 m, 1,06 m), και για τη μέθοδο Goodrich (1,11 m).

Πίνακας 5.8: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 1 (N-N).

Παπαθανασίου			Goodrich			
	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$
FS= i	0,74	1,14	53	0,74	1,11	49
FS= ii		1,06	43			
FS= iii		0,99	33			
FS= iv		0,87	17			

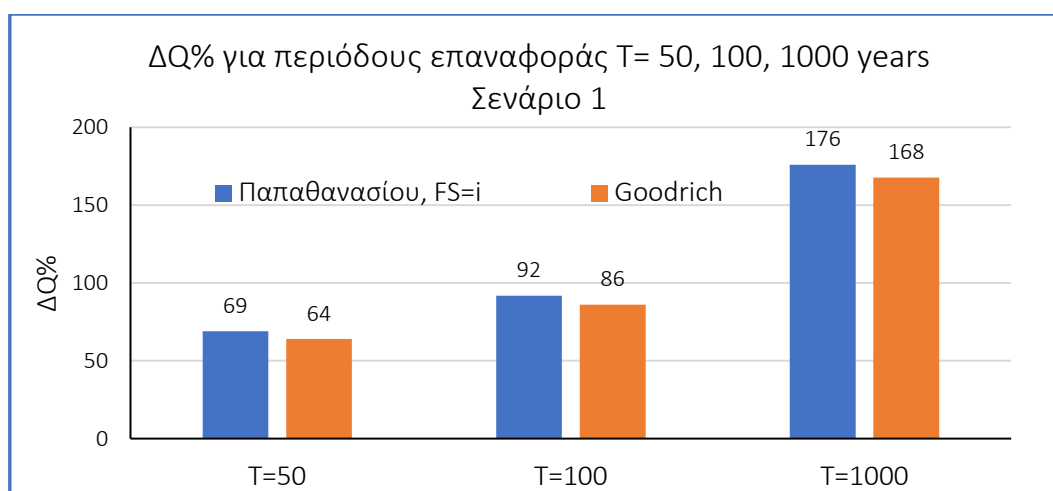


Διάγραμμα 5.10: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 1 (N-N).

Επιπλέον, παρουσιάζονται για κάθε συνδυασμό αρχικών και τελικών εδαφικών συνθηκών υγρασίας, για τις 3 διαφορετικές πιθανές βροχοπτώσεις μετά τη πυρκαγιά με περιόδους T= 50, 100, 1000 έτ, τα μεγέθη και οι μεταβολές αυτών, μέσω πινάκων και διαγραμμάτων. Για τη μέθοδο Παπαθανασίου, επιλέχθηκε να παρουσιάζεται και για τα 9 εδαφικά σενάρια η πιο δυσμενής συνθήκη, λαμβάνοντας υπόψιν πολύ ισχυρή ένταση πυρκαγιάς (FS= i), συνήθους συνθήκη σε μεσογειακές λεκάνες που καίγονται κατά τους θερινούς μήνες.

Πίνακας 5.9: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 1 (N- N).

Παπαθανασίου (FS= i)			Goodrich			
	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%
T=50 years	10,8	18	69	10,8	17,8	64
T=100 years		20,8	92		20,2	86
T=1000 years		29,9	176		29,0	168

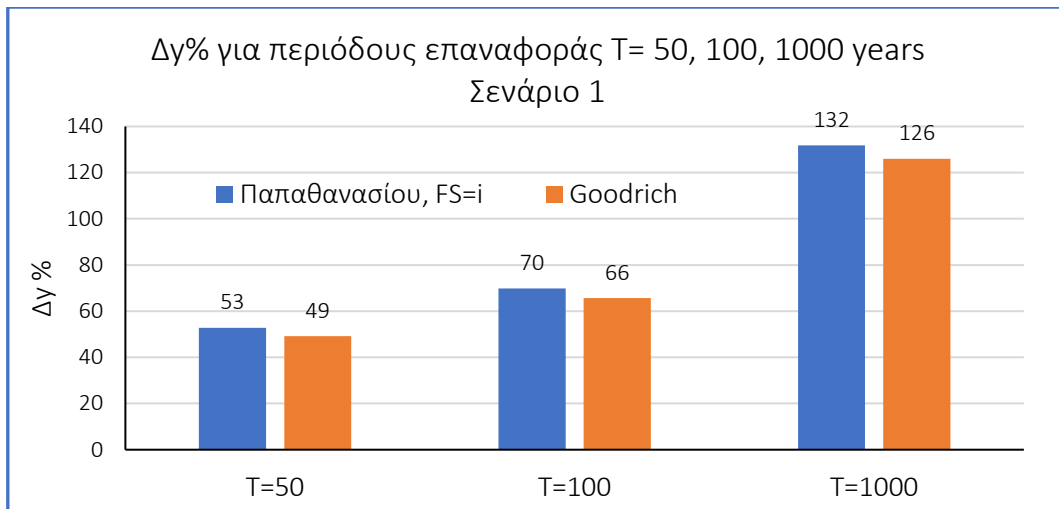


Διάγραμμα 5.11: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 1 (N- N).

Σύμφωνα με τον πίνακα 5.9, οι παροχές αυξάνονται μέχρι και 176% (T= 1000 έτη, Παπαθανασίου) έχοντας διαφορά 107% από την αύξηση της παροχής που παρατηρείται, αν η περίοδος επαναφοράς είναι ίδια όπως εκείνη που εφαρμόζεται για τις αρχικές συνθήκες, πριν τη πυρκαγιά, δηλαδή για T= 50 χρόνια (69%).

Πίνακας 5.10: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 1 (N- N).

Παπαθανασίου (FS= i)			Goodrich			
	γ <sub>af</sub> (m)	γ <sub>pf</sub> (m)	Δγ%	γ <sub>af</sub> (m)	γ <sub>pf</sub> (m)	Δγ%
T=50 years	0,74	1,14	53	0,74	1,11	49
T=100 years		1,26	70		1,23	66
T=1000 years		1,72	132		1,68	126



Διάγραμμα 5.12: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 1 (N- N).

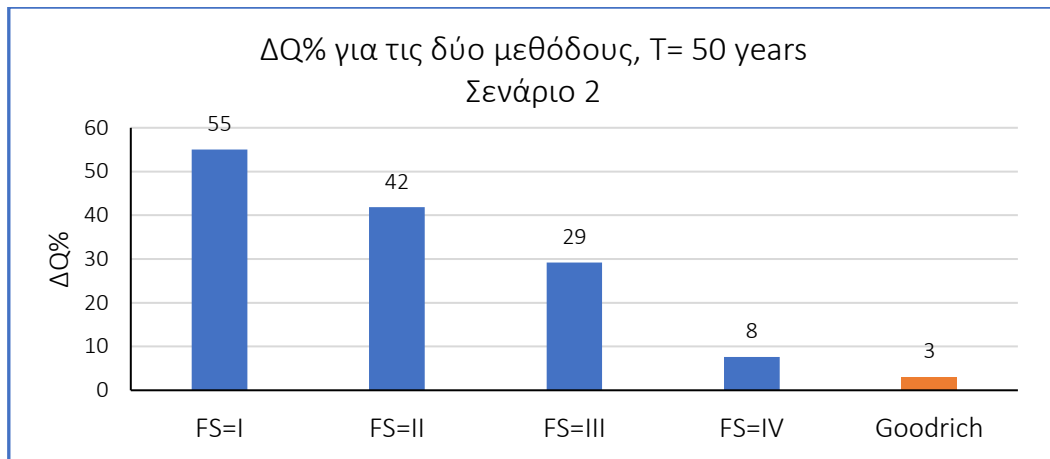
Οι αυξήσεις των παροχών μεταξύ της μεθόδου Παπαθανασίου και της μεθόδου Goodrich, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 5.11, είναι παρόμοιες για όλες τις ενδεχόμενες περιόδους επαναφοράς. Όλες οι τιμές των βαθών ροής μεταπυρικά υπερβαίνουν το 1 m φτάνοντας μέχρι και το 1,72 m στο πλέον δυσμενές σενάριο, για T= 1000 έτη (Πίνακας 5.10). Στο διάγραμμα 5.12 παρατηρείται αύξηση του βάθους ροής μέχρι και κατά 132% (T= 1000 έτη, Παπαθανασίου, FS= i).

### 5.2.3 Σενάριο 2: Μεταβολές μεγεθών υπό κανονικές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και ξηρές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (N- D)

Στο σενάριο N-D, οι τιμές των μεγεθών είναι μειωμένες σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο, με τις μεγαλύτερες αυξήσεις των παροχών να φτάνουν στο 55% και τις μεγαλύτερες αυξήσεις των βαθών ροής στο 42% (Παπαθανασίου, FS= i, Διαγράμματα 5.13 και 5.14).

Πίνακας 5.11: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 2 (N- D).

	Παπαθανασίου			Goodrich		
	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%
FS= i	10,8	16,8	55	10,8	11,2	3
FS= ii		15,4	42			
FS= iii		14,0	29			
FS= iv		11,7	8			

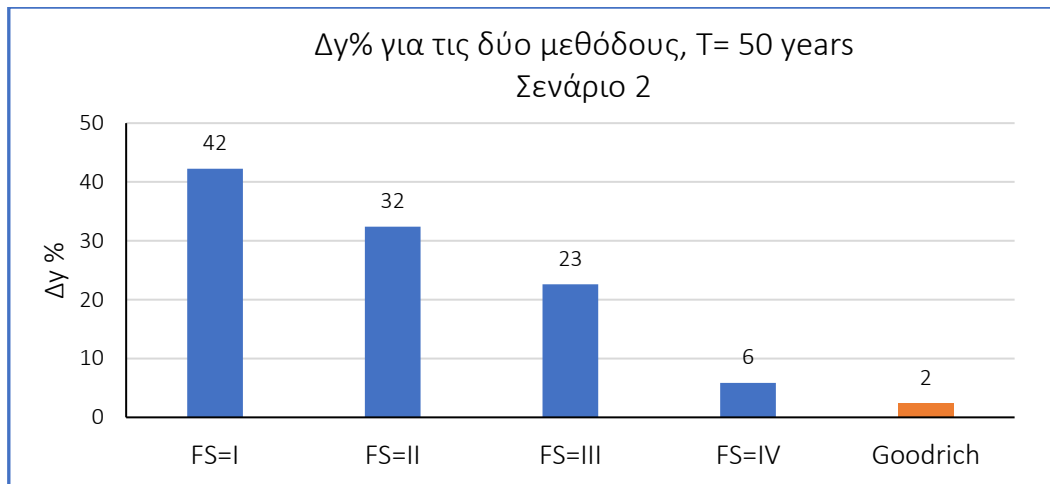


Διάγραμμα 5.13: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 2 (N- D).

Όπως φαίνεται στους πίνακες 5.11 και 5.12 αντίστοιχα, σχεδόν ίδιες παραμένουν μετά τη πυρκαγιά οι τιμές των παροχών και των βαθών ροής τόσο κατά Παπαθανασίου, για περίπτωση έντασης πυρκαγιάς χαμηλή ( $\Delta Q\% = 8\%$ ,  $\Delta \gamma\% = 6$ ,  $\gamma_{pf} = 0,79$  m), όσο και κατά Goodrich ( $\Delta Q\% = 3\%$ ,  $\Delta \gamma\% = 2$ ,  $\gamma_{pf} = 0,76$  m). Στο συγκεκριμένο σενάριο δηλαδή, η μέθοδος Goodrich προσεγγίζει περισσότερο τα αποτελέσματα της μεθόδου Παπαθανασίου για χαμηλή ένταση πυρκαγιάς.

Πίνακας 5.12: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 2 (N- D).

Παπαθανασίου				Goodrich		
	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta \gamma\%$	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta \gamma\%$
FS= i	0,74	1,06	42	0,74	0,76	2
FS= ii		0,98	32			
FS= iii		0,91	23			
FS= iv		0,79	6			

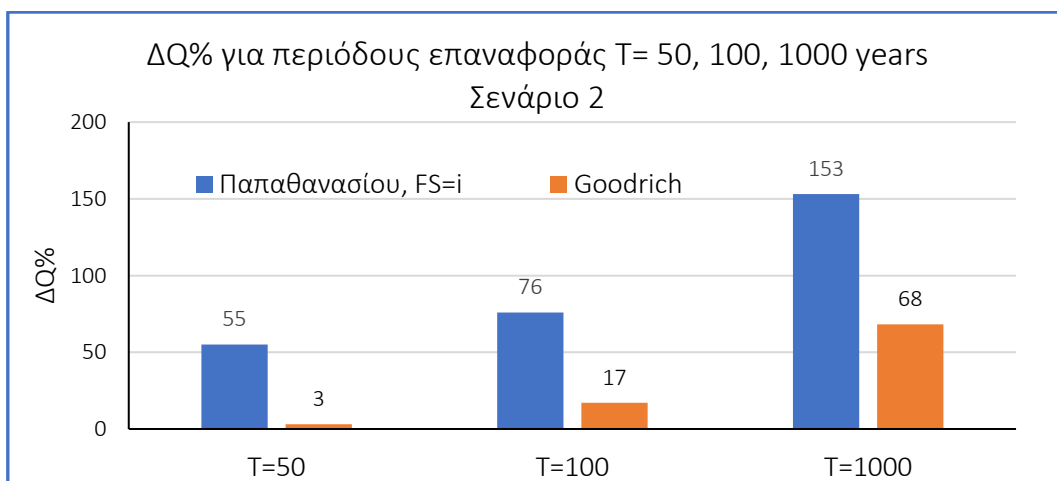


Διάγραμμα 5.14: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 2 (N- D).

Επίσης, φαίνεται πως μόνο για πολύ ισχυρή ένταση πυρκαγιάς το βάθος ροής μετά τη πυρκαγιά ξεπερνάει το 1m.

Πίνακας 5.13: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 2 (N- D).

	Παπαθανασίου (FS= i)			Goodrich		
	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%
T=50 years	10,8	17	55	10,8	11,2	3
T=100 years		19,1	76		12,7	17
T=1000 years		27,4	153		18,2	68



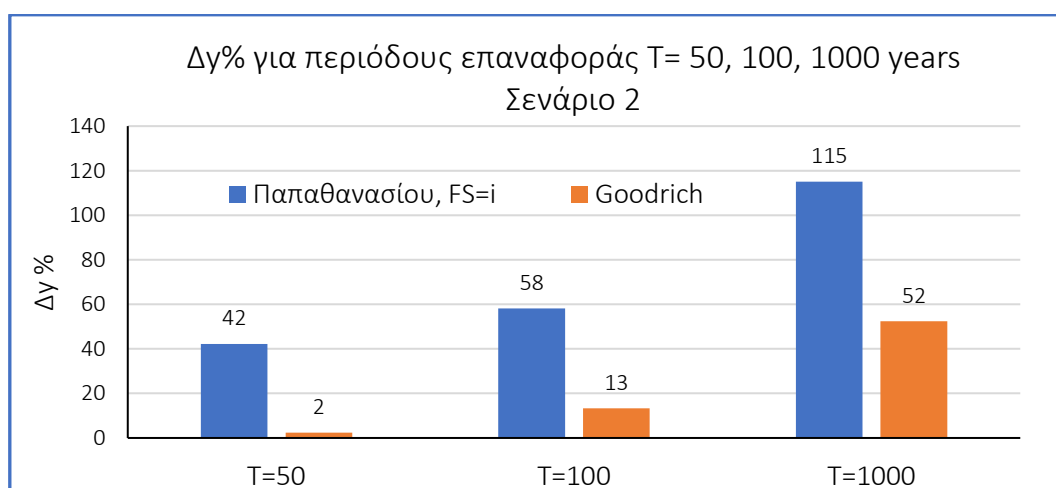
Διάγραμμα 5.15: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 2 (N- D).



Σύμφωνα με τους πίνακες 5.13 και 5.14, όπως και στο σενάριο N- N , παρατηρείται και εδώ διαφορά σχεδόν 100 μονάδων μεταξύ των περιπτώσεων περιόδου επαναφοράς 50 και 1000 χρόνων για τη μέθοδο Παπαθανασίου (98% για ΔQ% και 93% για Δγ%).

Πίνακας 5.14: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 2 (N- D).

Παπαθανασίου (FS= i)			Goodrich			
	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$
T=50 years	0,74	1,06	42	0,74	0,76	2
T=100 years		1,18	58		0,84	13
T=1000 years		1,60	115		1,13	52



Διάγραμμα 5.16: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 2 (N- D).

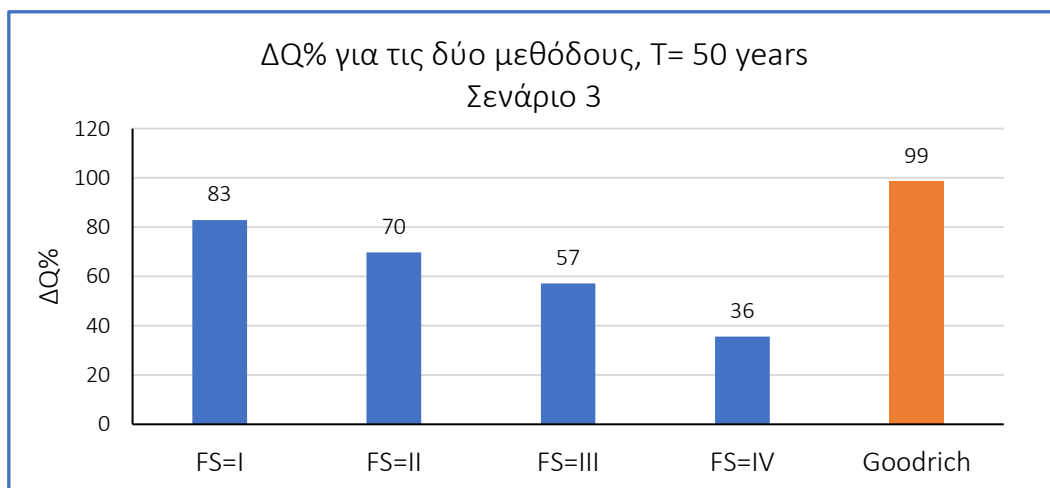
Στα διαγράμματα 5.15 και 5.16, οι αυξήσεις των μεγεθών για τη μέθοδο Goodrich είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με αυτές τις μεθόδου Παπαθανασίου. Χαρακτηριστικά, παρόμοιες αυξήσεις παροχών παρατηρούνται μεταξύ των δυο μεθόδων για T=100 χρόνια για Παπαθανασίου (ΔQ%= 76% Δγ%=58%), και για T=1000 έτη για Goodrich (ΔQ% = 68%, Δγ%= 52%).

### 5.2.4 Σενάριο 3: Μεταβολές μεγεθών υπό κανονικές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και υγρές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (N- W)

Στο σενάριο αυτό οι αυξήσεις των παροχών αιχμής φτάνουν μέχρι και 99% κατά Goodrich (Πίνακας 5.15).

Πίνακας 5.15: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 3 (N- W).

