

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ
ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ
ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

ΑΛΩΝΙΣΤΙΩΤΗ ΔΕΣΠΟΙΝΑ



ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2011

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΜΙΜΙΚΟΥ ΜΑΡΙΑ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π



Πηγή εικόνας εξωφύλλου:

[ooglewindowblinds.com/wp-content/uploads/2008](https://www.googlewindowblinds.com/wp-content/uploads/2008)



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ
ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΗΣ
ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

ΑΛΩΝΙΣΤΙΩΤΗ ΔΕΣΠΟΙΝΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΜΙΜΙΚΟΥ ΜΑΡΙΑ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

**ΜΙΜΙΚΟΥ ΜΑΡΙΑ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π
ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π
ΜΑΜΑΣΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ Ε.Μ.Π**

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2011



**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ
ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΛΕΚΑΝΩΝ
ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

Μεταπτυχιακή εργασία

Αλωνιστιώτη Δέσποινα

Γεωπόνος Γ.Π.Α

e-mail: d.alonistioti@hotmail.com

Στους γονείς μου

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα απ' όλους την οικογένεια μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου Θανάση και Ειρήνη, που εδώ και 25 χρόνια αγωνίζονται καθημερινά για να μην μου λείπει τίποτα. Είναι η αγάπη τους, η αμέριστη συμπαράστασή τους και η κατανόηση τους που μου δίνουν τη δύναμη να κάνω τόσα πράγματα στη ζωή μου, όπως και εκπόνηση αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους του καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος «Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων» του ΕΜΠ για τις γνώσεις που μου προσέφεραν στο πλαίσιο των μαθημάτων και ιδιαίτερα τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής κα Μιμίκου Μαρία, κ. Κουτσογιάννη Δημήτριο και κ. Μαμάση Νικόλαο.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην επιβλέπουσα καθηγήτρια κα Μιμίκου Μαρία για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ και στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής μου εργασίας με την επιστήμη της Υδρολογίας που τόσο πολύ με ενδιαφέρει.

Ακόμα ένα θερμό ευχαριστώ στην Υπ.Διδ. κα Παπαθανασίου Χρυσούλα για την πολύτιμη βοήθειά της, την υπομονή της και την προθυμία της να μου εξηγήσει κάθε απορία που μου γεννήθηκε σε αυτήν την μεταπτυχιακή μελέτη.

Δεν θα μπορούσα βέβαια να παραβλέψω να ευχαριστήσω την εταιρεία ΠΑΝΓΑΙΑΣΥΣ και συγκεκριμένα την κα Βαρελά Βασιλική για τη χρήση του λογισμικού G.FMIS (Σύστημα Διαχείρισης Δασικών Πυρκαγιών) για την προσομοίωση των σεναρίων πυρκαγιάς και για την αμέριστη βοήθειά της.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την προπτυχιακή φοιτήτρια Κασσελά Αθανασία για την άψογη συνεργασία που είχα μαζί της και την απεριόριστη βοήθειά της για την λειτουργία του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στο Διδ. κ. Σούλη Κωνσταντίνο του Γ.Π.Α που για άλλη μια φορά τόσο με τις συμβουλές του όσο και με το υλικό που μου διέθεσε βοήθησε στην υλοποίηση αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας.

Ακόμα, ένα πολύ πολύ μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου από το μεταπτυχιακό: Γαλιούνα Έλενα, Αλεξοπούλου Αγγελική, Παπαθεοδοσίου Μιχάλη, Τσεκούρα Μαρία, Ποθουλάκη Δέσποινα, Κατσίφα Μαρία τόσο για την έμπρακτη βοήθειά τους στο πλαίσιο της πτυχιακής μελέτης όσο και για τις αξέχαστες στιγμές “διαβάσματος” και γέλιου που περάσαμε μαζί.

Επιπλέον ένα ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου στους φίλους μου: Μυτηλινάκη Ηλέκτρα, Μπαντέκα Χαρούλα, Ξαγά Χριστίνα, Μολώνη Χριστίνα, Παππά Ορέστη, Βασιλείου Κώστα, Μανιακούρα Νικόλαο, Καλδάνη Βίκυ, Αθανασιάδου Βασιλεία, Στάθη Έλσα, Φωτοπούλου Σπυριδούλα για την στήριξη τους στις δύσκολες στιγμές της συγγραφής αυτής της μεταπτυχιακής μελέτης.

Οφείλω επίσης ένα τεράστιο ευχαριστώ στο φίλο μου Κωνσταντίνο Καρούζο για το ότι είναι δίπλα μου σε ότι και αν χρειαστώ.

Και τέλος ευχαριστώ και όσους ξέχασα να ευχαριστήσω...

Δέσποινα Αλωνιστιώτη

Αθήνα, Φεβρουάριος 2011

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	6
Περιεχόμενα.....	8
Εικόνες.....	10
Διαγράμματα.....	12
Πίνακες	13
Περίληψη	16
Extended Abstract	17
1. Εισαγωγή	31
1.1 Στόχος.....	31
1.2 Διάρθρωση εργασίας.....	31
1.3 Χαρακτηριστικά δασικών πυρκαγιών	32
1.3.1 Τα θεμελιώδη στοιχεία της φωτιάς.....	33
1.3.2 Μετάδοση της θερμότητας σε δασικές πυρκαγιές	34
1.3.3 Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών	35
1.4 Δασικές πυρκαγιές στην Ελλάδα	42
1.5 Επίδραση των δασικών πυρκαγιών στην υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών απορροής.....	47
1.5.1 Άμεσες και έμμεσες επιδράσεις των πυρκαγιών στην υδρολογική συμπεριφορά λεκανών απορροής.....	49
2. Περιοχή Μελέτης	61
2.1 Επιλογή Περιοχής Μελέτης.....	61
2.2 Λεκάνη απορροής Ραφήνας.....	65
2.2.1 Γεωμορφολογία	65
2.2.2 Γεωλογία	67
2.2.3 Κλίμα	70
2.2.4 Κάλυψη γης.....	70
2.3 Εξοπλισμός περιοχής μελέτης	74
2.3.1 Εξοπλισμός πειραματικής λεκάνης	74
2.3.2 Εξοπλισμός METEONET	75
2.3.3 Εξοπλισμός FLADAR	77
3. Μοντέλα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών	81
3.1 Μοντέλα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών.....	81
3.1.1 BEHAVE Plus.....	81

3.1.2 FARSITE	82
3.2 Επιλογή Μοντέλου Προσομοίωσης πυρκαγιάς	84
3.3 Σύστημα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών – G.FMIS.....	86
3.3.1 Αναγκαιότητα χαρτογράφησης εκτίμησης κινδύνου πυρκαγιάς.....	88
3.3.2 Προσομοίωση συμπεριφοράς πυρκαγιάς.....	89
3.3.3 Διαχείριση Οχημάτων και Δρομολόγηση	90
3.3.4 Μοντέλα καύσιμης ύλης	90
3.3.5 Διαχείριση δασικής καύσιμης ύλης.....	91
3.4 Συστήματα παρακολούθησης και καταγραφής δασικών πυρκαγιών.....	97
4. Προσομοιωμένα σενάρια πυρκαγιάς & Πραγματική πυρκαγιά 2009.....	103
4.1 Σενάρια πυρκαγιάς στην περιοχή μελέτης	103
4.2 Πυρκαγιά 2009.....	108
4.2.1 Οριοθέτηση καμένης έκτασης.....	109
5. Μεθοδολογία καθορισμού υδρολογικών παραμέτρων μετά την πυρκαγιά.....	115
5.1 Μέθοδος απωλειών βροχής: SCS Curve Number	115
5.2 Καθορισμός τιμών CN μετά την πυρκαγιά	120
5.3 Μεθοδολογία επαναπροσδιορισμού υδρολογικών παραμέτρων	130
5.3.1 Επαναπροσδιορισμός Αριθμού καμπύλης (CN) μετά την πυρκαγιά	130
5.3.2 Επαναπροσδιορισμός αρχικής κατακράτηση (I_a).....	135
5.3.3 Επαναπροσδιορισμός χρόνου υστέρησης	136
6. Υδρολογική Προσομοίωση της λεκάνης απορροής.....	139
6.1 Υδρολογικό Μοντέλο.....	139
6.2 Υδρολογική Προσομοίωση λεκάνης πριν την πυρκαγιά	140
6.2.1 Γεωμορφολογική και Υδρολογική Ανάλυση Λεκάνης	140
6.2.2 Εξαγωγή τοπογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης.....	150
6.2.3 Επιλογή προτύπων υπολογισμού υδρολογικών παραμέτρων	152
6.2.4 Δημιουργία αρχείων εισόδου HEC-HMS.....	153
6.2.5 Μετεωρολογικό μοντέλο - Αρχείο Προσομοίωσης.....	154
6.2.6 Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης πριν την πυρκαγιά	154
6.3 Υδρολογική προσομοίωση λεκάνης μετά την πυρκαγιά.....	155
7. Αποτελέσματα.....	161
7.1 Αποτελέσματα μοντέλου διαχείρισης δασικών πυρκαγιών (G.FMIS)	161
7.2 Αποτελέσματα υδρολογικής απόκρισης μετά την επίδραση πυρκαγιάς.....	163
7.2.1 Αποτελέσματα μεθοδολογίας επαναπροσδιορισμού αριθμού καμπύλης (CN) και αρχικής κατακράτησης (I_a)	163
7.2.2 Αποτελέσματα επαναπροσδιορισμού χρόνου υστέρησης (t_p)	165
7.2.2 Αποτελέσματα μοντέλου υδρολογικής προσομοίωσης (HEC-HMS)	167