Παπαθανασίου			Goodrich			
	$Q_{af}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{pf}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q\%$	$Q_{af}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{pf}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q\%$
FS= i	10,8	19,8	83	10,8	21,5	99
FS= ii		18,4	70			
FS= iii		17,0	57			
FS= iv		14,7	36			



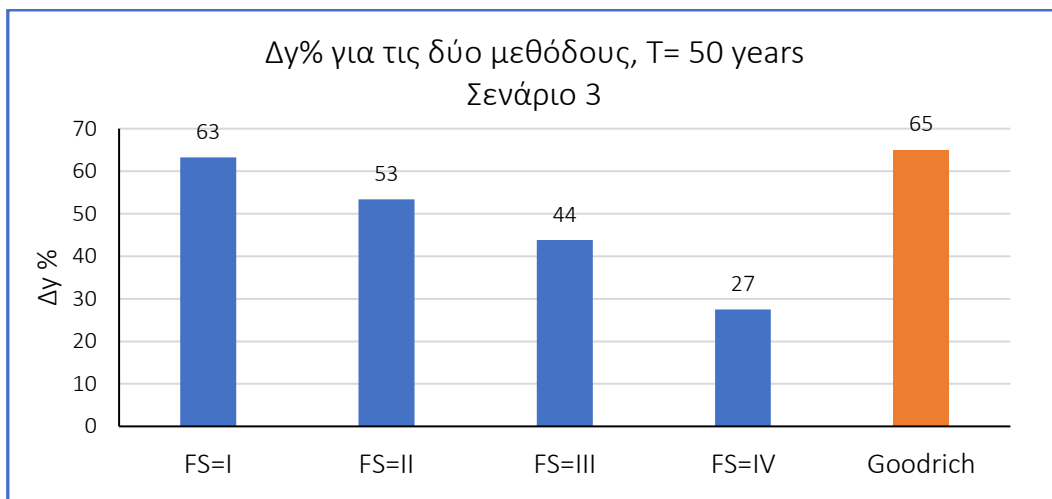
Διάγραμμα 5.17: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 3 (N-W).

Επόμενη μεγαλύτερη αύξηση των παροχών και των βαθών ροής παρατηρείται για πολύ ισχυρή ένταση πυρκαγιάς κατά Παπαθανασίου, με  $\Delta Q\% = 83\%$  και  $\Delta \gamma\% = 63\%$ , ενώ η μικρότερη αύξηση των μεγεθών παρατηρείται για χαμηλή ένταση πυρκαγιάς με  $\Delta Q\% = 36\%$  και  $\Delta \gamma\% = 27\%$  (Διαγράμματα 5.17 και 5.18).

Σύμφωνα με τον πίνακα 5.16, τόσο κατά Goodrich κατά, όσο και κατά Παπαθανασίου για όλες τις περιπτώσεις, εκτός από την υπόθεση χαμηλής έντασης πυρκαγιάς, το βάθος ροής μεταπυρικά ξεπερνάει το 1 m.

Πίνακας 5.16: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 3 (N- W).

Παπαθανασίου				Goodrich		
	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$
FS= i	0,74	1,21	63	0,74	1,23	65
FS= ii		1,14	53			
FS= iii		1,07	44			
FS= iv		0,95	27			

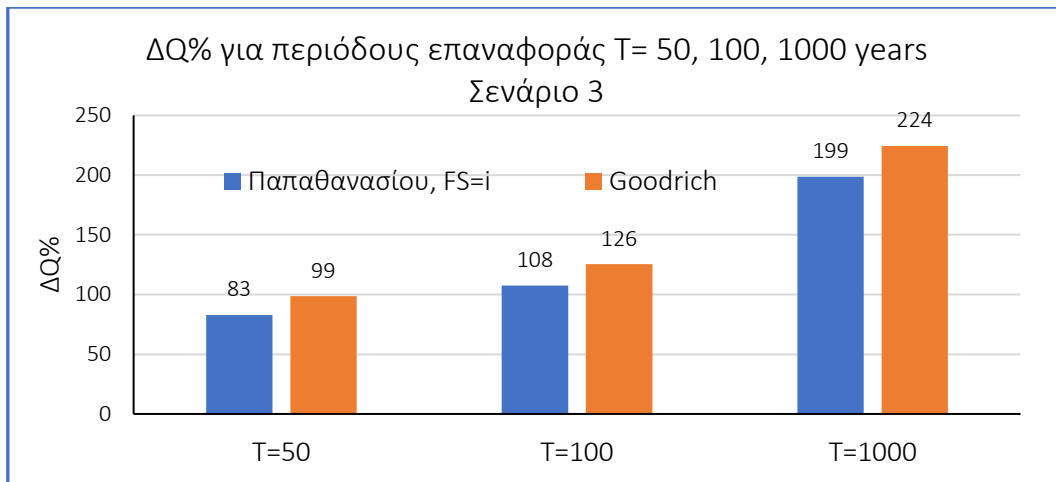


Διάγραμμα 5.18: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 3 (N-W).

Σύμφωνα με το διάγραμμα 5.19 και τον πίνακα 5.17, οι παροχές περίπου τετραπλασιάζονται για T=1000 έτη, τόσο για τη μέθοδο Goodrich ( $\Delta Q\% = 224\%$ ), όσο για τη μέθοδο Παπαθανασίου ( $\Delta Q\% = 199\%$ ).

Πίνακας 5.17: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 3 (N- W).

	Παπαθανασίου (FS= i)			Goodrich		
	$Q_{af}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{pf}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q\%$	$Q_{af}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{pf}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q\%$
T=50 years	10,8	20	83	10,8	21,5	99
T=100 years		22,5	108		24,4	126
T=1000 years		32,4	199		35,1	224

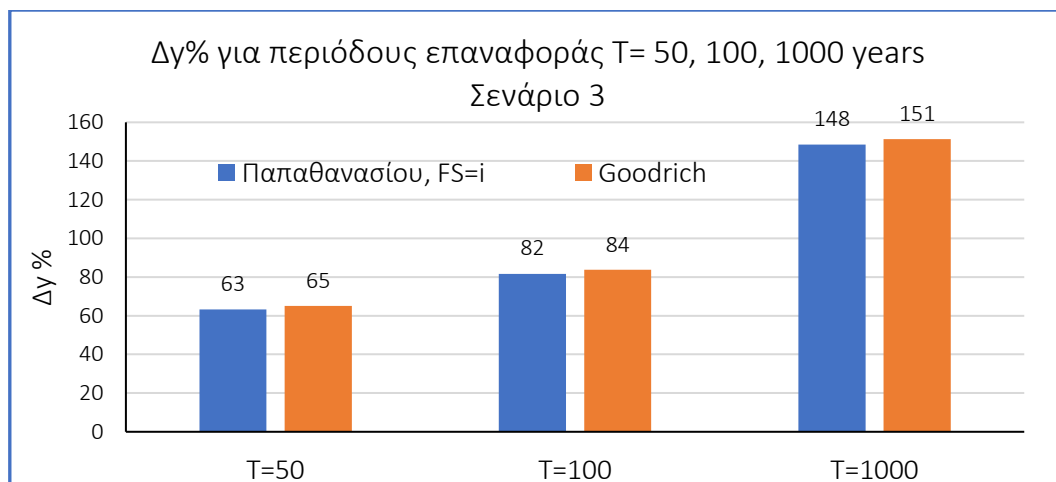


Διάγραμμα 5.19: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 3 (N- W).

Σημαντικές είναι και οι αυξήσεις των βαθών ροής σε σχέση με τις περιόδους επαναφοράς, με τα μεγαλύτερα βάθη ροής να φτάνουν τα 1,85 m κατά Παπαθανασίου και τα 1,87m κατά Goodrich, για περίοδο επαναφοράς T=1000 έτη (Πίνακας 5.18).

Πίνακας 5.18: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 3 (N- W).

	Παπαθανασίου (FS= i)			Goodrich		
	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$
T=50 years	0,74	1,21	63	0,74	1,23	65
T=100 years		1,35	82		1,37	84
T=1000 years		1,85	148		1,87	151



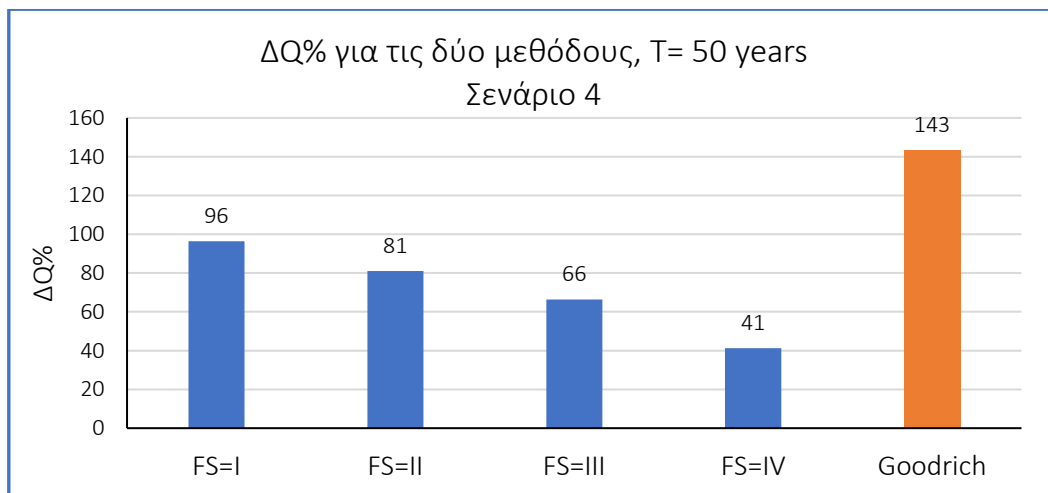
Διάγραμμα 5.20: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 3 (N- W).

### 5.2.5 Σενάριο 4: Μεταβολές μεγεθών υπό ξηρές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και κανονικές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (D- N)

Είναι σημαντικό να υπενθυμίσουμε ότι για αρχικές ξηρές συνθήκες τα αρχικά μεγέθη είναι μειωμένα σε σχέση με αυτά υπό κανονικές συνθήκες. Σύμφωνα με τα διαγράμματα 5.21 και 5.22, παρουσιάζονται μεγάλες αυξήσεις στις μεταβολές των μεγεθών. Η μέθοδος Goodrich έχει πολύ αυξημένες μεταβολές ( $\Delta Q\% = 143\%$ ,  $\Delta \gamma\% = 102\%$ ) σε σχέση με τις μεταβολές των μεγεθών κατά Παπαθανασίου, για ένταση πυρκαγιάς πολύ ισχυρή ( $\Delta Q\% = 96\%$ ,  $\Delta \gamma\% = 72\%$ ). Ακόμη και για σύνθηκες με ένταση πυρκαγιάς χαμηλή, οι αυξήσεις είναι αξιοσημείωτες με την αύξηση της παροχής να φτάνει το 41% και την αύξηση του βάθους ροής το 31% (Πίνακες 5.19, 5.20).

Πίνακας 5.19: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 4 (D- N).

Παπαθανασίου				Goodrich		
	$Q_{af} (m^3/s)$	$Q_{pf} (m^3/s)$	$\Delta Q\%$	$Q_{af} (m^3/s)$	$Q_{pf} (m^3/s)$	$\Delta Q\%$
FS= i	9,3	18,3	96	7,3	17,8	143
FS= ii		16,9	81			
FS= iii		15,5	66			
FS= iv		13,2	41			

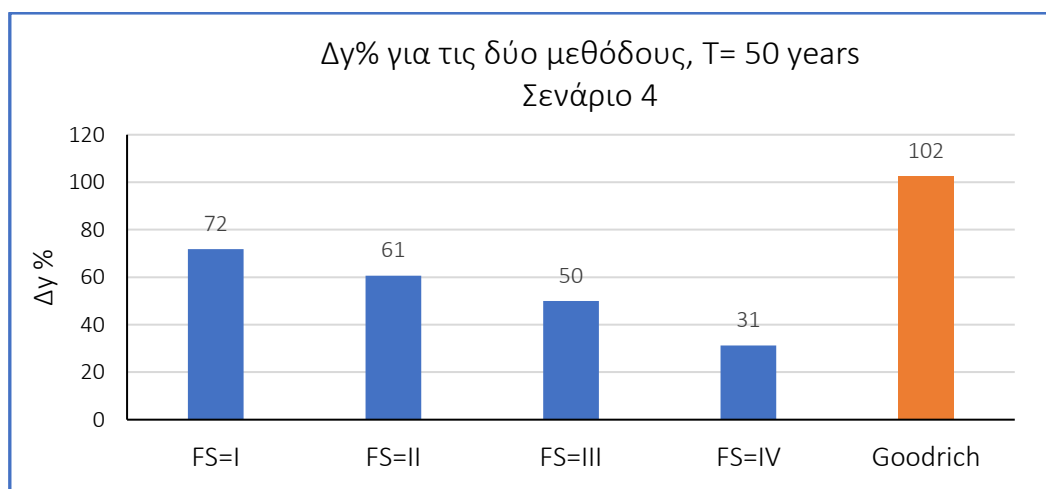


Διάγραμμα 5.21: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 4 (D- N).

Σύμφωνα με τον πίνακα 5.20, παρά τις σημαντικές αυξήσεις, τα βάθη ροής μεταπυρικά υπερβαίνουν το 1 m μόνο για τη μέθοδο Goodrich (1,11 m), και για τις περιπτώσεις ισχυρής (1,06 m) και πολύ ισχυρής έντασης πυρκαγιάς κατά Παπαθανασίου (1,14 m).

Πίνακας 5.20: Ομοιόμορφα βάρη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 4 (D- N).

Παπαθανασίου				Goodrich		
	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$
FS= i	0,66	1,14	72	0,55	1,11	102
FS= ii		1,06	61			
FS= iii		0,99	50			
FS= iv		0,87	31			

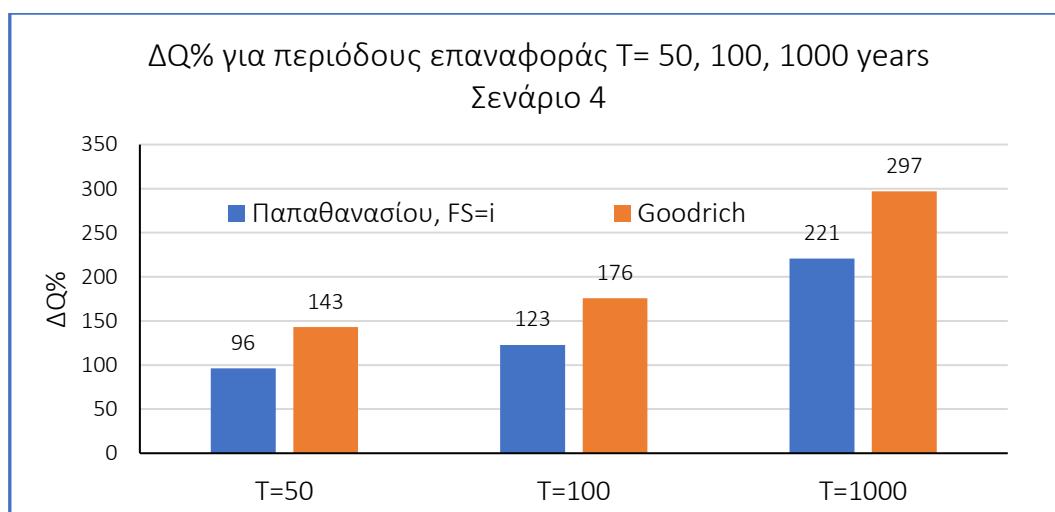


Διάγραμμα 5.22: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 4 (D- N).

Όσον αφορά τις αλλαγές ανάλογα με τη περίοδο επαναφοράς, παρατηρείται διπλάσια τιμή της μεταπυρικής παροχής σε σχέση με την αρχική τιμή, για περίοδο επαναφοράς 50 ετών, για τη μέθοδο Παπαθανασίου (Διάγραμμα 5.23). Όπως φαίνεται από τον πίνακα 5.21, για βροχόπτωση μετά τη πυρκαγιά 1000 ετών, οι τιμές των τελικών παροχών φτάνουν να είναι τριπλάσιες (29,9 m<sup>3</sup>/s, Παπαθανασίου) και τετραπλάσιες (29,0 m<sup>3</sup>/s, Goodrich) σε σχέση με τις αρχικές παροχές (9,3 m<sup>3</sup>/s κατά Παπαθανασίου και 7,3 m<sup>3</sup>/s κατά Goodrich).

Πίνακας 5.21: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 4 (D- N).

Παπαθανασίου (FS= i)			Goodrich			
	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%
T=50 years	9,3	18	96	7,3	17,8	143
T=100 years		20,8	123		20,2	176
T=1000 years		29,9	221		29,0	297



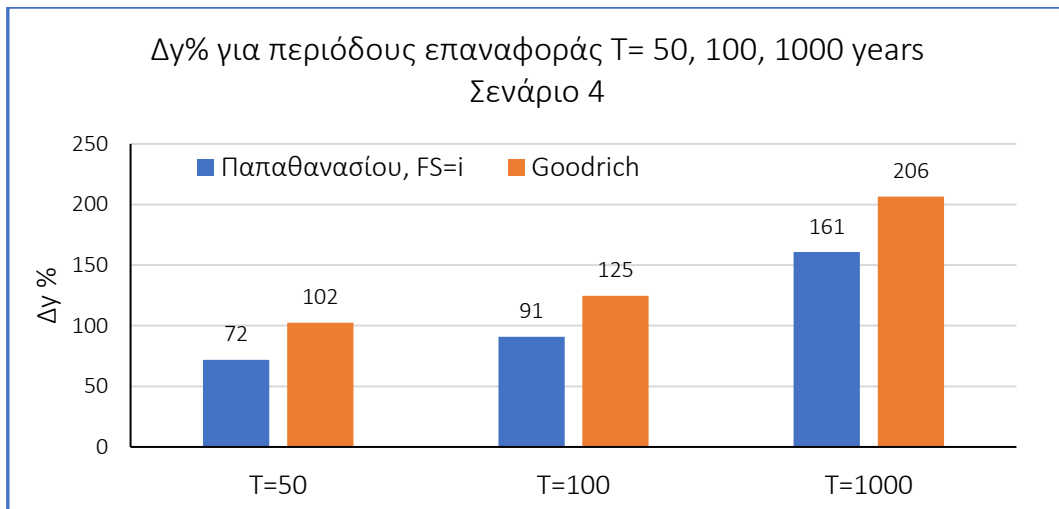
Διάγραμμα 5.23: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 4 (D- N).

Όμοια, σύμφωνα με τον πίνακα 5.22, το βάθος ροής για όλες τις πιθανές περιόδους επαναφοράς είναι μεγαλύτερο του 1m και παρατηρείται να διπλασιασμός του σχεδόν ήδη από την περίπτωση για περίοδο επαναφοράς T=50 έτη (Διάγραμμα 5.23). Για το πλέον δυσμενές σενάριο με T= 1000 έτη, οι τιμές των βαθών ροής ανεβαίνουν από 0,66 m και 0,55 m για Παπαθανασίου και Goodrich αντίστοιχα, μέχρι και 1,72 m και 1,68 m.

Πίνακας 5.22: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 4 (D- N).

Παπαθανασίου (FS= i)			Goodrich			
	γ <sub>af</sub> (m)	γ <sub>pf</sub> (m)	Δγ%	γ <sub>af</sub> (m)	γ <sub>pf</sub> (m)	Δγ%
T=50 years	0,66	1,14	72	0,55	1,11	102
T=100 years		1,26	91		1,23	125
T=1000 years		1,72	161		1,68	206





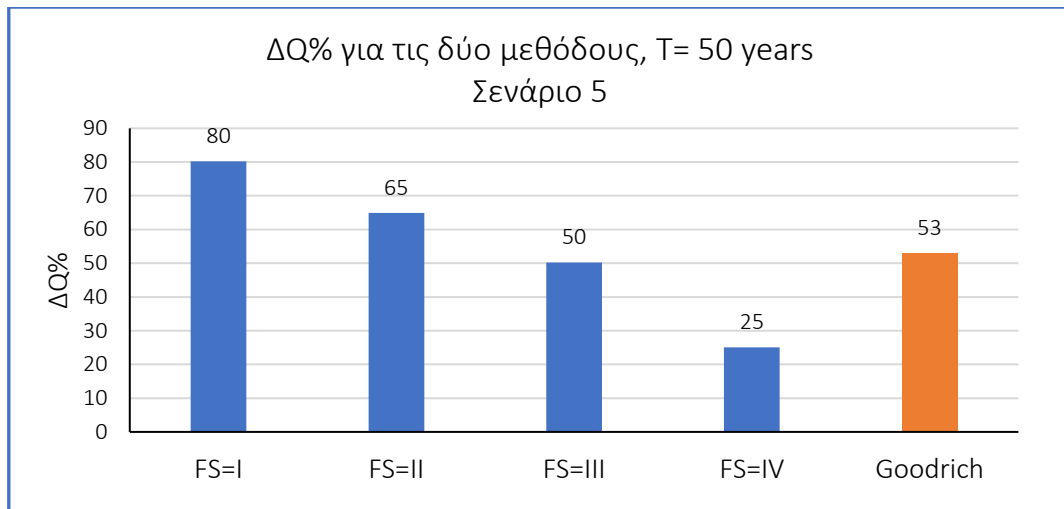
Διάγραμμα 5.24: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 4 (D- N).

### 5.2.6 Σενάριο 5: Μεταβολές μεγεθών υπό ξηρές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και ξηρές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (D- D)

Για το σενάριο D-D, όπως φαίνεται και από τον πίνακα 5.23 και το διάγραμμα 5.25, οι μεταβολές των παροχών κατά Παπαθανασίου κυμαίνονται από 25% έως 80%. Επίσης, η αύξηση της παροχής κατά Goodrich ( $\Delta Q\% = 53\%$ ) είναι κοντά σε τιμές με την αύξηση για μέτρια ένταση πυρκαγιάς κατά Παπαθανασίου ( $\Delta Q\% = 50\%$ ).

Πίνακας 5.23: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 5 (D- D).

	Παπαθανασίου			Goodrich		
	$Q_{af}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{pf}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q\%$	$Q_{af}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{pf}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q\%$
FS= i	9,3	16,8	80	7,3	11,2	53
FS= ii		15,4	65			
FS= iii		14,0	50			
FS= iv		11,7	25			

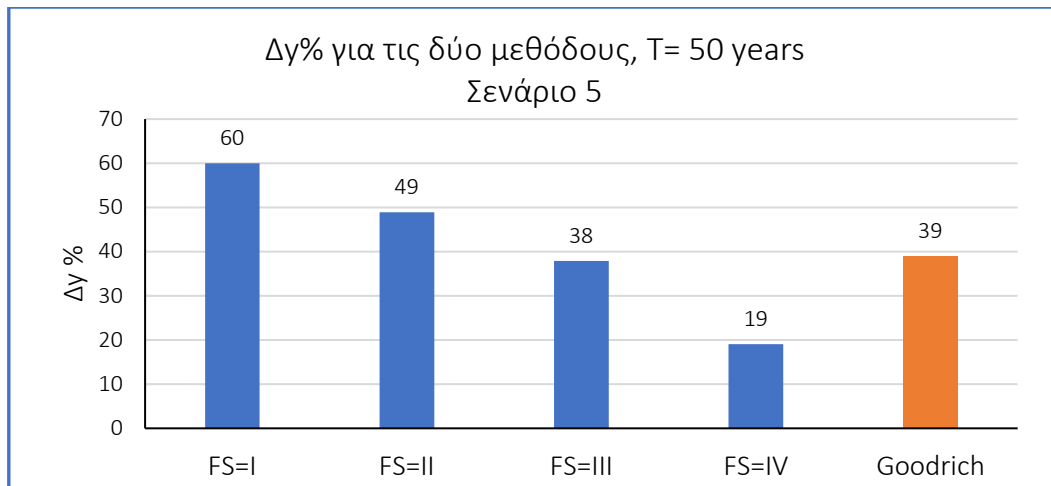


Διάγραμμα 5.25: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 5 (D- D).

Το βάθος ροής υπερβαίνει το 1 m μόνο για πολύ ισχυρή ένταση πυρκαγιάς σύμφωνα με τον πίνακα 5.24. Σύμφωνα με το διάγραμμα 5.26, η ποσοστιαία μεταβολή του βάθους ροής κατά Goodrich ( $\Delta\gamma\% = 39\%$ ) έχει μεγαλύτερη σχέση με την μεταβολή κατά Παπαθανασίου, για την περίπτωση μέτριας έντασης πυρκαγιάς ( $\Delta\gamma\% = 38\%$ ).

Πίνακας 5.24: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 5 (D- D).

	Παπαθανασίου			Goodrich		
	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$
FS= i	0,66	1,06	60	0,55	0,76	39
FS= ii		0,98	49			
FS= iii		0,91	38			
FS= iv		0,79	19			

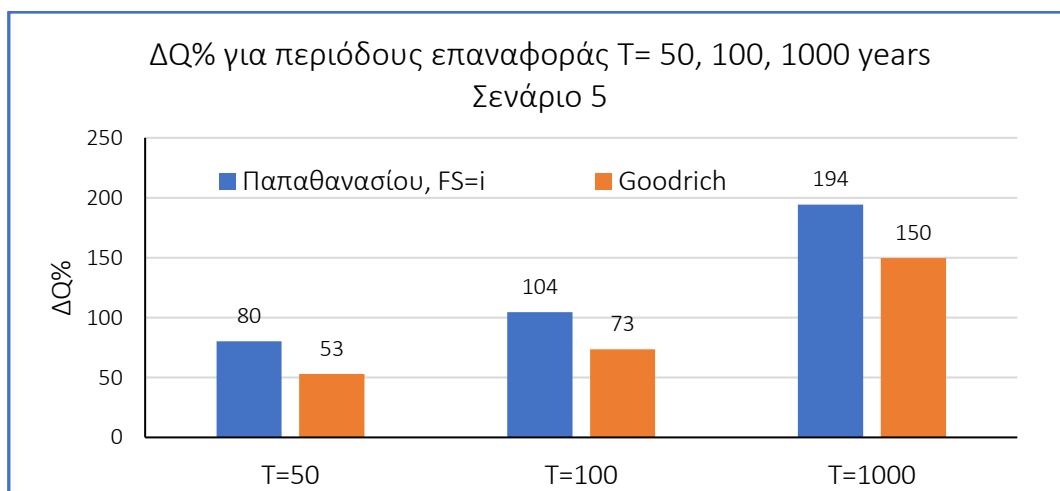


Διάγραμμα 5.26: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 5 (D- D).

Στα διαγράμματα 5.27 και 5.28, παρατηρείται πως η μέθοδος Goodrich έχει μεγαλύτερα μεγέθη σε σχέση με τη μέθοδο Παπαθανασίου κατά τουλάχιστον 20 μονάδες. Για T= 1000 έτη, η μεταβολή της παροχής είναι μεγαλύτερη κατά Goodrich κατά 44% και η μεταβολή του βάθους ροής κατά 35%.

Πίνακας 5.25: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 5 (D- D).

	Παπαθανασίου (FS= i)			Goodrich		
	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%
T=50 years	9,3	17	80	7,3	11,2	53
T=100 years		19,1	104		12,7	73
T=1000 years		27,4	194		18,2	150

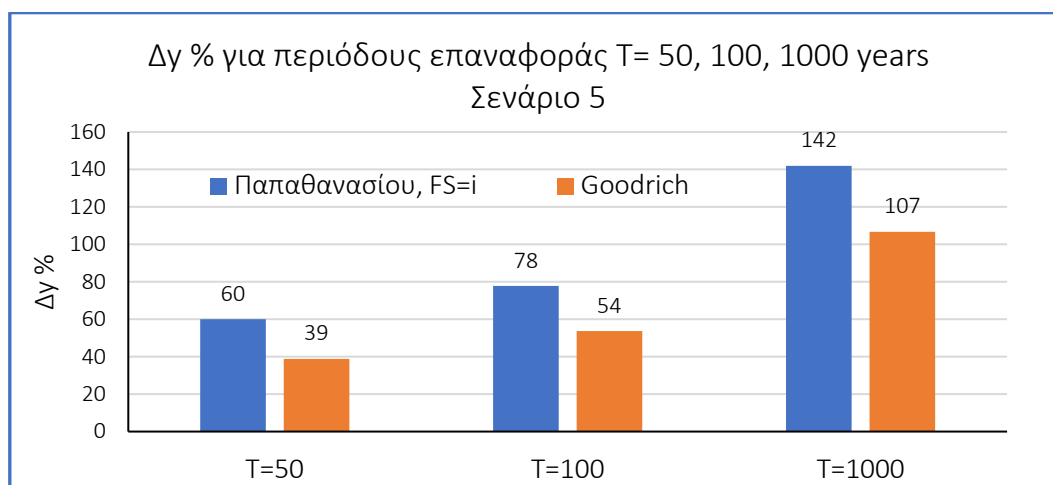


Διάγραμμα 5.27: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 5 (D- D).

Στον πίνακα 5.26 παρουσιάζονται οι τιμές του βάθους ροής πριν τη πυρκαγιά, οι τιμές του βάθους μετά τη πυρκαγιά, για τις δύο μεθόδους και για τις 3 ενδεχόμενες περιόδους επαναφοράς, όπως και οι ποσοστιαίες μεταβολές αυτών των δύο.

Πίνακας 5.26: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 5 (D-D).

Παπαθανασίου (FS= i)			Goodrich			
	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$
T=50 years	0,66	1,06	60	0,66	1,06	60
T=100 years		1,18	78		1,18	78
T=1000 years		1,60	142		1,60	142



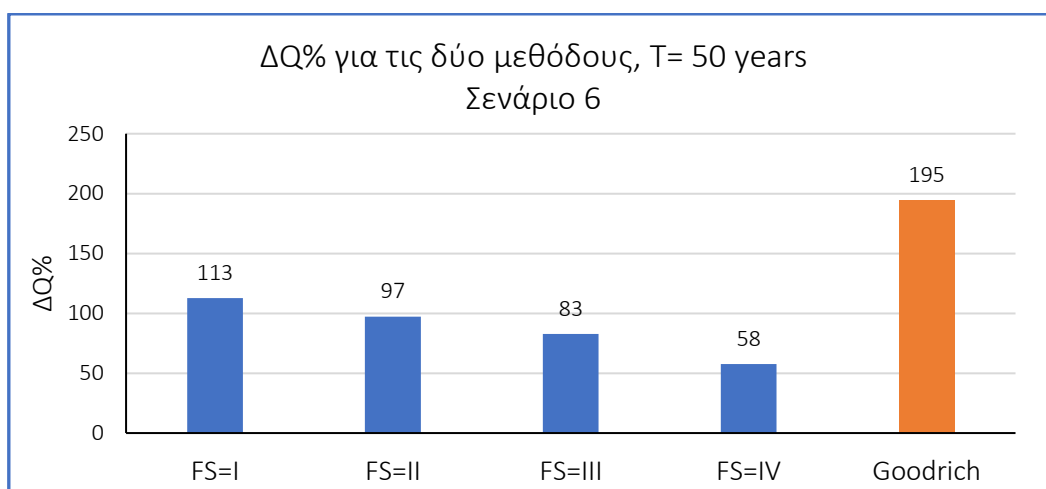
Διάγραμμα 5.28: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 5 (D- D).

### 5.2.7 Σενάριο 6: Μεταβολές μεγεθών υπό ξηρές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και υγρές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (D- W)

Στο σενάριο αυτό παρατηρούνται οι μεγαλύτερες μεταβολές των μεγεθών. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές κατά Goodrich ( $\Delta Q\% = 195\%$ ,  $\Delta\gamma\% = 124\%$ ), έχουν πολύ μεγάλη απόκλιση από τη μέγιστη τιμή κατά Παπαθανασίου ( $\Delta Q\% = 113\%$ ,  $\Delta\gamma\% = 84\%$ ) όπως φαίνεται στα διαγράμματα 5.29 και 5.30.

Πίνακας 5.27: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 6 (D- W).

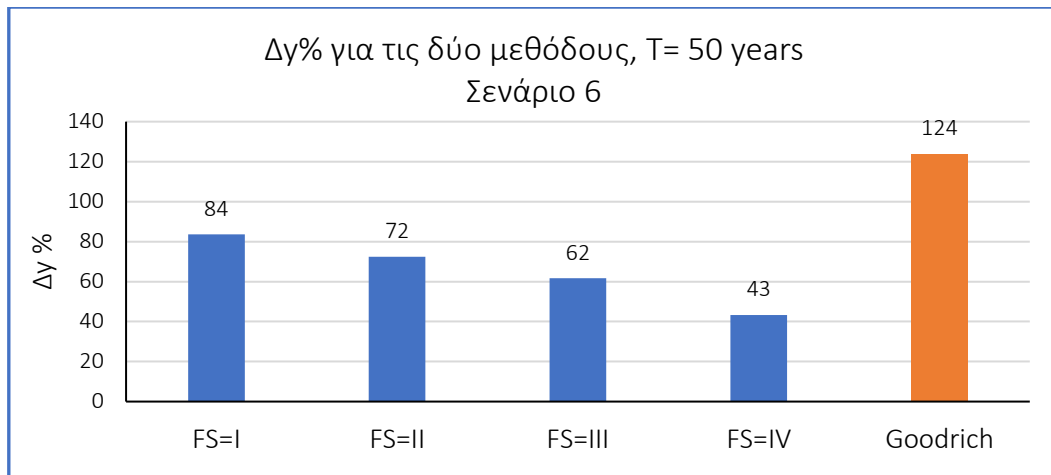
Παπαθανασίου				Goodrich		
	$Q_{af}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{pf}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q\%$	$Q_{af}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{pf}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q\%$
FS= i	9,3	19,8	113	7,3	21,5	195
FS= ii		18,4	97			
FS= iii		17,0	83			
FS= iv		14,7	58			



Διάγραμμα 5.29: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 6 (D- W).

Πίνακας 5.28: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 6 (D- W).

Παπαθανασίου				Goodrich		
	$y_{af}$ (m)	$y_{pf}$ (m)	$\Delta y\%$	$y_{af}$ (m)	$y_{pf}$ (m)	$\Delta y\%$
FS= i	0,66	1,21	84	0,55	1,23	124
FS= ii		1,14	72			
FS= iii		1,07	62			
FS= iv		0,95	43			

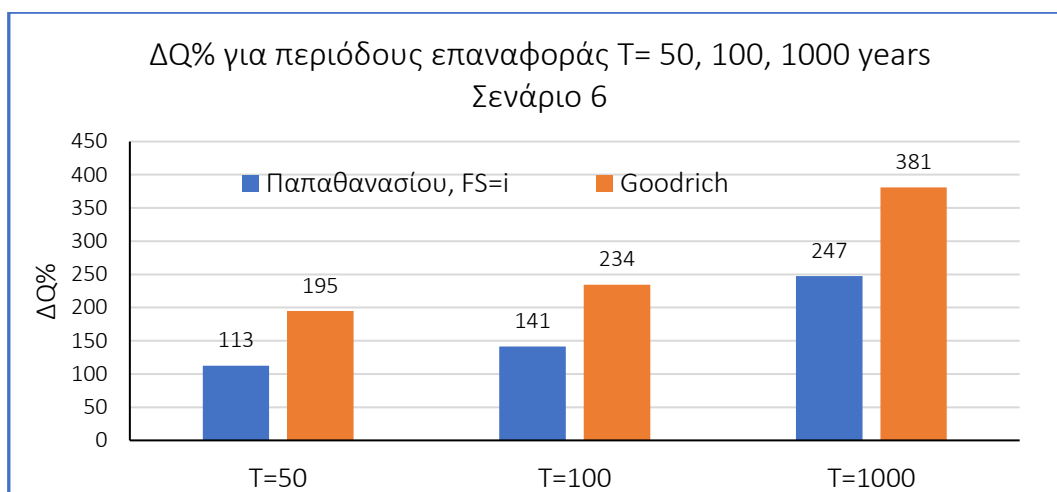


Διάγραμμα 5.30: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 6 (D- W).

Σ' αυτό το σενάριο παρατηρούνται και οι μεγαλύτερες τιμές των παροχών. Σύμφωνα με τον πίνακα 5.29, για περίοδο επαναφοράς 1000 ετών, κατά Goodrich η παροχή μετά τη πυρκαγιά φτάνει τα 35,1 m<sup>3</sup>/s και κατά Παπαθανασίου για FS= i τα 32,4 m<sup>3</sup>/s.

Πίνακας 5.29: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 6 (D- W).

	Παπαθανασίου (FS= i)			Goodrich		
	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%
T=50 years	9,3	20	113	7,3	21,5	195
T=100 years		22,5	141		24,4	234
T=1000 years		32,4	247		35,1	381



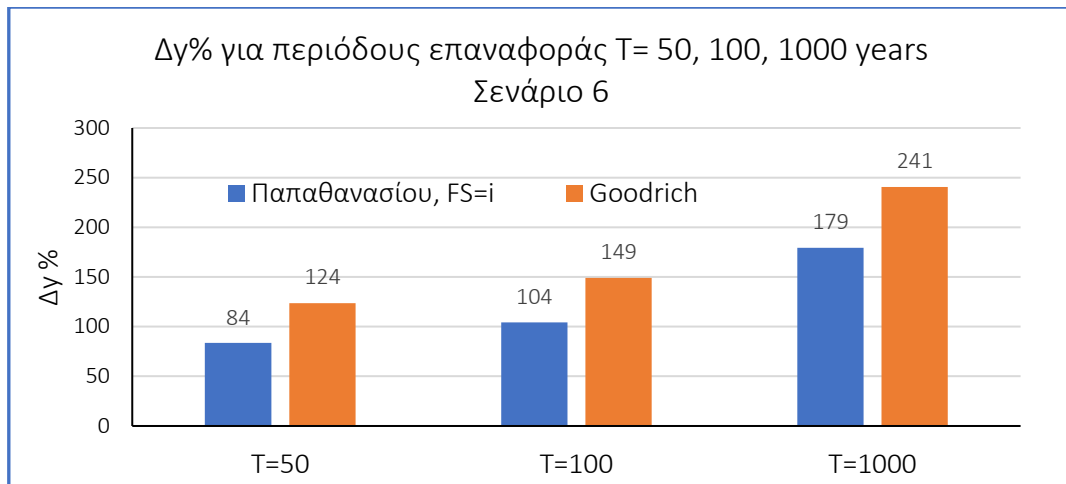
Διάγραμμα 5.31: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 6 (D- W).

Για διαφορετικές περιόδους επαναφοράς, παρατηρείται και για τα δύο μεγέθη τουλάχιστον διπλάσια τιμή της αρχικής (Διαγράμματα 5.31 και 5.32). Όσον αφορά τα βαθθι ροής μετά τη πυρκαγιά, σύμφωνα με τον πίνακα 5.30, όλα είναι μεγαλύτερα του 1 m, με τα μέγιστα να φτάνουν τα 1,85 m (Παπαθανασίου, FS= i), και 1,87m (Goodrich), που είναι και τα μεγαλύτερα που παρατηρούνται για όλες τις πιθανές περιπτώσεις στη παρούσα μελέτη.

Πίνακας 5.30: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 6 (D- W).

	Παπαθανασίου (FS= i)			Goodrich		
	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$
T=50 years	0,66	1,21	84	0,55	1,23	124
T=100 years		1,35	104		1,37	149
T=1000 years		1,85	179		1,87	241





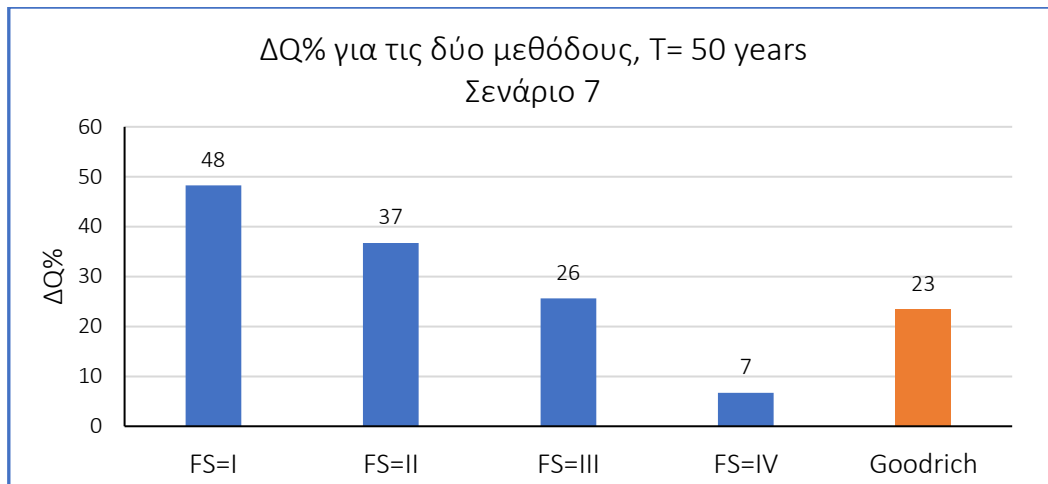
Διάγραμμα 5.32: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 6 (D- W).