7.3 Συσχέτιση καμένης έκτασης και παροχών αιχμής για τις υπό μελέτη πυρκαγιές	177
7.4 Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων υδρογραφημάτων μετά την πυρκαγιά του 2009.....	181
8. Συμπεράσματα & Πρότασεις για περαιτέρω έρευνα	191
9. Βιβλιογραφία	199
10. Παράρτημα	214

Εικόνες

Εικόνα 1-1 Το τρίγωνο της φωτιάς.	33
Εικόνα 1-2 Δορυφορική εικόνα (Aqua, Nasa) στις 25 Αυγούστου 2007.....	44
Εικόνα 1-3 Μεσογειακή βλάστηση.....	46
Εικόνα 1-4 Υδροφοβικό στρώμα (ενδεικνυόμενο από το χέρι) σε αμμώδες έδαφος. 54	
Εικόνα 1-5 (α) Δημιουργία λιμναζόντων νερών και (β) ανομοιογενών διαβρεγμένων περιοχών σε αμμώδη εδάφη, λόγω σχηματισμού του υδροφοβικού στρώματος.	54
Εικόνα 1-6 Συγκράτηση του νερού στην επιφάνεια του εδάφους λόγω σχηματισμού υδροφοβικού στρώματος μετά από πυρκαγιά.	55
Εικόνα 1-7 Αύξηση της διαβρωσιμότητας των εδαφών (αριστερά) και πλημμύρες μετά την επίδραση πυρκαγιάς (δεξιά)	58
Εικόνα 2-1 Χάρτης ταξινόμησης περιοχών ανάλογα με την επικινδυνότητα διάβρωσης και μεταφοράς του εδαφικού υλικού. (Μαρίνος, Π., Βαλαδάκη-Πλέσσα, Κ., Πλέσσας, Σ., 1995).....	64
Εικόνα 2-2 Θέση λεκάνης απορροής Ραφήνας.....	65
Εικόνα 2-3 Απεικόνιση του κάρναβου (α) υψομέτρου (β) κλίσεων και του υδρογραφικού δικτύου.....	66
Εικόνα 2-4 Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης	68
Εικόνα 2-5 Ομάδες υδροπερατότητας εδαφών της υπό μελέτη περιοχής.....	69
Εικόνα 2-6 Κάρναβος με τις χρήσεις γης από Corine 2000 της περιοχής μελέτης.....	71
Εικόνα 2-7 Κάλυψη των δασικών εκτάσεων πριν από την πυρκαγιά του 1995.....	72
Εικόνα 2-8 Αναγέννηση δάσους.....	72
Εικόνα 2-9 Καταστροφή φυτικής κάλυψης μετά την πυρκαγιά του 2009	73
Εικόνα 2-10 Απεικόνιση αστικών ζωνών-οικισμών στην περιοχή μελέτης.....	73
Εικόνα 2-11 Θέση υδρομέτρησης στην έξοδο της πειραματικής λεκάνης – Σταθμηγράφος.....	76
Εικόνα 2-12 Θέση βροχογράφου – εσωτερικό βροχογράφου	76