### 5.2.8 Σενάριο 7: Μεταβολές μεγεθών υπό υγρές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και κανονικές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (W- N)

Στα σενάριο αυτό όπως και στα επόμενα, οι αρχικές τιμές των παροχών και βαθών ροής είναι αυξημένες σε σχέση με τις κανονικές συνθήκες όπως είναι αναμενόμενο. Σύμφωνα με τον πίνακα 5.31, η μέγιστη αύξηση της μεταπυρικής παροχής κατά Παπαθανασίου είναι 48% (FS= i) και η ελάχιστη 7% (FS= iv). Κατά Goodrich, η αύξηση της παροχής ( $\Delta Q\% = 23\%$ ) είναι κοντά με εκείνη της Παπαθανασίου, για μέτρια ένταση πυρκαγιάς, που φτάνει το 26% (Διάγραμμα 5.33).

Πίνακας 5.31: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 7 (W- N).

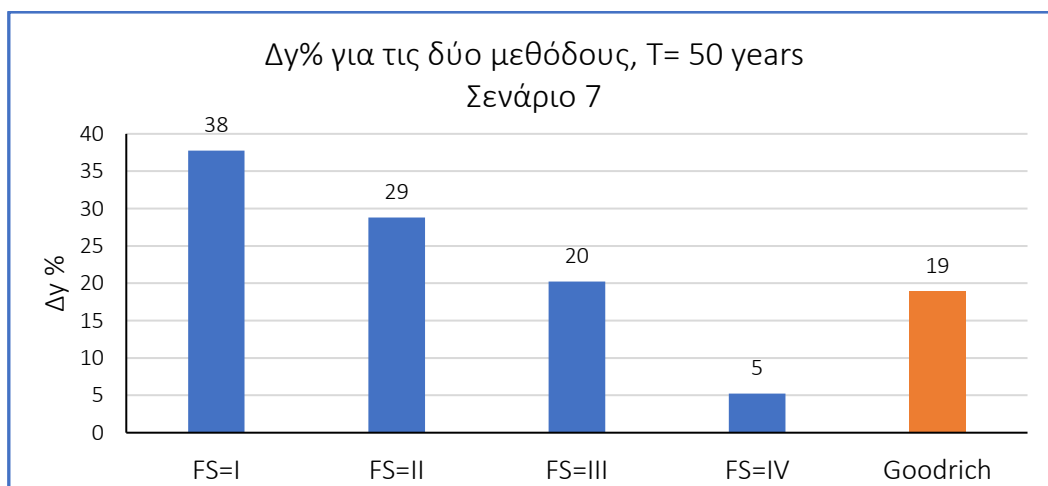
	Παπαθανασίου			Goodrich		
	$Q_{af}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{pf}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q\%$	$Q_{af}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{pf}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q\%$
FS= i	12,3	18,3	48	14,4	17,8	23
FS= ii		16,9	37			
FS= iii		15,5	26			
FS= iv		13,2	7			



Διάγραμμα 5.33: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 7 (W- N).

Πίνακας 5.32: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 7 (W- N).

	Παπαθανασίου			Goodrich		
	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$
FS= i	0,83	1,14	38	0,93	1,11	19
FS= ii		1,06	29			
FS= iii		0,99	20			
FS= iv		0,87	5			



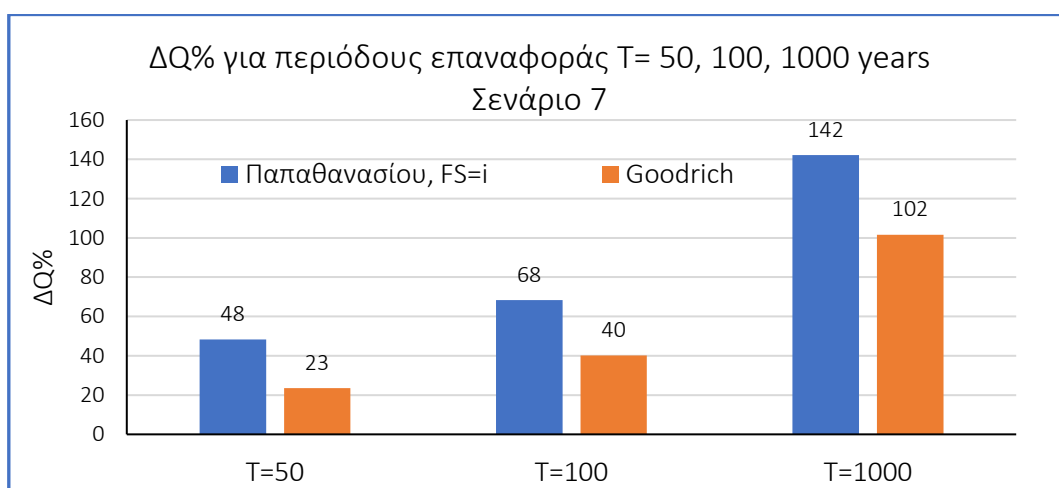
Διάγραμμα 5.34: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 7 (W- N).

Τα βάθη ροής, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 5.34, αυξάνονται μέχρι και 38% (Παπαθανασίου, FS= i), ενώ για χαμηλή έντασης πυρκαγιάς το βάθος παραμένει σχεδόν ίδιο (5%). Παρατηρείται

κοιτώντας τον πίνακα 5.32, πως το βάθος ροής μετά τη πυρκαγιά κατά Goodrich είναι μικρότερο από αυτό που προέκυψε μέσω της μεθόδου Παπαθανασίου για ισχυρή ένταση πυρκαγιάς.

Πίνακας 5.33: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 7 (W- N).

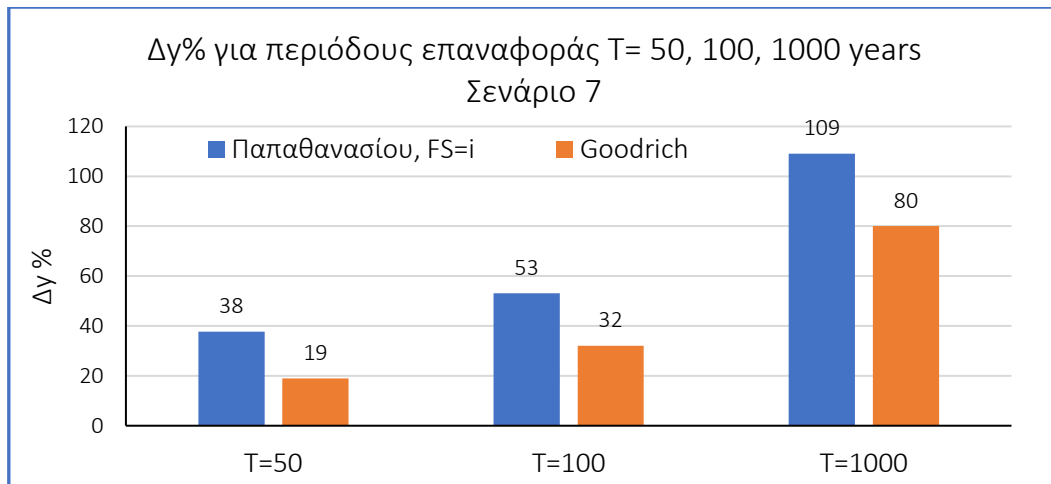
Παπαθανασίου (FS= i)				Goodrich		
	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%
T=50 years	12,3	18	48	14,4	17,8	23
T=100 years		20,8	68		20,2	40
T=1000 years		29,9	142		29,0	102



Διάγραμμα 5.35: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 7 (W- N).

Πίνακας 5.34: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 7 (W- N).

Παπαθανασίου (FS= i)				Goodrich		
	γ <sub>af</sub> (m)	γ <sub>pf</sub> (m)	Δγ%	γ <sub>af</sub> (m)	γ <sub>pf</sub> (m)	Δγ%
T=50 years	0,83	1,14	38	0,93	1,11	19
T=100 years		1,26	53		1,23	32
T=1000 years		1,72	109		1,68	80



Διάγραμμα 5.36: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 7 (W- N).

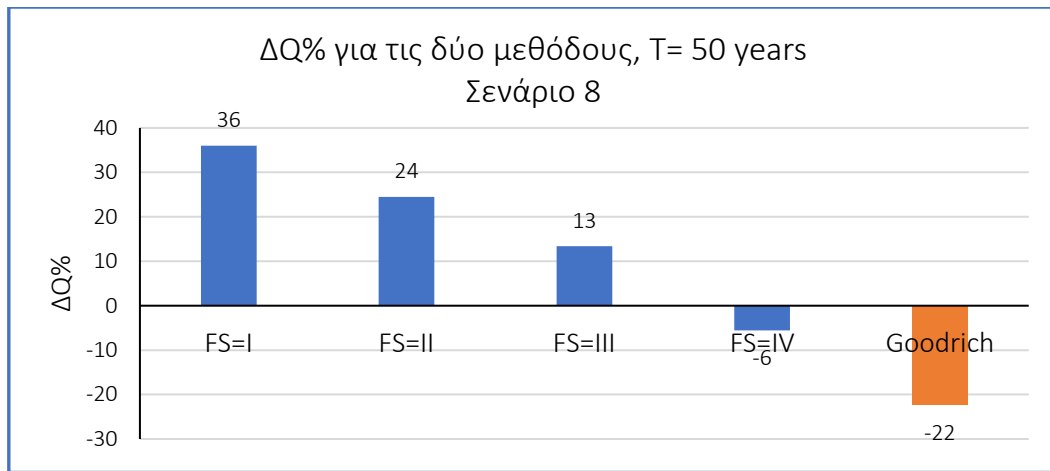
Όσον αφορά τις ενδεχόμενες διαφορετικές περιόδους επαναφοράς, οι μεταβολές παροχών αιχμής και βαθών ροής για υψηλή ένταση πυρκαγιάς κατά Παπαθανασίου είναι μεγαλύτερες απ' αυτές που προκύπτουν κατά Goodrich κατά τουλάχιστον 20 μονάδες (Διαγράμματα 5.35 και 5.36).

### 5.2.9 Σενάριο 8: Μεταβολές μεγεθών υπό υγρές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και ξηρές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (W- D)

Στο σενάριο αυτό, όπως δείχνουν ο πίνακας 5.35 και το διάγραμμα 5.37, οι παροχές αιχμής αυξάνονται στη μέθοδο Παπαθανασίου για κλάσεις πυρκαγιάς i, ii και iii, ενώ για χαμηλές έντασης πυρκαγιάς η παροχή ένα μήνα μετά τη πυρκαγιά παρουσιάζεται μειωμένη σε σχέση με την παροχή πριν τη πυρκαγιά ( $\Delta Q\% = -6\%$ ). Κατά Goodrich δε η μείωση είναι ακόμη μεγαλύτερη ( $\Delta Q\% = -22\%$ ).

Πίνακας 5.35: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 8 (W- D).

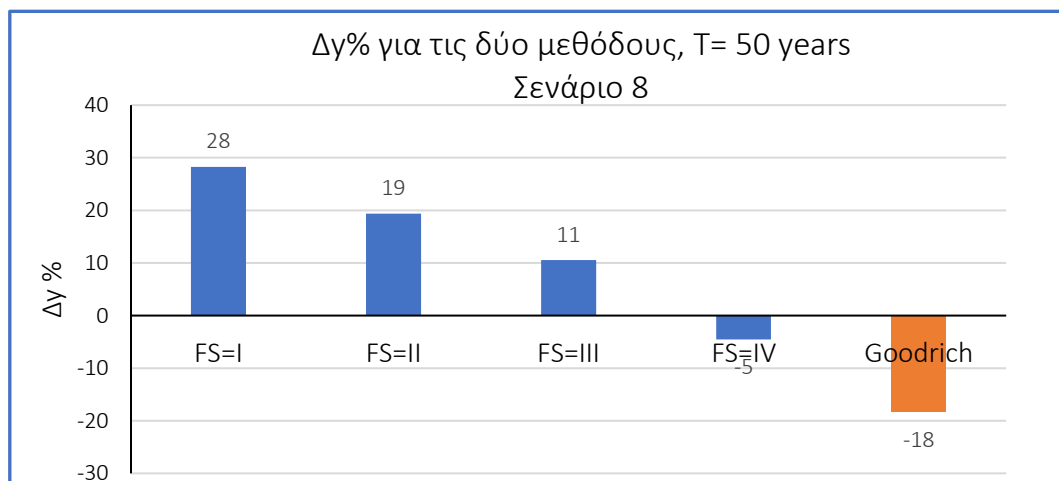
	Παπαθανασίου			Goodrich		
	$Q_{af}$ ( $m^3/s$ )	$Q_{pf}$ ( $m^3/s$ )	$\Delta Q\%$	$Q_{af}$ ( $m^3/s$ )	$Q_{pf}$ ( $m^3/s$ )	$\Delta Q\%$
FS= i	12,3	16,8	36	14,4	11,2	-22
FS= ii		15,4	24			
FS= iii		14,0	13			
FS= iv		11,7	-6			



Διάγραμμα 5.37: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 8 (W- D).

Πίνακας 5.36: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 8 (W- D).

	Παπαθανασίου			Goodrich		
	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$
FS= i	0,83	1,06	28	0,93	0,76	-18
FS= ii		0,98	19			
FS= iii		0,91	11			
FS= iv		0,79	-5			

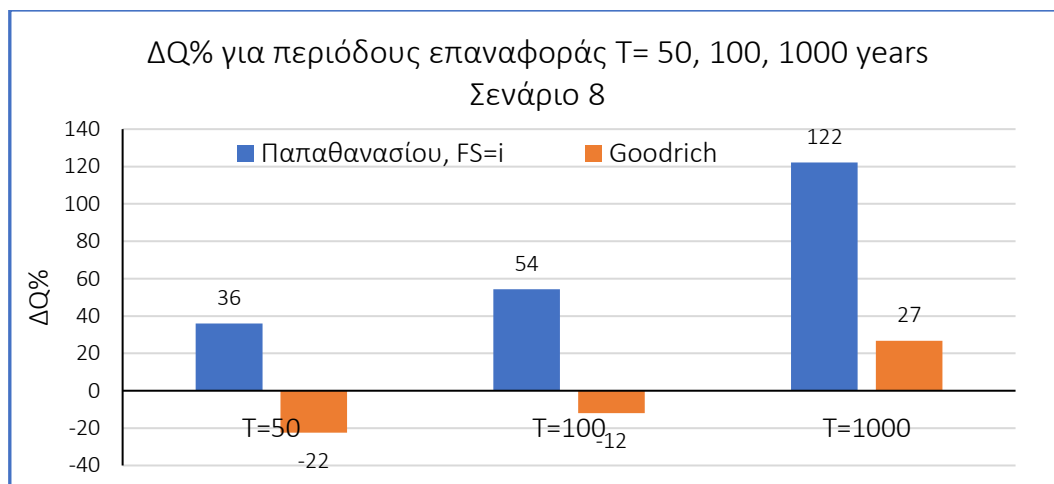


Διάγραμμα 5.38: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 8 (W- D).

Ανάλογες συνθήκες αντιστοιχούν και για τα βάθη ροής. Κατά Παπαθανασίου, σύμφωνα με τον πίνακα 5.36 και το διάγραμμα 5.38, το βάθος ροής αυξάνεται το πολύ μέχρι 28% για υψηλή ένταση της πυρκαγιάς και φτάνει να είναι μικρότερο από το αρχικό (0,83 m) για κλάση πυρκαγιάς χαμηλή (0,79 m).

Πίνακας 5.37: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 8 (W- D).

	Παπαθανασίου (FS= i)			Goodrich		
	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%
T=50 years	12,3	17	36	14,4	11,2	-22
T=100 years		19,1	54		12,7	-12
T=1000 years		27,4	122		18,2	27

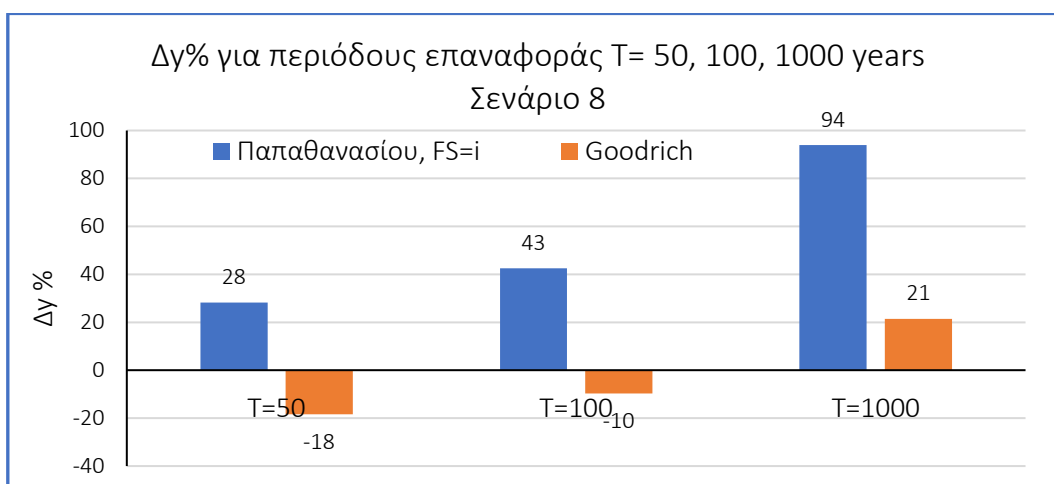


Διάγραμμα 5.39: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 8 (W- D).

Στα διαγράμματα με τις διαφορετικές περιόδους επαναφοράς 5.39 και 5.40, παρατηρείται μεγάλη απόκλιση μεταξύ των τιμών που προκύπτουν από τη μέθοδο της Παπαθανασίου για ένταση πυρκαγιάς ισχυρή με τις τιμές που προκύπτουν για Goodrich. Ενώ οι τιμές των μεγεθών αυξάνονται και για τις τρεις περιόδους κατά Παπαθανασίου, κατά Goodrich οι τιμές των παροχών αυξάνονται μόνο, αν η βροχοπτώση είναι η πλέον δυσμενής (T=1000 έτη, ΔQ% = 27%, Δγ% = 21%).

Πίνακας 5.38: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 8 (W- D).

Παπαθανασίου (FS= i)			Goodrich			
	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$
T=50 years	0,83	1,06	28	0,93	0,76	-18
T=100 years		1,18	43		0,84	-10
T=1000 years		1,60	94		1,13	21



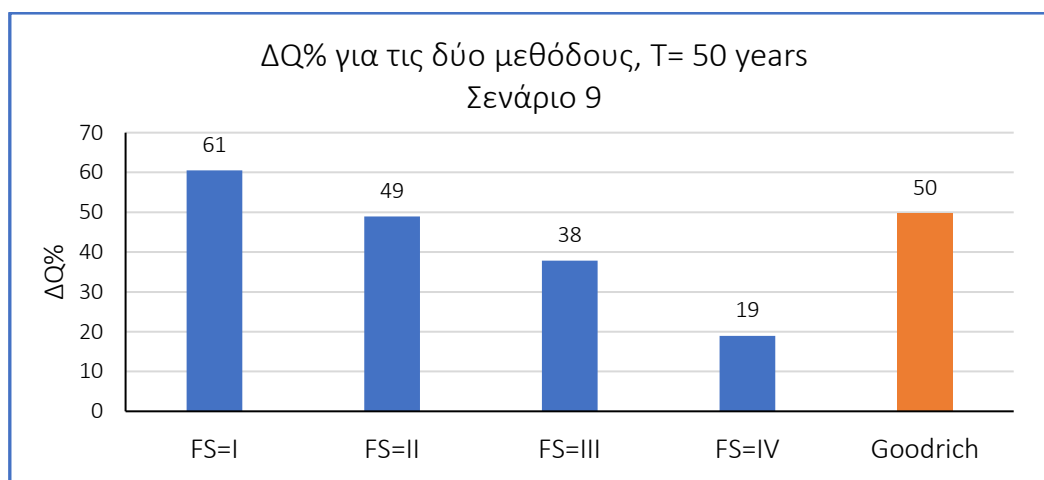
Διάγραμμα 5.40: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 8 (W- D).

### 5.2.10 Σενάριο 9: Μεταβολές μεγεθών υπό υγρές συνθήκες υγρασίας πριν τη πυρκαγιά και υγρές συνθήκες υγρασίας μετά τη πυρκαγιά (W- W)

Στο σενάριο αυτό εν αντιθέση με το προηγούμενο, οι παροχές αιχμής και τα βάθη ροής αυξάνονται και για τις δύο μεθόδους. Οι μεταβολές για τις παροχές αιχμής κυμαίνονται για τη μέθοδο Παπαθανασίου από 19% έως 61%, ενώ η αύξηση παροχών κατά Goodrich ( $\Delta Q\% = 50\%$ ) πλησιάζει σε τιμές την περίπτωση υψηλής έντασης πυρκαγιάς (Πίνακας 5.39 και Διάγραμμα 5.41).

Πίνακας 5.39: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 9 (W- W).

Παπαθανασίου				Goodrich		
	$Q_{af}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{pf}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q\%$	$Q_{af}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{pf}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q\%$
FS= i	12,3	19,8	61	14,4	21,5	50
FS= ii		18,4	49			
FS= iii		17,0	38			
FS= iv		14,7	19			



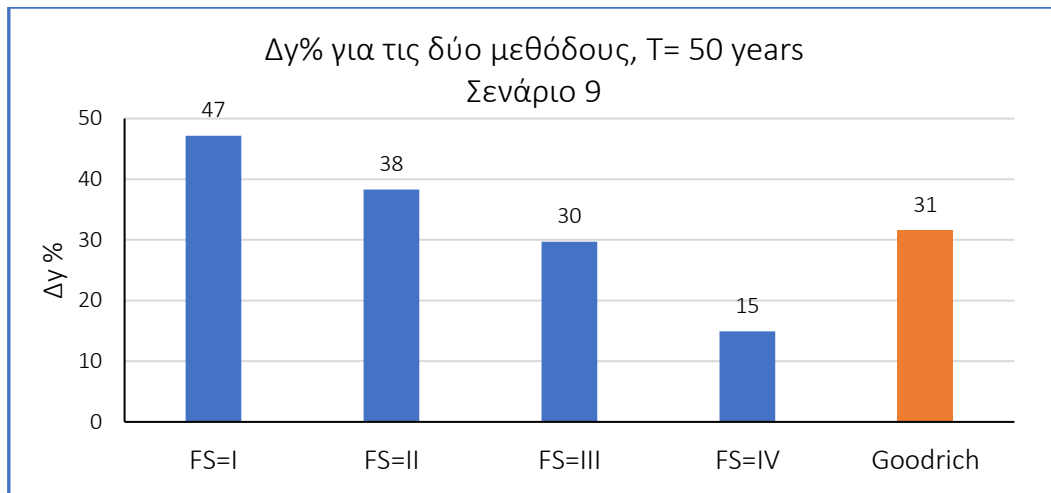
Διάγραμμα 5.41: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 9 (W- W).

Παρόμοια μπορεί να σχολιαστεί και το διάγραμμα 5.42 για τα βάθη ροής, με την διαφορά ότι η αύξηση κατά Goodrich έχει παρόμοιες τιμές με την αύξηση κατά Παπαθανασίου για μέτρια ένταση πυρκαγιάς.

Πίνακας 5.40: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 9 (W- W).

Παπαθανασίου				Goodrich		
	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta \gamma\%$	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta \gamma\%$
FS= i	0,83	1,21	47	0,93	1,23	31
FS= ii		1,14	38			
FS= iii		1,07	30			
FS= iv		0,95	15			



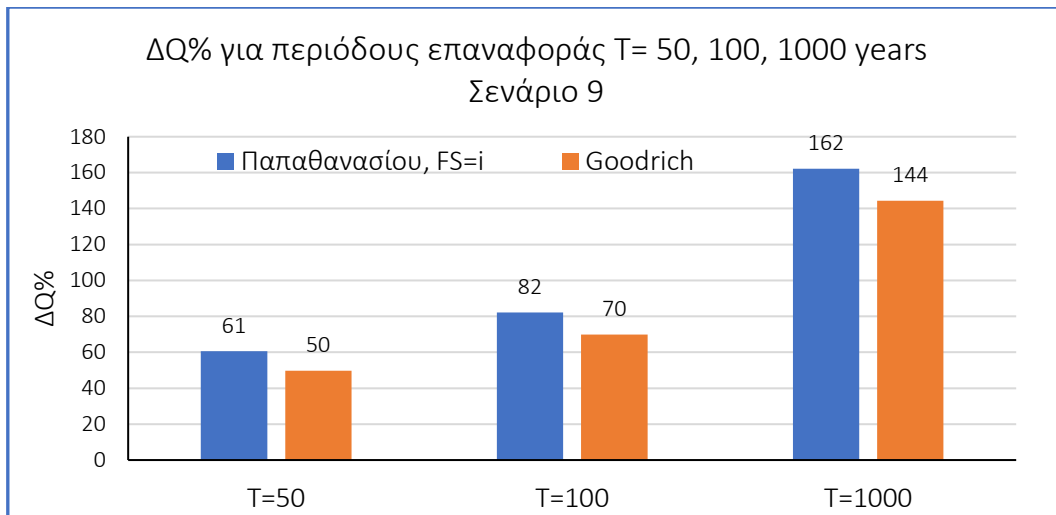


Διάγραμμα 5.42: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περίοδο επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50 έτη, για το Σενάριο 9 (W- W).

Για τις διαφορετικές περιόδους επαναφοράς, οι μεταβολές των υπό εξέταση μεγεθών που υπολογίστηκαν για τις δύο μεθόδους έχουν παρόμοιες τιμές (Διαγράμματα 5.42 και 5.43). Τέλος, ενώ όλα τα βάθη ροής κυμαίνονται από 1,21 m μέχρι 1,85 m κατά Παπαθανασίου και από 1,23m μέχρι 1,87m κατά Goodrich, οι ποσοστιαίες μεταβολές αυτών δεν είναι οι μεγαλύτερες που έχουν παρατηρηθεί στα 9 σενάρια (Πίνακας 5.42).

Πίνακας 5.41: Παροχές για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 9 (W- W).

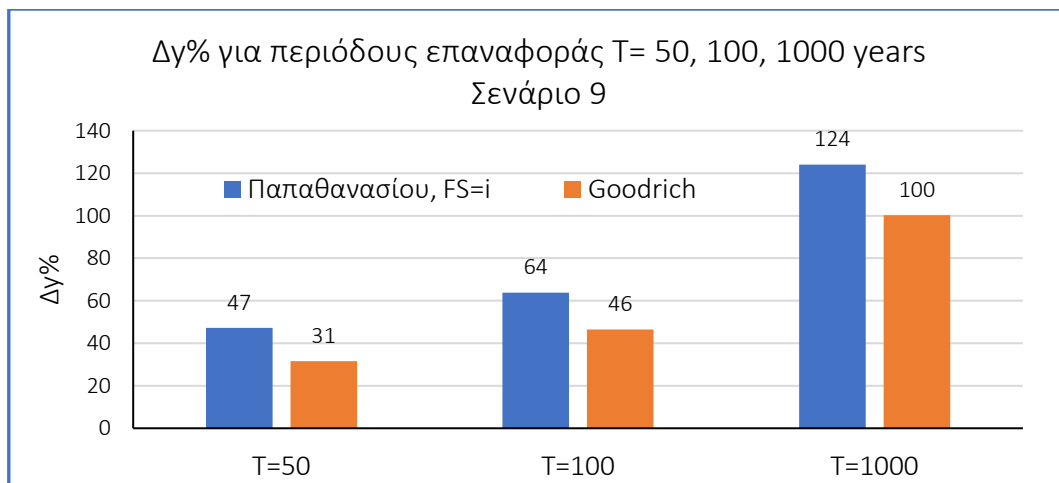
	Παπαθανασίου (FS= i)			Goodrich		
	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%	Q <sub>af</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>pf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	ΔQ%
T=50 years	12,3	20	61	14,4	21,5	50
T=100 years		22,5	82		24,4	70
T=1000 years		32,4	162		35,1	144



Διάγραμμα 5.43: Ποσοστιαίες μεταβολές παροχών για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 9 (W- W).

Πίνακας 5.42: Ομοιόμορφα βάθη ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 9 (W- W).

	Παπαθανασίου (FS= i)			Goodrich		
	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$	$\gamma_{af}$ (m)	$\gamma_{pf}$ (m)	$\Delta\gamma\%$
T=50 years	0,83	1,21	47	0,93	1,23	31
T=100 years		1,35	64		1,37	46
T=1000 years		1,85	124		1,87	100



Διάγραμμα 5.44: Ποσοστιαίες μεταβολές ομοιόμορφων βαθών ροής για τις δύο μεθόδους, για περιόδους επαναφοράς μετά τη πυρκαγιά 50, 100, 1000 έτη, για το Σενάριο 9 (W- W).

### 5.2.11 Σύγκριση αποτελεσμάτων

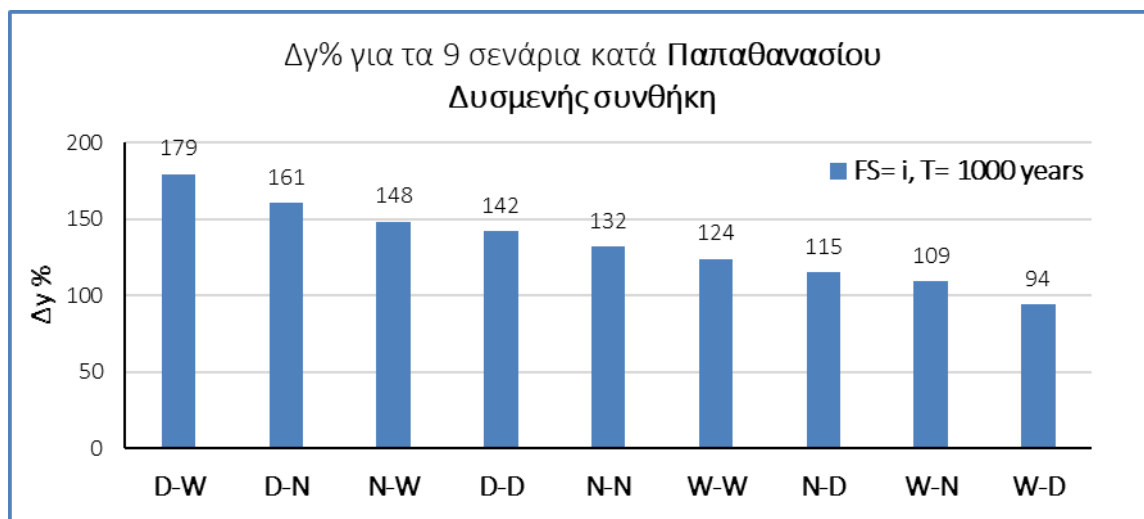
Με βάση τα 9 διαφορετικά σενάρια που παρουσιάστηκαν γραφικά παραπάνω, στο παρόν υποκεφάλαιο θα συναξιολογηθούν οι διάφορες περιπτώσεις μεταξύ τους, τόσο ως προς τις εδαφικές συνθήκες υγρασίας, όσο και ως προς τη συσχέτιση αυτών με την επίδραση της πυρκαγιάς και των ενδεχόμενων περιόδων επαναφοράς μεταπυρρικά. Αυτό θα συμβεί και για τις δύο μεθόδους (Παπαθανασίου, Goodrich) και θα παραχθεί μία σύγκριση αυτών των δύο. Ως μέτρο σύγκρισης επιλέχθηκε και παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή του ομοιόμορφου βάθους ροής πριν και μετά τη πυρκαγιά, καθώς το βάθος κατάντη κατάληγει σε υπόγειο αγωγό του δικτύου ομβρίων της Πικροδάφνης, όποτε έχει μεγαλύτερη αξία να εξαγούν συμπεράσματα ως προς αυτό το μέγεθος σε σχέση με το μέγεθος των παροχών. Οι παροχές αιχμής συσχετίζονται αναλογικά με τα βάθη ροής, γι' αυτό και η παρουσίαση τους παραλείπεται.

Αρχικά, κρίθηκε σημαντικό να παρουσιαστούν γραφικά σε φθίνουσα σειρά κατάταξης τα σενάρια των εδαφικών συνθηκών υγρασίας από το δυσμενέστερο στο ευμενέστερο, για τη πιο δυσμενής και ευμενής συνθήκη, για κάθε μέθοδο ξεχωριστά.

Συγκεκριμένα για την μέθοδο Παπαθανασίου, ως δυσμενέστερη συνθήκη επιλέχθηκε πυρκαγιά με πολύ ισχυρή ένταση ( $FS=i$ ) και βροχόπτωση μετά τη πυρκαγιά με περίοδο επαναφοράς 1000 έτη. Με βάση τη συνθήκη αυτή, ταξινομήθηκαν οι ποσοστιαίες μεταβολές των βαθών ροής ( $\Delta\gamma\%$ ) από τον δυσμενέστερο συνδιασμό εδαφικών συνθηκών υγρασίας πριν και μετά τη φωτιά στον ευμενέστερο. Από το διάγραμμα 5.45, κατατάσσονται τα ζεύγη συνθηκών υγρασίας σε φθίνουσα σειρά ως προς τη δυσμέμεια ως εξής: αρχικές ξηρές- τελικές υγρές συνθήκες (D- W), αρχικές ξηρές- τελικές κανονικές συνθήκες (D- N), αρχικές κανονικές- τελικές υγρές συνθήκες (N- W), αρχικές ξηρές- τελικές ξηρές συνθήκες (D- D), αρχικές κανονικές- τελικές κανονικές συνθήκες (N- N), αρχικές υγρές- τελικές υγρές συνθήκες (W- W), αρχικές κανονικές- τελικές ξηρές συνθήκες (N- D), αρχικές υγρές- τελικές κανονικές συνθήκες (W- N), αρχικές υγρές- τελικές ξηρές συνθήκες (W- D). Αυτή η σειρά κατάταξης ισχύει για οποιαδήποτε περίπτωση ληφθεί υπόψιν, ως προς την ένταση της πυρκαγιάς και ως προς τη περίοδο επαναφοράς.

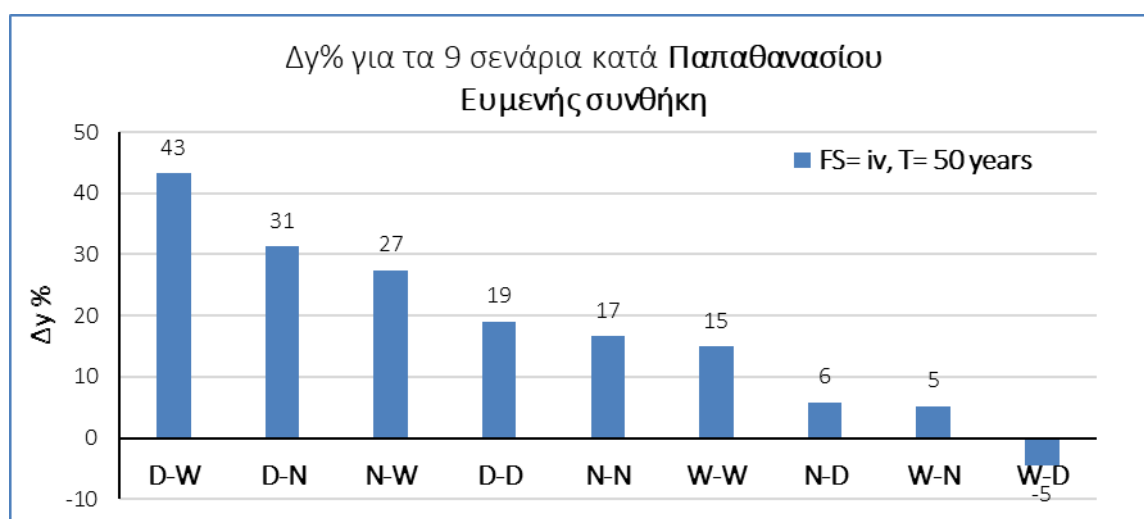
Για το σενάριο D- W , που επηρεάζει περισσότερο την υδρολογική απόκριση της λεκάνης μετά από πυρκαγιά, παρατηρείται αύξηση του ομοιόμορφου βάθους ροής κατά 179%, ενώ για το σενάριο W- D η αύξηση ανέρχεται στο 94% (Διάγραμμα 5.45). Η διαφορά μεταξύ ευμενέστερου και δυσμενέστερου σεναρίου ανέρχεται στο 75%. Επόμενο δυσμενέστερο σενάριο είναι εκείνο με ξηρές συνθήκες πριν τη πυρκαγιά και κανονικές μετά, με αύξηση βάθους ροής 161%. Ακολουθούν με παρόμοιες τιμές τα σενάρια N- W και D- D (148%, 142%). Παρόλο που στο σενάριο D- D οι ξηρές

αρχικές συνθήκες αυξάνουν την απορροή μετά τη πυρκαγιά, το σενάριο N- W έχει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές, καθώς οι τελικές εδαφικές συνθήκες (υγρές) είναι δυσμενέστερες από τις αρχικές (κανονικές). Παρατηρείται επίσης, πως τα σενάρια με ίδιες εδαφικές συνθήκες είναι στη μέση της κατάταξης των σεναρίων από το πιο δυσμενές στο πιο ευμενές. Η διαφορά βάθους διαφέρει κατά 10% μεταξύ D- D και N- N και κατά 8% μεταξύ N- N και W- W.



Διάγραμμα 5.45: Ποσοστιαίες μεταβολές βαθών ροής, για τα 9 εδαφικά σενάρια, για τη δυσμενή συνθήκη (FS=i, T= 1000 έτη) κατά Παπαθανασίου.

Ως ευμενέστερη συνθήκη επιλέχθηκε πυρκαγιά με χαμηλή ένταση (FS=iv) και βροχοπτώση μετά τη πυρκαγιά με περίοδο επαναφοράς τα 50 έτη (Διάγραμμα 5.46). Η διαφορά μεταξύ μέγιστου (Σενάριο D- W) και ελάχιστου (Σενάριο W- D) Δγ% είναι 48%. Το ομοιόμορφο βάθος παραμένει σχεδόν ίδιο μετά τη πυρκαγιά για τα σενάρια N- D και W- N (6%, 5%).



Διάγραμμα 5.46: Ποσοστιαίες μεταβολές βαθών ροής, για τα 9 εδαφικά σενάρια, για την ευμενή συνθήκη (FS=iv, T= 50 έτη) κατά Παπαθανασίου.

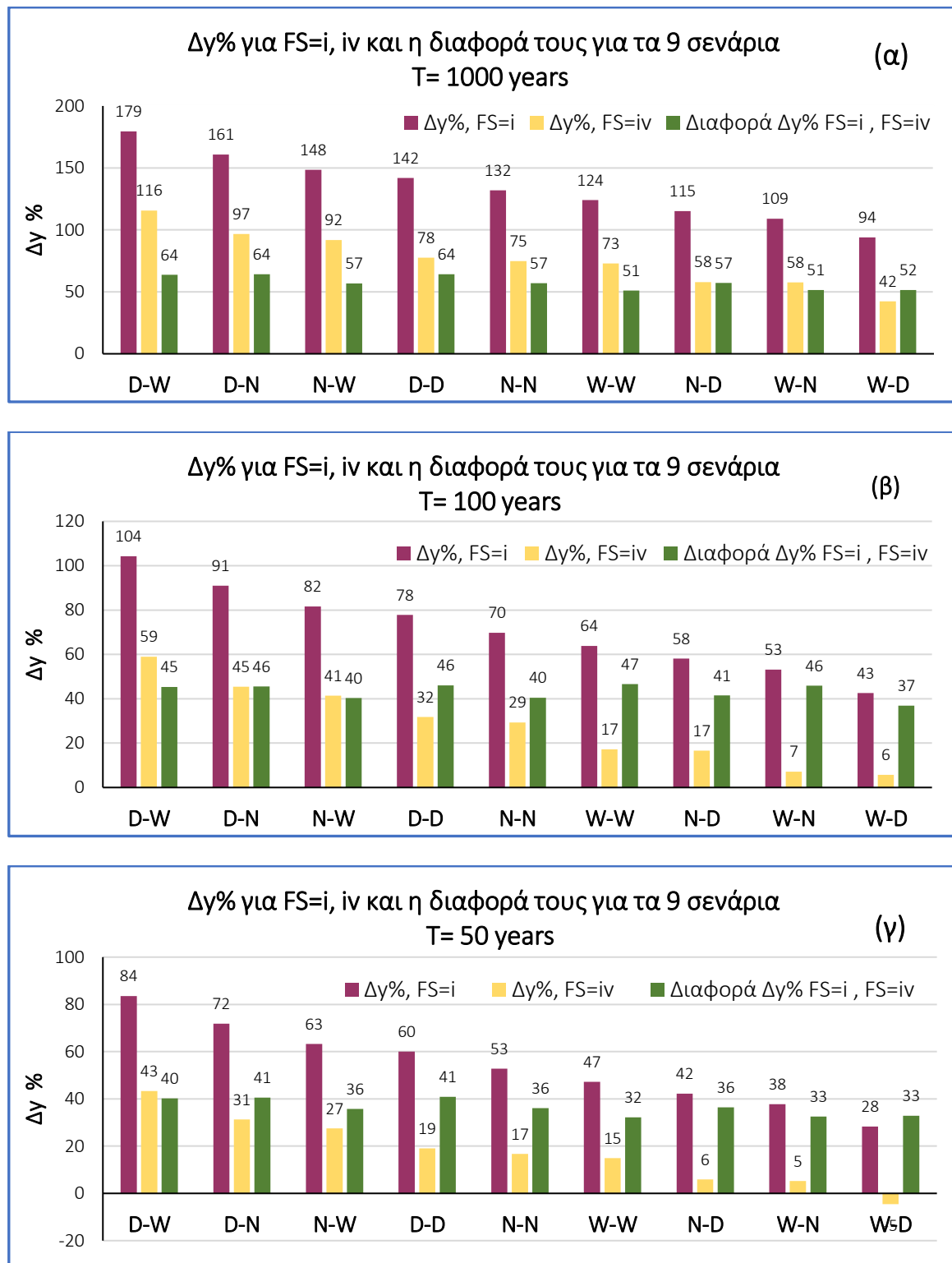
Η διαφορά των μεταβολών των βαθών ροής για το πιο δυσμενές σενάριο (D- W), μεταξύ των περιπτώσεων FS= i, T= 1000 έτη και FS= iv, T= 50 έτη είναι 136%, ενώ για το πιο ευμενές σενάριο (W- D) 99%. Συγκεκριμένα για το σενάριο W- D , ενώ στη δυσμενή περίπτωση το βάθος ροής μετά τη πυρκαγιά σχεδόν διπλασιάζεται ( $\Delta\gamma\%=94\%$ ), στην ευμενή περίπτωση παρατηρείται μικρή απομείωση ( $\Delta\gamma\%= -5\%$ ). Τέλος, συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα, οι αναλογικές διαφορές μεταξύ διπλανών σεναρίων (π.χ διαφορά  $\Delta\gamma\%$  μεταξύ D- W και D- N) στην περίπτωση του διαγράμματος 5.46 είναι μεγαλύτερες σε σχέση με εκείνες του διαγράμματος 5.45. Για παράδειγμα, ο λόγος διαφοράς  $\Delta\gamma\%$  μεταξύ D- W και D- N ως προς το  $\Delta\gamma\%$  του D- W, για το διάγραμμα 5.46 είναι 0.28, ενώ για το διάγραμμα 5.45 είναι 0.1.

Στη συνέχεια, έγινε προσπάθεια συσχέτισης του παράγοντα έντασης της πυρκαγιάς με τα 9 διαφορετικά σενάρια εδαφικών συνθηκών υγρασίας πριν και μετά τη φωτιά, αλλά και με τις ενδεχόμενες περιόδους επαναφοράς για βροχόπτωση μετά τη πυρκαγιά. Γί αυτό το σκοπό, διαμορφώθηκαν πρώτα τα παρακάτω τρία διαγράμματα για κάθε περίοδο επαναφοράς (T= 50, 100, 1000 έτη), όπου σε κάθε ένα δείχνονται και για τα 9 σενάρια συνθηκών υγρασίας (D- W, D- N, N- W, D- D, N- N, W- W, N- D, W- N, W- D) οι μεταβολές των ομοιόμορφων βαθών ροής ( $\Delta\gamma\%$ ) για ένταση πυρκαγιάς πολύ ισχυρή (FS= i), για ένταση πυρκαγιάς χαμηλή (FS= iv), όπως και η διαφορά αυτών των δύο περιπτώσεων (Διάγραμμα 5.47 α,β, γ).

Παρατηρείται ότι οι διαφορές ως απόλυτες τιμές και για τα τρία διαγράμματα παρουσιάζουν κοντινές τιμές μεταξύ τους και όλες μειώνονται, όσο το σενάριο συνθηκών υγρασίας γίνεται πιο ευμενές. Χαρακτηριστικά, στο διάγραμμα 5.47α, η διαφορά ανάμεσα στη περίπτωση υψηλής έντασης και χαμηλής έντασης για το πιο δυσμενές σενάριο ως προς τις συνθήκες υγρασίας (D- W) είναι 64% και για το πιο ευμενές (W- D) 52%. Αντίστοιχα, στο διάγραμμα 5.47β, το εύρος των διαφορών (πράσινη ράβδος) στα 9 σενάρια είναι από 45% (D- W) ως 37% (W- D) και στο διάγραμμα 5.47γ από 40% (D- W) ως 33% (W- D).

Παρά τη μείωση των απόλυτων τιμών των διαφορών όσο το σενάριο συνθηκών υγρασίας γίνεται ευμενέστερο, παρατηρώντας τα τρία παρακάτω διαγράμματα, η αναλογία αυτών ως προς τις μεταβολές του ομοιόμορφου βάθους για ισχυρή ένταση πυρκαγιάς δείχνει μία αυξητική τάση, όσο το σενάριο γίνεται ευμενέστερο. Επίσης, για T= 1000 έτη η τάση αυτή δείχνει να αυξάνεται λιγότερο σε σχέση με τις τάσεις για T= 100 και T= 50 έτη. Ένας τρόπος κατανόησης, είναι σχηματικός και γίνεται παρατηρώντας πότε σε σχέση με τα 9 ταξινομημένα σενάρια, η διαφορά ανάμεσα στις δύο εντάσεις πυρκαγιάς πλησιάζει ή υπερβαίνει την μεταβολή του βάθους για χαμηλή ένταση πυρκαγιάς. Για T=

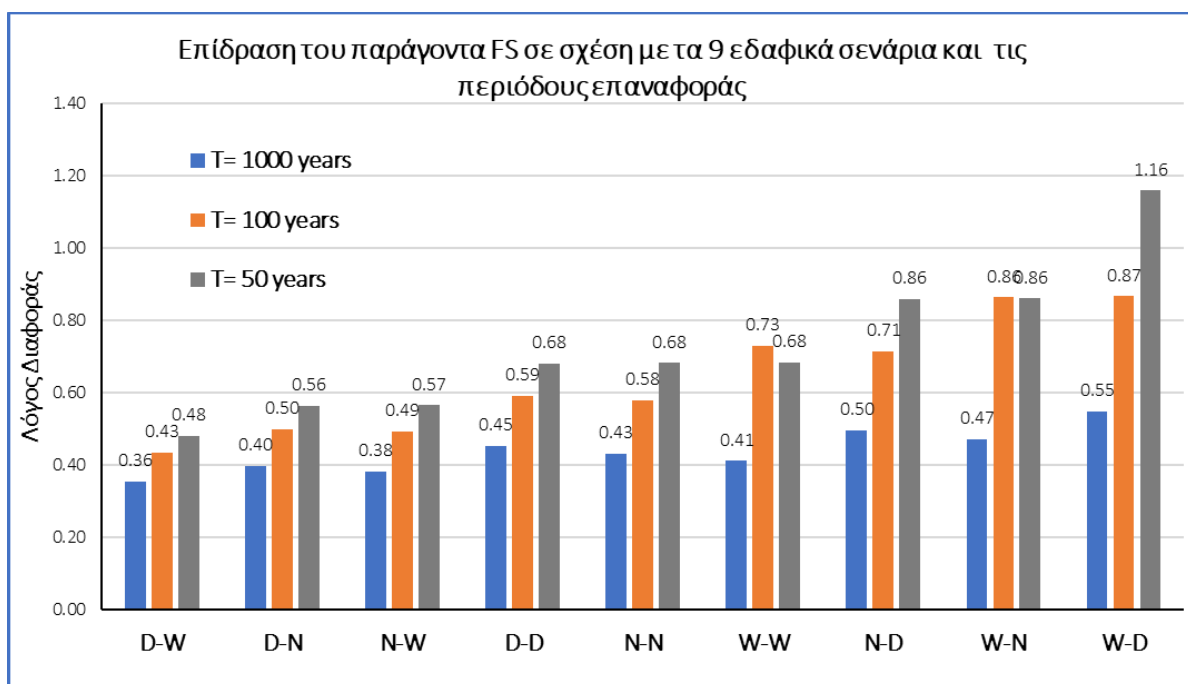
1000 έτη αυτό συμβαίνει στο 7<sup>ο</sup> δυσμενέστερο σενάριο (N- D), ενώ για T= 100 και T= 50 έτη στο 2<sup>ο</sup> δυσμενέστερο (D- N).



Διάγραμμα 5.47: Ποσοστιαίες μεταβολές βαθών ροής για FS=i, FS= iv και η διαφορά τους για (α) T=1000 έτη, (β) T=100 έτη, (γ) T=50 έτη.

Η τάση που περιγράφηκε παραπάνω, μπορεί να φανεί πιο καθαρά στο διάγραμμα 5.48, όπου δείχνεται ο λόγος της διαφοράς των μεταβολών βάθους ροής μεταξύ υψηλής και χαμηλής έντασης πυρκαγιάς, ως προς τη μεταβολή του βάθους ροής για υψηλή ένταση πυρκαγιάς, για τα 9 σενάρια συνθηκών εδαφικής υγρασίας, όπως και όλες τις περιόδους επαναφοράς. Παρατηρείται λοιπόν, πως όσο πιο ευμενές γίνεται το σενάριο των εδαφικών συνθηκών υγρασίας πριν και μετά τη πυρκαγιά, τόσο πιο πολύ αυξάνεται και ο λόγος. Επίσης, οι λόγοι είναι μεγαλύτεροι για T= 50 έτη σε σχέση με την περίπτωση των λόγων για T= 1000 έτη.

Αυτό πρακτικά δείχνει πως η επίδραση της έντασης της πυρκαγιάς είναι πιο έντονη, όσο πιο ευμενές είναι το σενάριο από άποψη εδαφικών συνθηκών υγρασίας πριν και μετά τη πυρκαγιά, όπως επίσης όσο πιο ευμενής είναι η περίοδος επαναφοράς της βροχόπτωσης μετά τη πυρκαγιά. Δηλαδή όταν μετά τη πυρκαγιά συμβαίνει μία ισχυρή βροχόπτωση και οι συνθήκες υγρασίας δυσχαιρένουν την υδρολογική απόκριση, δεν έχει ιδιαίτερη σημασία τι ένταση πυρκαγιάς έχει προηγηθεί. Αντίθετα, σε σενάρια που η βροχόπτωση μετά τη πυρκαγιά είναι χαμηλής εντάσεως και οι συνθήκες υγρασίας είναι ευνοϊκές για την απόκριση της λεκάνης, παίζει σημαντικότερο ρόλο τι ένταση είχε η πυρκαγιά.

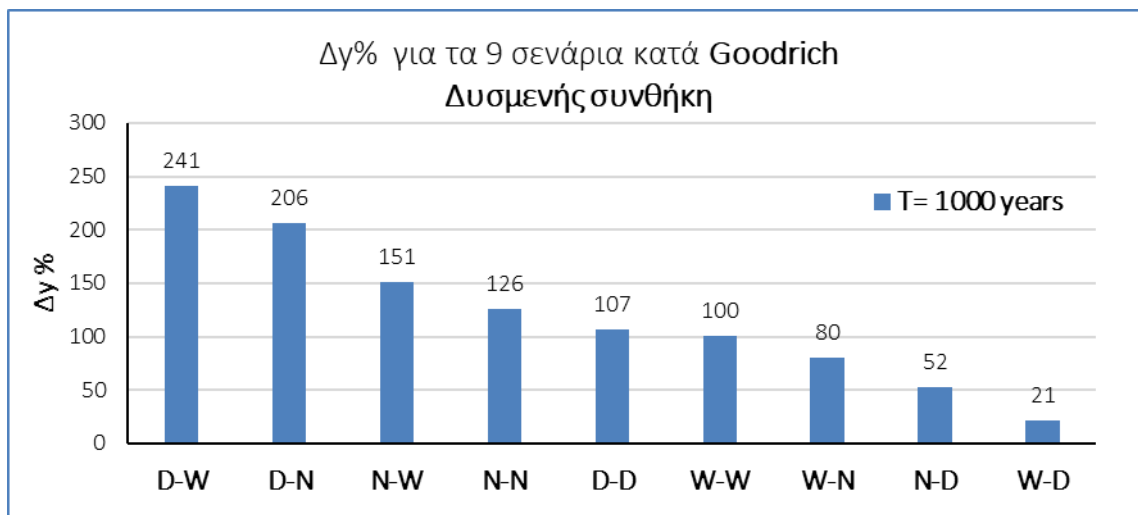


Διάγραμμα 5.48: Ποσοτική επίδραση του παράγοντα έντασης της πυρκαγιάς σε σχέση με τα 9 εδαφικά σενάρια υγρασίας και τις 3 ενδεχόμενες περιόδους επαναφοράς.

Ανάλογα διαγράμματα, όπως αυτά της Παπαθανασίου, παρουσιάζονται και για τη μέθοδο Goodrich. Η σειρά κατάταξης των ζεύγων εδαφικών συνθηκών υγρασίας μοιάζει με αυτή της Παπαθανασίου, με τις εξής διαφορές όπως φαίνονται στο διάγραμμα 5.49: 1) το σενάριο κανονικών συνθηκών πριν και

μετά είναι δυσμενέστερο ( $\Delta\gamma\% = 126\%$ ) του σεναρίου ξηρών συνθηκών πριν και μετά ( $\Delta\gamma\% = 107\%$ ), 2) το σενάριο αρχικών υγρών και τελικών κανονικών (W- N) είναι δυσμενέστερο ( $\Delta\gamma\% = 80\%$ ) του σεναρίου αρχικών κανονικών και τελικών ξηρών συνθηκών (N- D) ( $\Delta\gamma\% = 52\%$ ). Το γεγονός ότι οι κανονικές συνθήκες πριν και μετά τη πυρκαγιά επηρεάζουν δυσμενέστερα την απορροή της λεκάνης απ' ό,τι οι ξηρές συνθήκες υγρασίας πριν και μετά, χρήζει περαιτέρω επιστημονικής διερεύνησης.

Στο διάγραμμα 5.49, που παρουσιάζεται η δυσμενέστερη συνθήκη κατά Goodrich, η αύξηση του βάθους ροής για το σενάριο D- W είναι 241%, ενώ η μικρότερη αύξηση βάθους παρατηρείται για το σενάριο W- D (21%). Η διαφορά μεταξύ ευμενέστερου και δυσμενέστερου σεναρίου ανέρχεται στο 220%, δηλαδή μεταξύ των σεναρίων συνθηκών εδαφικής υγρασίας μπορούν να παρατηρηθούν μέχρι και τετραπλάσιες διαφορές στα βάθη ροής μεταπυρικά. Μετά το σενάριο D- W, ακολουθεί το σενάριο D- N με επίσης υψηλή αύξηση (206%) με το βάθος ροής να τετραπλασιάζεται. Και στα δύο παρακάτω διαγράμματα σχετικά κοντινές τιμές παρουσιάζουν τα σενάρια D- D και W- W με μεταξύ τους διαφορά 7% (Διάγραμμα 5.49) και 8% (Διάγραμμα 5.50) αντίστοιχα.

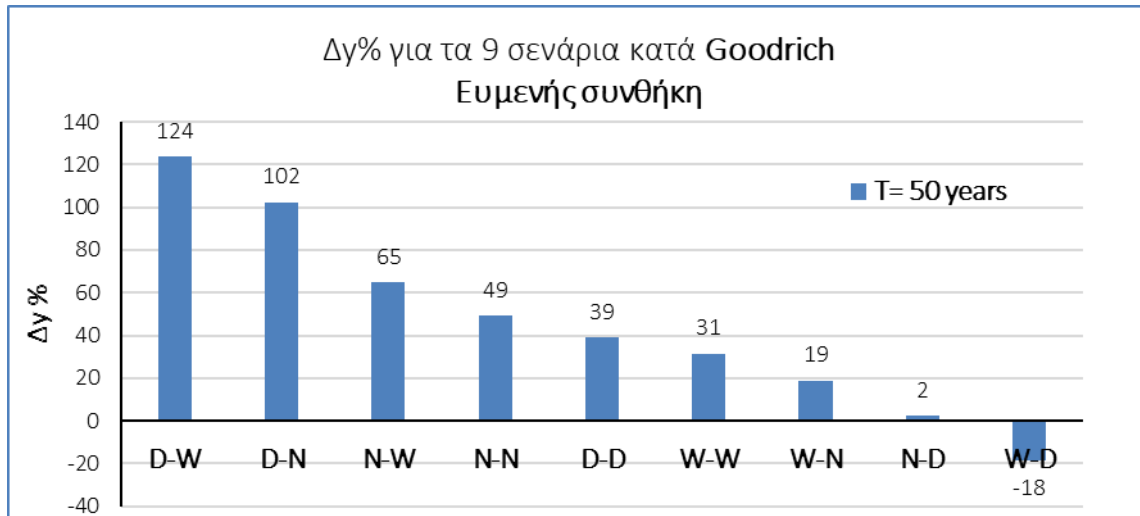


Διάγραμμα 5.49: Ποσοστιαίες μεταβολές βαθών ροής, για τα 9 εδαφικά σενάρια, για τη δυσμενή συνθήκη ( $T = 1000$  έτη) κατά Goodrich.

Για την περίπτωση βροχόπτωσης μετά τη πυρκαγιά, με περίοδο επαναφοράς  $T = 50$  έτη η σειρά κατάταξης των 9 εδαφικών παραμένει ίδια. Η μεγαλύτερη αύξηση βάθους φτάνει το 124% (Σενάριο D- W), ενώ για το πιο ευμενές σενάριο, δηλαδή για υγρό έδαφος πριν τη πυρκαγιά και ξηρό μετά, παρατηρείται μέχρι και μείωση του βάθους ροής κατά 18% (Διάγραμμα 5.50), όπως συμβαίνει και στη μέθοδο Παπαθανασίου για την ίδια περίοδο επαναφοράς. Η διαφορά μεταξύ ευμενέστερου και δυσμενέστερου σεναρίου ανέρχεται στο 142%, δηλαδή μεταξύ των σεναρίων συνθηκών εδαφικής



υγρασίας μπορεί να παρατηρηθούν μέχρι και δύομιση φορές μεγαλύτερα μεταπυρικά βάθη ροής. Τέλος, σχεδόν ίδιο παραμένει το βάθος ροής για το σενάριο N- D ( $\Delta\gamma\%=2\%$ ).



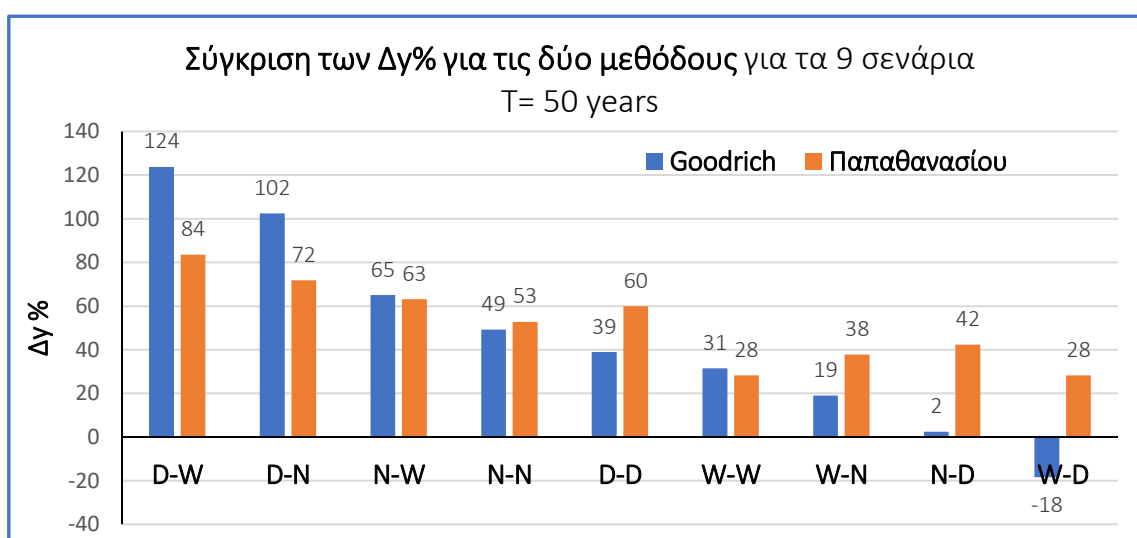
Διάγραμμα 5.50: Ποσοστιαίες μεταβολές βαθών ροής, για τα 9 εδαφικά σενάρια, για την ευμενή συνθήκη ( $T=50$  έτη) κατά Goodrich.

Συγκρίνοντας μεταξύ τους τα διαγράμματα Goodrich για τις δύο περιόδους επαναφοράς, φαίνεται από τα διαγράμματα πως για κάθε σενάριο, οι μεταβολές των βαθών ροής για  $T=50$  έτη είναι σχεδόν οι μισές σε σχέση με αυτές για  $T=1000$  έτη.

Στο παρακάτω διάγραμμα 5.51, κρατώντας ίδια περίοδο επαναφοράς και για τις δύο μεθόδους και ακολουθώντας τη σειρά δυσμέλειας της μεθόδου Goodrich ως προς τα σενάρια εδαφικής υγρασίας, φαίνεται για ποιες περιπτώσεις της μεθόδου Παπαθανασίου ( $FS=i, ii, iii, iv$ ), οι μεταβολές του βάθους ροής συνάδουν καλύτερα με αυτές του Goodrich. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον πίνακα 5.43, για τα σενάρια D- W, D- N, N- W, N- N, τα μεγέθη κατά Goodrich έχουν μεγαλύτερη σχέση με αυτά της Παπαθανασίου για πολύ ισχυρή ένταση πυρκαγιάς ( $FS=i$ ). Για τα σενάρια D- D, W- N και W- N, τα μεγέθη κατά Goodrich συμφωνούν περισσότερο με αυτά της Παπαθανασίου για περίπτωση μέτριας έντασης πυρκαγιάς ( $FS=iii$ ). Τέλος, για τα πιο ευμενή σενάρια N- D και W- D, οι μεταβολές του βάθους ροής που προκύπτουν από τη μέθοδο Goodrich βρίσκονται πιο κόντα με τιμές που προκύπτουν από τη μέθοδο Παπαθανασίου για την περίπτωση χαμηλής έντασης πυρκαγιάς.

Πίνακας 5.43: Σύγκριση των Δγ% για τις δύο μεθόδους, για τα 9 σενάρια.

Σύγκριση των Δγ% για τις δύο μεθόδους, για τα 9 σενάρια									
T= 50 years	D-W	D-N	N-W	N-N	D-D	W-W	W-N	N-D	W-D
Goodrich	124	102	65	49	39	31	19	2	-18
Παπαθανασίου	84	72	63	53	60	28	38	42	28
	FS= i	FS= i	FS= i	FS= i	FS= iii	FS= iii	FS= iii	FS= iv	FS= iv



Διάγραμμα 5.51: Σύγκριση των μεθόδων Παπαθανασίου και Goodrich ως προς τις ποσοστιαίες μεταβολές του βάθους ροής για τα 9 εδαφικά σενάρια, για περίοδο επαναφοράς 50 έτη.

Παρατηρείται δηλαδή, πως τα πιο δυσμενή σενάρια κατά Goodrich παρουσιάζουν μεγαλύτερη συμφωνία με τις αντίστοιχες περιπτώσεις κατά Παπαθανασίου, που έχουν δυσμενέστερες συνθήκες από άποψη έντασης πυρκαγιάς, ενώ τα μέσα και πιο ευμενή σενάρια κατά Goodrich με περιπτώσεις κατά Παπαθανασίου, που οι εντάσεις πυρκαγιάς είναι μέσες και χαμηλές αντίστοιχα.

Ένα άλλο σημείο άξιο σχολιασμού από το παραπάνω διάγραμμα είναι πως όταν τα σενάρια εδαφικών συνθηκών υγρασίας είναι δυσμενή (D- W,D- N), τα μεγέθη κατά Goodrich είναι αρκετά ψηλότερα από αυτά της Παπαθανασίου και όταν τα σενάρια είναι ευμενή (W- N,N- D, W- D) είναι αρκετά χαμηλότερα. Η μέθοδος Goodrich δηλαδή, παρουσιάζει μεγαλύτερα διαστήματα εμπιστοσύνης σε σχέση με τη Παπαθανασίου, άρα είναι πιο εύκολο να λάβει περισσότερο ακραίες τιμές. Χαρακτηριστικά, για ξηρές συνθήκες πριν και υγρές συνθήκες μετά τη πυρκαγιά (D- W), οι δύο μέθοδοι διαφέρουν μεταξύ τους κατά 40%, ενώ και για ξηρές πριν και κανονικές μετά (D- N), κατά 30%. Αντίστοιχα, για τα σενάρια N- D και W- D, κατά Goodrich οι μεταβολές του βάθους ροής είναι χαμηλότερες από αυτές της Παπαθανασίου κατά 40% και 46% αντίστοιχα.

## 6 Συμπεράσματα

Σε σχέση με την εφαρμογή στην υπό εξέταση περιοχή, παράχθηκαν τα εξής συμπεράσματα:

Σύμφωνα με τη μέθοδο Παπαθανασίου, τα σενάρια που αφορούν τις εδαφικές συνθήκες υγρασίας πριν και μετά τη πυρκαγιά από το πιο δυσμενές στο πιο ευμενές, σε σχέση με τη μεταβολή του βάθους ροής, ακολουθούν την εξής σειρά: αρχικές ξηρές- τελικές υγρές συνθήκες (D- W), αρχικές ξηρές- τελικές κανονικές συνθήκες (D- N), αρχικές κανονικές- τελικές υγρές συνθήκες (N- W), αρχικές ξηρές- τελικές ξηρές συνθήκες (D- D), αρχικές κανονικές- τελικές κανονικές συνθήκες (N- N), αρχικές υγρές- τελικές υγρές συνθήκες (W- W), αρχικές κανονικές- τελικές ξηρές συνθήκες (N- D), αρχικές υγρές- τελικές κανονικές συνθήκες (W- N), αρχικές υγρές- τελικές ξηρές συνθήκες (W- D).

Η περίπτωση που επιφέρει την μεγαλύτερη αύξηση βάθους κατά Παπαθανασίου, είναι για το σενάριο με αρχικές ξηρές και υγρές τελικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας, για τη πλέον δυσμενή περίπτωση με περίοδο επαναφοράς  $T=1000$  έτη και ισχυρή ένταση πυρκαγιάς ( $FS=i$ ). Γι' αυτή τη περίπτωση το βάθος ροής τριπλασιάζεται. Έχει σημασία να σχολιαστεί πως για υγρές αρχικές και ξηρές τελικές συνθήκες, με χαμηλή ένταση πυρκαγιάς και συνήθους περιόδου επαναφοράς, το βάθος φτάνει στο σημείο να μειώνεται ένα μήνα μετά τη πυρκαγιά, αποδεικνύοντας την απουσία επίδρασης της πυρκαγιάς στην απόκριση.

Κατά Παπαθανασίου, όσο πιο ξηρό είναι το έδαφος πριν τη πυρκαγιά και όσο πιο υγρό μετά, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η επίδραση του, στην αύξηση του βάθους ροής, άρα και στην υδρολογική απόκριση της λεκάνης.

Μέσα από τη διερεύνηση της επίδρασης της έντασης της πυρκαγιάς σε σχέση με τις συνθήκες υγρασίας και την ένταση της βροχόπτωσης, παρατηρήθηκε πως όσο πιο ευμενές είναι το σενάριο από άποψη εδαφικών συνθηκών υγρασίας πριν και μετά τη πυρκαγιά και όσο πιο χαμηλή είναι η ένταση της βροχόπτωσης μετά τη πυρκαγιά, τόσο πιο έντονη θα είναι και η επίδραση της έντασης της πυρκαγιάς στην απόκριση. Δηλαδή, όταν μετά τη πυρκαγιά συμβαίνει μία ισχυρή βροχόπτωση και οι συνθήκες υγρασίας πριν και μετά δυσχαιρένουν την υδρολογική απόκριση, δεν έχει ιδιαίτερη σημασία τι ένταση πυρκαγιάς έχει προηγηθεί. Αντίθετα, σε σενάρια που η βροχόπτωση μετά τη πυρκαγιά είναι χαμηλής εντάσεως και οι συνθήκες υγρασίας είναι ευνοϊκές για την απόκριση της λεκάνης, παίζει σημαντικότερο ρόλο τι ένταση είχε η πυρκαγιά.

Στην κατάταξη των σεναρίων εδαφικών συνθηκών υγρασίας κατά Goodrich, σε σχέση με την κατάταξη κατά Παπαθανασίου, το σενάριο κανονικών συνθηκών πριν και μετά τη πυρκαγιά είναι δυσμενέστερο του σεναρίου ξηρών συνθηκών πριν και μετά, όπως επίσης και το σενάριο αρχικών υγρών και τελικών

κανονικών συνθηκών (W- N) είναι δυσμενέστερο του σεναρίου αρχικών κανονικών και τελικών ξηρών συνθηκών (N- D). Η συγκεκριμένη παρατήρηση χρήζει περαιτέρω επιστημονικής διερεύνησης.

Σύμφωνα με τη μέθοδο Goodrich, για την πλέον δυσμενή περίπτωση, δηλαδή για αρχικές ξηρές και υγρές τελικές συνθήκες με περίοδο επαναφοράς  $T= 1000$  έτη, το βάθος ροής τετραπλασιάζεται, ενώ για το πλέον ευμενές (υγρές αρχικές και ξηρές τελικές συνθήκες,  $T= 50$  έτη), όπως συμβαίνει και στη μέθοδο Παπαθανασίου, το βάθος ροής μετά τη πυρκαγιά μειώνεται.

Από τη προσπάθεια σύγκρισης των δύο μεθόδων, χρησιμοποιώντας ως βάση τη σειρά κατάταξης των 9 σεναρίων υγρασίας κατά Goodrich και συγκρίνοντας τα ίδια σενάρια για τις δύο μεθόδους παρατηρήθηκε το εξής: τα πιο δυσμενή σενάρια κατά Goodrich, παρουσιάζουν μεγαλύτερη συμφωνία με τις περιπτώσεις κατά Παπαθανασίου με δυσμενέστερες συνθήκες από άποψη πυρκαγιάς, ενώ τα μέσα και πιο ευμενή σενάρια κατά Goodrich, με περιπτώσεις κατά Παπαθανασίου που οι εντάσεις πυρκαγιάς είναι μέσες και χαμηλές αντίστοιχα. Δηλαδή, για τα σενάρια D- W, D- N, N- W, N- N, τα μεγέθη κατά Goodrich έχουν μεγαλύτερη σχέση με αυτά της Παπαθανασίου για πολύ ισχυρή ένταση πυρκαγιάς ( $FS= i$ ), ενώ για τα πιο ευμενή σενάρια, N- D και W- D, οι μεταβολές του βάθους ροής που προκύπτουν από τη μέθοδο Goodrich βρίσκονται πιο κόντα με τιμές της Παπαθανασίου για την περίπτωση χαμηλής έντασης πυρκαγιάς.

Επιπλέον, όταν τα σενάρια εδαφικών συνθηκών υγρασίας είναι δυσμενή (D- W, D- N), τα μεγέθη κατά Goodrich είναι αρκετά ψηλότερα από αυτά της Παπαθανασίου και όταν τα σενάρια είναι ευμενή (W- N, N- D, W- D), είναι αρκετά χαμηλότερα. Η μέθοδος Goodrich δηλαδή, παρουσιάζει μεγαλύτερα διαστήματα εμπιστοσύνης σε σχέση με αυτά της Παπαθανασίου, άρα είναι πιθανότερο να λάβει περισσότερο ακραίες τιμές.

Όσον αφορά τη θεωρητική εφαρμογή ανάλυσης ευαισθησίας κατά Monte Carlo, με δείγμα τις 9000 παροχές αιχμής ένα μηνά μετά τη πυρκαγιά, παρατηρούνται τα ακόλουθα σημεία ενδιαφέροντος.

Αυξάνοντας τις τιμές των παραμέτρων ποσοστού καμένης έκτασης ( $p_i$ ), περιόδου επαναφοράς (T), συντελεστή απορροής πριν τη πυρκαγιά ( $CN_{af}$ ), διάρκειας βροχής (k) και έκτασης λεκάνης (A), η ευαισθησία της παροχής ως προς αυτές μειώνεται, ενώ τα εύρη των συντ. διακύμανσης είναι παρόμοια. Η μεταπυρική παροχή παρουσιάζει σταθερή συμπεριφορά ως προς τις μεταβολές των μεγεθών λ (συντ. που εξαρτάται από το ποσοστό της επιφάνειας που είναι μικρότερο ή μεγαλύτερο των 160m) και b (συντελεστής που εξαρτάται από την ένταση της πυρκαγιάς). Επίσης, η παροχή παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία ως προς τις ξηρές εδαφικές συνθήκες υγρασίας σε σχέση με τις υγρές. Τέλος, ο συντελεστής διακύμανσης για την έκταση της λεκάνης απορροής (A) είναι μικρότερος για όλες τις τιμές του A από τον συνολικό συντελεστή διακύμανσης του δείγματος.

## 7 Βιβλιογραφία

### Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Batalla, R.J., (2002), *Hydrological implications of forest fires: an overview*, In Pardini, G., Pinto, J., (Eds.), *Fire, Landscape and Biodiversity*, Diversitas, Universitat de Girona, pp. 99-116.
- Batelis, S. and Nalbantis, I., (2014), *Potential effects of forest fires on streamflow in the Enipeas river basin, Thessaly, Greece*, *Environmental Processes*, 1 (1), 73–85.
- Beeson P.C., Martens S.N. and Breshears D.D., (2001), *Simulating overland flow following wildfire: mapping vulnerability to landscape disturbance*, *Hydrological Processes*, Vol. 15, pp. 2917-2930.
- Benavides-Solorio, J. & MacDonald, L. H., (2001), *Post-fire runoff and erosion from simulated rainfall on small plots, Colorado Front Range*, *Hydrological Processes*, 15 (15), 2931-2952.
- Bisson, M., Favalli, M., Fornaciai, A., Mazzarini, F., Isola, I., Zanchetta, G. and Pareschi, M.T., (2005), *A rapid method to assess fire-related debris flow hazard in the Mediterranean region: An example from Sicily (southern Italy)*, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 7, pp. 217-231.
- Brown J.A.H., (1972), *Hydrologic effects of a bushfire in a catchment in southeastern New South Wales*, *Journal of Hydrology*, Vol. 15, pp. 77-96.
- Campbell, R.E., Baker, M.B., Ffolliott, P.F. and Larson, F.R., (1977), *Wildfire effects on a ponderosa pine ecosystem: an Arizona case study*, USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station Forest Service, Research Paper RM-191, Fort Collins, Colorado.
- Campo, J., Andreu, V., Gimeno-García, E., González, O. and Rubio, J.L., (2006), *Occurrence of soil erosion after repeated experimental fires in a Mediterranean environment*, *Geomorphology*, Vol. 82, pp. 376-387.
- Canfield, H. E., Goodrich, D. C., & Burns, I. S, (2005), *Selection of parameters values to model post-fire runoff and sediment transport at the watershed scale in southwestern forests*, In *Managing watersheds for human and natural impacts: engineering, ecological, and economic challenges* (pp. 1-12).
- Cannon, S.H. and Reneau, S.L., (2000), *Conditions for generation of fire related debris flows, Capulin Canyon, New Mexico*, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 25, pp. 1103-1121.
- Cannon, S.H., Gartner, J.E., Wilson, R.C., Bowers, J.C. and Laber, J.L., (2008), *Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California*, *Geomorphology*, Vol. 96, pp. 250-269.
- Carey, A., Evans, M., Hann, P., Lintermans, M., MacDonald, T., Ormay, P., Sharp, S., Shorthouse, D. and Webb, N., (2003), *Technical Report 17, Wildfires in the ACT 2003: Report on initial impacts on natural ecosystems*, Environment ACT, Canberra.
- Cerda, A. and Lasanta, T., (2005), *Long-term erosional responses after fire in the Central Spanish Pyrenees 1. Water Sediment Yield*, *Catena*, 60(1), 59-80.
- Cerrelli, G. A., (2005), *FIRE HYDRO: A simplified method for predicting peak discharges to assist in the design of flood protection measures for western wildfires*, In Moglen, Glenn E., eds. *Proceedings: 2005 watershed management conference— managing watersheds for human*

and natural impacts: engineering, ecological, and economic challenges; 2005 July 19-22; Williamsburg, VA. Alexandria, VA: American Society of Civil Engineers: 935-941.

- Chen, L., Berli, M. and Chief, K., (2013), *Examining modeling approaches for the rainfall-runoff process in wild fire affected watersheds: using San Dimas experimental forest*, Journal of the American Water Resources Association, 49 (4), 851–866.
- Cronshey, R., McCuen, R., Miller, N., Rawls, W., Robbins, S., & Woodward, D., (1986), *Urban Hydrology for Small Watersheds; United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service: Washington, DC, USA.*
- Cydzik, K., & Hogue, T. S., (2009), *Modeling postfire response and recovery using the hydrologic engineering center hydrologic modeling system (HEC-HMS)<sup>1</sup>*, JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 45(3), 702-714.
- DeBano, L.F., Neary, D.G. and Folliott, P.F., (2005), *Soil physical properties*, In: Neary, D.G., Ryan, K.C. and DeBano, L.F. (Eds.), *Wildland Fire in Ecosystems. Effects of Fire on Soil and Water*, General Technical Report RMRS-GTR-42-Volume 4: Rocky Mountain Research Station, 250, USDA Forest Service.
- Dimitriadis, P., Tegos, A., Oikonomou, A., Pagana, V., Koukouvinos, A., Mamassis, N., Koutsoyiannis D. & Efstratiadis, A, (2016), *Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping*, Journal of Hydrology, 534, 478-492.
- Dragovich, D. and Morris, R., (2002), *Fire intensity, slope wash and bio transfer of sediment in eucalypt forest, Australia*, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 27, pp. 309-1319.
- Eckhardt R., (1987), *Stan Ulam, John von Neumann, and the Monte Carlo method*, Los Alamos Science 15 (Special Issue), 131–137.
- Efstratiadis, A., Koussis, A.D., Koutsoyiannis, D., Mamassis, N., (2014), *Flood design recipes vs. reality: can predictions for ungauged basins be trusted?*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 14(6), 1417-1428.
- Foltz, R. B., Robiochaud, P. R., & Rhee, H., (2009), *A synthesis of post-fire road treatments for BAER teams: methods, treatment effectiveness, and decisionmaking tools for rehabilitation.*
- Gardner, R.H., Huff, D.D., O'Neill, R.V., Mankin, J.B. Carney, J. and Jones, J., (1980), *Application of error analysis to a marsh hydrology model*, Water Resources Research, 16(4), pp. 659-664.
- Garren, K. H., (1943), *Effects of fire on vegetation of the southeastern United States*, The Botanical Review, 9(9), 617-654.
- Goodrich, D. C., Canfield, H. E., Burns, I. S., Semmens, D. J., Miller, S. N., Hernandez, M. Levick, L. R, Guertin, D.P & Kepner, W. G, (2005), *Rapid post-fire hydrologic watershed assessment using the AGWA GIS-based hydrologic modeling tool*, In *Managing watersheds for human and natural impacts: engineering, ecological, and economic challenges* (pp. 1-12).
- Harlin, J., & Kung, C. S., (1992), *Parameter uncertainty and simulation of design floods in Sweden*, Journal of hydrology, 137(1-4), 209-230.
- Hawkins, R.H., (1993), *Asymptotic Determination of Curve Numbers from Rainfall – Runoff Data*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering - ASCE, 119(2): 334-345.

- Higginson, B. and Jarnecke, J., (2007), *Salt Creek BAER-2007 Burned Area Emergency Response*, Provo, UT: Unita National Forest, Hydrology Specialist Report, 11.
- Hornberger, G. M., & Spear, R. C., (1981), *Approach to the preliminary analysis of environmental systems*, Journal of Environmental Management, 12(1), 7-18.
- Iliopoulou T., Malamos, N. and Koutsoyiannis, D., (2021), *Regional ombrian curves: a methodology for diverse hydrometeorological regimes*, Frontiers in Climate, in review.
- Inbar, M., Tamir, M. and Wittenberg, L., (1998), *Runoff and erosion processes after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area*, Geomorphology, Vol. 24, pp. 17-33.
- Johansen, M.P., Hakonson, T.E., Breshears, D.D., (2001), *Post-fire runoff and erosion from rainfall simulation: contrasting forests with shrublands and grasslands*, Hydrological Processes, 15: 2953–296.
- Keeley, J.E., (2009), *Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage*, International Journal of Wildland Fire, Vol. 18, pp. 116-126.
- Koutsoyiannis, D., (2021), *Stochastics of Hydroclimatic Extremes - A Cool Look at Risk*, Edition 0, Kallipos, Athens.
- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D. and Manetas, A., (1998), *A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships*, Journal of Hydrology, 206 (1-2), 118–135.
- Kozlowski T. T., (1975), *Fire and Ecosystems (Physiological Ecology)*, Academic Press.
- Kung, C. S., (1989), *Uncertainty in Dam Break Flow Simulation: Paper presented at ICWRS-Workshop on Risk and Uncertainty in Hydrologic Design Oslo, Norway, February-1989*, Hydrology Research, 20 (4-5), 249-256.
- Kutiel, P. Lavee, H. Segev, M and Benyamini, Y., (1995), *The effect of fire induced surface heterogeneity on rainfall-runoff-erosion relationships in an eastern Mediterranean ecosystem, Israel*, CATENA, Vol. 25, pp.77-87.
- Lavabre, J., Sempere Torres, D. and Cernesson, F., (1993), *Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after a wildfire*, Journal of Hydrology, Vol. 142, pp. 273-299.
- Leopardi, M., & Scorzini, A. R., (2015), *Effects of wildfires on peak discharges in watersheds*, iForest-Biogeosciences and Forestry, 8 (3), 302–307.
- Livingston, R.K., Earles, T.A., and Wright, K.R., (2005), *Los Alamos post-fire watershed recovery: A curve-number based evaluation*, In: G.E. Moglen, ed. *Managing Watersheds for Human and Natural Impacts*. Alexandria, VA: American Society of Civil Engineers, 471–481.
- Marzano, R., Lingua, E. and Garbarino, M., (2012), *Post-fire effects and shortterm regeneration dynamics following high-severity crown fires in a Mediterranean forest*, iForest – Biogeosciences and Forestry, Vol. 5, pp. 93- 100.
- Mayor, A.G., Bautista, S., Llovet, J. and Bellot, J., (2007), *Post-fire hydrological and erosional responses of a Mediterranean landscape: Seven years of catchment-scale dynamics*, Catena, Vol. 71, pp. 68-75.

- Metropolis, N. and Ulam, S., (1949), *The Monte Carlo method*, Journal of the American Statistical Association, 44, 335–341.
- Michel, C., Andréassian, V., & Perrin, C., (2005), *Soil conservation service curve number method: How to mend a wrong soil moisture accounting procedure?*, Water Resources Research, 41 (2).
- Mishra, S. K. and Singh, V. P., (2003), *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*, Water Science and Technology Library, Vol. 42, Kluwer Academic Publishers, Louisiana State University, Baton Rouge, U.S.A.
- Mitsopoulos, I. D., and Mironidis, D., (2006), *Assessment of post fire debris flow potential in a Mediterranean type ecosystem*, WIT Transactions on Ecology and the Environment, 90.
- Moffet, C. A., Pierson, F. B., Robichaud, P. R., Spaeth, K. E., & Hardegree, S. P., (2007), *Modeling soil erosion on steep sagebrush rangeland before and after prescribed fire*, Catena, 71 (2), 218-228.
- Moody, J.A. and Martin, D.A., (2001), *Initial hydrologic and geomorphic response following a wildfire in the Colorado front range*, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 26, pp. 1049-1070.
- Neary, D.G., Klopatek, C.C., DeBano, L.F., Folliott, P.F., (1999), *Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis*, Forest Ecology and Management, 122: 51–71.
- Nepstad, D., Veríssimo, A., Alencar, A., Nobre, C., Lima, E., Lefebvre, P., Schlesinger, P., Potter, C., Moutinho, P., Mendoza, E., Cochrane, M. and Brooks, V., (1999), *Large-scale impoverishment of Amazonian forest by logging and fire*, Nature, Vol. 398, pp. 505–508.
- NRCS (Natural Resources Conservation Service), (2015), *Hydrologic Analyses of Post-Wildfire Conditions, DRAFT Technical Note*, Natural Resources Conservation Service, Washington, DC: US Department of Agriculture.
- Papathanasiou Chrysoula, (2018), *Development of a methodology for the estimation of the dynamic evolution of the flood-related hydrological behavior of periurban catchments under post-fire conditions*, National Technical University of Athens, Department of Water Resources and Environmental Engineering.
- Papathanasiou, C., Makropoulos, C. and Mimikou, M., (2015), *Hydrological modelling for flood forecasting: calibrating the post-fire initial conditions*, Journal of Hydrology, Vol. 529, Part 3, pp. 1838-1850.
- Pausas, J.G. and Verdú, M., (2005), *Plant persistence traits in the fire-prone ecosystems of the Mediterranean basin: a phylogenetic approach*, Oikos, Vol. 109, pp. 196-202.
- Pierson, F.B., Robichaud, P.R., Moffet, C.A., Spaeth, K.E., Hardegree, S.P., Clark, P.E. and Williams, C.J., (2008), *Fire effects on rangeland hydrology and erosion in a steep sagebrush dominated landscape*, Hydrological Processes, 22: 2916-2929.
- Pimentel, R., & Arheimer, B., (2021), *Hydrological impacts of a wildfire in a Boreal region: The Västmanland fire 2014 (Sweden)*, Science of The Total Environment, 756, 143519.
- Ponce, V. M., & Hawkins, R. H., (1996), *Runoff curve number: Has it reached maturity?*, Journal of hydrologic engineering, 1 (1), 11-19.



- Robichaud, P.R., (2000), *Forest fire effects on hillslope erosion: what we know*. In *Watershed Management Council Networker*, Watershed Management Council: Davis, 1: 9–13.
- Rulli, M.C. and Rosso, R., (2007), *Hydrologic response of upland catchments to wildfires*, *Advances in Water Resources*, Vol. 30, pp. 2072-2086.
- Santra Mitra, S., Wright, J., Santra, A., & Ghosh, A. R., (2015), *An integrated water balance model for assessing water scarcity in a data-sparse interfluvium in eastern India*, *Hydrological Sciences Journal*, 60 (10), 1813-1827.
- Scott, D.F. and Van Wyk, D.B., (1990), *The effects of wildfire on soil wettability and hydrological behavior of an afforested catchment*, *Journal of Hydrology*, Vol. 121, pp. 239-256.
- Seibert, J., (1997), *Estimation of parameter uncertainty in the HBV model: Paper presented at the Nordic Hydrological Conference (Akureyri, Iceland-August 1996)*, *Hydrology Research*, 28 (4-5), 247-262.
- Soto, B., Basanta, R., Perez, R., Diaz-Fierros, F., (1995), *An experimental study of the influence of traditional slash and burn practices on soil erosion*, *Catena*, 24: 13–23.
- Soulis, K. X. (2018), *Estimation of SCS Curve Number variation following forest fires*, *Hydrological Sciences Journal*, 63 (9), 1332-1346.
- Soulis K., Dercas N. and Valiantzas J.D., (2007), *Presentation of the Experimental Watershed in the Stream Lykorrema of Penteli Mountain*, Proc. of the 5th Congress of the Hellenic Society of Agricultural Engineers, 18 – 20 October 2007, Larisa, Greece.
- Springer, E.P. and Hawkins, R.H., (2005), *Curve number and peak flow responses following the Cerro Grande Fire on a small watershed*, (No. LA-UR-05-0552), Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States).
- Vega, J. A., Fernández, C., & Fonturbel, T. (2005), *Throughfall, runoff and soil erosion after prescribed burning in gorse shrubland in Galicia (NW Spain)*, *Land Degradation & Development*, 16 (1), 37-51.
- Verma, S., Verma, R. K., Mishra, S. K., Singh, A., & Jayaraj, G. K., (2017), *A revisit of NRCS-CN inspired models coupled with RS and GIS for runoff estimation*, *Hydrological Sciences Journal*, 62 (12), 1891-1930.
- Viedma, O., Meliá, J., Segarra, D. and García-Haro, J., (1997), *Modeling rates of ecosystem recovery after fires by using Landsat TM data*, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 61, pp. 383-398.
- Vogel, R. M., Zafirakou-Koulouris, A., & Matalas, N. C., (2001), *Frequency of record-breaking floods in the United States*, *Water Resources Research*, 37 (6), 1723-1731.
- Wondzell, S.M. and King, J.G., (2003), *Post fire erosional processes in the Pacific Northwest and Rocky Mountain regions*, *Forest Ecology and Management*, Vol. 178, pp. 75-87.
- Yochum, S. E., & Norman, J. B., (2015), *Wildfire-induced flooding and erosion-potential modeling: examples from Colorado, 2012 and 2013*, In *Proceedings of the 3rd joint federal interagency conference on sedimentation and hydrologic modeling* (pp. 953-964).

## Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αλωνιστιώτη Δ., (2011), *Διερεύνηση της επίδρασης των δασικών πυρκαγιών στην υδρολογική απόκριση λεκανών απορροής της Ανατολικής Αττικής*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Δ.Π.Μ.Σ. «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Αθήνα.
- Αναγνωστόπουλος, Δ. και ΣΙΑ Ε.Ε., (2018), *Μελέτη οριοθέτησης ρέματος Πικροδάφνης από οδό Σαρανταπόρου έως εκβολή*, Περιφέρεια Αττικής.
- Βακάλης Χ. Π., (10/ 2019), *Διαβιβαστικό προς Περιφέρεια Αττικής με θέμα: Κατασκευή έργων εισόδου στους αγωγούς Σ2 και Σ3, στο Δήμο Ηλιούπολης*.
- Βακάλης Χ. Π., (2018), *Αντιπλημμυρική λειτουργία του υπάρχοντος δικτύου αγωγών και προτάσεις συμπλήρωσής του, στο Δήμο Ηλιούπολης*, Τεχνική Έκθεση.
- Δημητρέλου Μ. Λ., (2013), *Σύγχρονες τάσεις διαχείρισης των αστικών ρεμάτων. Μελέτη περίπτωσης: Το ρέμα Πικροδάφνης και οικονομική αποτίμηση της αξίας του*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Δ.Π.Μ.Σ. «Περιβάλλον και Ανάπτυξη», Αθήνα.
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων, Υ.ΠΕ.Κ.Α., (2018), *Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής (GR06), ΣΤΑΔΙΟ Ι – 1η ΦΑΣΗ, Ανάλυση Χαρακτηριστικών Περιοχής και Μηχανισμών Πλημμύρας*.
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων, Υ.ΠΕ.Κ.Α., *Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας: Εκτίμηση αριθμού καμπύλης απορροής CN με την μεθοδολογία SCS*.
- Ινστιτούτο Θαλάσσιων Βιολογικών Πόρων και Εσωτερικών Υδάτων (Ι.Θ.Β.Π. & Ε.Υ.), ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε, (2014), *Τελική Τεχνική Έκθεση, Αποτίμηση της οικολογικής κατάστασης του ρέματος Πικροδάφνης και προτάσεις αποκατάστασης, ανάδειξης και διαχείρισής τους*.
- Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών & Τηλεπισκόπησης (Ι.Α.Α.Δ.Ε.Τ.) – Κέντρο Επιστημών Παρατήρησης της Γης και Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης BEYOND.
- Κασσελά, Α. Ε., (2011), *Υδρολογική προσομοίωση της διευρυμένης πειραματικής λεκάνης της Ανατολικής Αττικής: ρέματα Ραφήνας και Λυκορέματος, με χρήση του μοντέλου HEC-HMS*, Διπλωματική εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κουτσογιάννης Δ., (1997). *Στατιστική Υδρολογία*, Έκδοση 4, 312 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κουτσογιάννης Δ., (2011), *Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης*, Έκδοση 4, 180 pages, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Μαμάσης Ν., Κ. Πιπιλή, και Δ. Κουτσογιάννης, (2013), *Υδρολογική Μελέτη Πλημμυρών, Αποτίμηση της οικολογικής κατάστασης του ρ. Πικροδάφνης και προτάσεις αποκατάστασης, ανάδειξης και διαχείρισής του*.
- Μπαλούτσος, Γ., Οικονόμου, Α., & Καούκης, Κ., (2021), *Ο κίνδυνος πλημμύρας σε λεκάνες απορροής μετά από πυρκαγιά*.
- Νομαρχία Αθηνών, Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Αθηνών-Πειραιώς, Διεύθυνση Τεχνικών Υπηρεσιών, (Δεκέμβριος 2010), *Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων, Ανάπλαση Ρέματος Πικροδάφνης (από Λεωφ. Βουλιαγμένης έως εκβολή)*.

- Ξανθόπουλος Θ., Δ. Χριστούλας, Μ. Μιμίκου, Μ. Αφτιάς, και Δ. Κουτσογιάννης, (1995), *Το πρόβλημα των πλημμυρών της Αθήνας: Στρατηγική αντιμετώπισης*, Αντιπλημμυρική προστασία του λεκανοπεδίου της Αθήνας, Αθήνα, [doi:10.13140/RG.2.2.35719.60320](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35719.60320), Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.
- Παπαθεοδοσίου Μ. και Δ. Χριστοδούλου, (2009), *Επιπτώσεις των πυρκαγιών στην υδρολογία και τη διάβρωση: Η περίπτωση της Πάρνηθας*, Διπλωματική εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Παρεσίδου Α. και Πλίτση Δ., (2005), *Αριθμητική προσομοίωση της ροής σε φυσικό υδατόρευμα με τη χρήση του υδραυλικού προγράμματος HEC-RAS*, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- Περιφέρειας Αττικής, (11/ 2020), *Κατάρτιση του περιφερειακού σχεδίου για την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή (ΠεΠΣΚΑ)*.
- Πλουμιστός, Γ. Ι., (2011), *Μελέτη ευστάθειας πρανών με συνθήκες ροής στον πόδα τους. Εφαρμογή στην περιοχή της Ζαχάρως Ηλείας*, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Πολύζος Λ., (2013), *Επίλυση προβλημάτων Μαθηματικού προγραμματισμού με το Microsoft Solver Foundation Excel Add-in*, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Περιφέρειας Αττικής, (10/2021), *Προγραμματική σύμβαση: Εκτίμηση κινδύνων σεισμού, πυρκαγιάς και πλημμύρας στην περιφέρεια Αττικής*, Μέρος Α' Ε.Α.Α, Παραδοτέο: Π 1.1 / 1η Ενδιάμεση αναφορά προόδου Φάσης 1, Αθήνα.
- Ραπτάκη Ε., (2017), *Ολοκληρωμένη προσομοίωση πλημμύρας στην αστική λεκάνη απορροής Αφαίας-Σκαραμαγκά, Δήμου Χαϊδαρίου*, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Σέρεσλη Α., (2014), *Περιβαλλοντική αξιολόγηση των ρεμάτων της Αττικής. Η περίπτωση της Πικροδάφνης*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Δ.Π.Μ.Σ. «Περιβάλλον και Ανάπτυξη», Αθήνα.
- Τσακίρης Γ., (1995), *Υδατικοί Πόροι: Ι: Τεχνική Υδρολογία*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- Τσακίρης Γ., (2010), *Υδραυλικά Έργα, Σχεδιασμός και Διαχείριση, Τόμος Ι: Αστικά Υδραυλικά Έργα*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- Φουσκάκης Δ., (2022), *Ανάλυση Δεδομένων με χρήση της R*, Εκδόσεις Τσιότρας, Αθήνα.

## Διαδικτυακές πηγές

- <http://geitoniamou.gr>, 04/2013
- <https://attikovima.gr/index.php/eidiseis/deltia/1442-2015-07-24-10-25-00>
- <https://dasarxeio.com/2016/11/21/37343/>
- <https://effis.jrc.ec.europa.eu/>
- <https://geodata.gov.gr>
- <https://www.in.gr/2007/07/16/greece/megali-pyrkagia-ston-ymitto-sto-ypsos-tis-kaisarianis/>
- <https://www.news247.gr/koinonia/kalyteri-eikona-me-diaspartes-esties-ston-karea-ekleisandromoi-kai-apomakrynthikan-katoikoi.8985682.html>

- <https://www.notia.gr/2013/04/plimmirika-fenomena-sto-rema-pikrodafnis/>
- [https://www.palisade.com/risk/monte\\_carlo\\_simulation.asp](https://www.palisade.com/risk/monte_carlo_simulation.asp)