Εικόνα 3-1 Απεικόνιση της αρχής του Huygens χρησιμοποιώντας μικρά ελλειπτικά κύματα	83
Εικόνα 3-2 Απεικόνιση φυτικής – καύσιμης ύλης τύπου ΠΡΟ1	93
Εικόνα 3-3 Απεικόνιση φυτικής – καύσιμης ύλης τύπου ΠΡΟ2	93
Εικόνα 3-4 Απεικόνιση φυτικής – καύσιμης ύλης τύπου ΠΡΟ3	94
Εικόνα 3-5 Απεικόνιση φυτικής – καύσιμης ύλης τύπου ΠΡΟ4	94
Εικόνα 3-6 Απεικόνιση φυτικής – καύσιμης ύλης τύπου ΠΡΟ5	95
Εικόνα 3-7 Απεικόνιση φυτικής – καύσιμης ύλης τύπου ΠΡΟ6	96
Εικόνα 3-8 Απεικόνιση φυτικής – καύσιμης ύλης τύπου ΠΡΟ7	96
Εικόνα 3-9 NASA’s Terra και Aqua δορυφόροι. Εντοπισμός εστιών φωτιάς μέσω του οργάνου MODIS	99
Εικόνα 3-10 Δορυφορική εικόνα από MODIS – οριοθέτηση της καμένης έκτασης με σκούρο κόκκινο χρώμα.....	99
Εικόνα 4-1 Δορυφορική εικόνα της ανατολικής Αττικής μετά την πυρκαγιά του Αυγούστου του 2009	108
Εικόνα 4-2 Απεικόνιση καμένης (κόκκινο) και άκαυτης (ανοικτό πράσινο) έκτασης	109
Εικόνα 4-3 Συνδυασμός καμένης έκτασης με χάρτη χρήσεων γης (αριστερά) και τιμών καμπύλης απορροής (δεξιά).....	110
Εικόνα 5-1 Κάνναβος με τιμές curve number (CN) της περιοχής μελέτης πριν την πυρκαγιά	119
Εικόνα 5-2 Αρχικός χάρτης έντασης πυρκαγιάς.....	122
Εικόνα 5-3 Αεροφωτογραφία πυρόπληκτης περιοχής- Διαφοροποίηση μεταξύ των κατηγοριών έντασης πυρκαγιάς (οι περιοχές με πράσινα δέντρα υποδηλώνουν χαμηλή ένταση, ενώ οι περιοχές με καφέ και μαύρα δέντρα, μέτρια και υψηλή έντασης αντίστοιχα).....	122
Εικόνα 5-4 Υπολογισμός τιμών αριθμού καμπύλης πριν και μετά την πυρκαγιά στην περιοχή Marchall Gulch. (Canfield et. al, 2005).....	123
Εικόνα 5-5 α,β. Ολοκληρωτική καταστροφή μεσογειακής βλάστησης στην περιοχή μελέτης - πυρκαγιά 2009	128
Εικόνα 5-6 α,β. Ολοκληρωτική καταστροφή μεσογειακής βλάστησης- εκτός περιοχής μελέτης α) Μεσσηνία β) Πάρνηθα.....	129
Εικόνα 5-7 Διαφοροποίηση πυρόπληκτων εκτάσεων σε επίπεδο α) υπολεκανών	131
Εικόνα 5-8 Σχηματική απεικόνιση διεργασιών στο ArcGis.....	134
Εικόνα 6-1 Τιμή κεντρικού κυττάρου ανάλογα με την διεύθυνση ροής (HEC-GeoHMS manual) – εικόνα από την παρούσα εργασία.	143
Εικόνα 6-2 Κάνναβος διευθύνσεων απορροής (Στάμου και Σκοπελίτη 2009)	143
Εικόνα 6-3 Κάνναβος συγκέντρωσης ροής (Στάμου και Σκοπελίτη 2009)	144
Εικόνα 6-4 Εικόνα συγκέντρωσης ροής από την παρούσα εργασία.....	144

Εικόνα 6-5 Υδρογραφικό δίκτυο από την παρούσα εργασία	145
Εικόνα 6-6 Κατάτμηση ρεμάτων από την παρούσα εργασία	145
Εικόνα 6-7 Σκιαγράφιση υπολεκανών από την παρούσα εργασία	146
Εικόνα 6-8 Πολυγώνα υπολεκανών απορροής από την παρούσα εργασία	146
Εικόνα 6-9 Αποστραγγιστικό δίκτυο από την παρούσα εργασία	147
Εικόνα 6-10 Σύνδεση υπολεκανών απορροής από την παρούσα εργασία	147
Εικόνα 6-11 Δημιουργία λεκάνης απορροής	148
Εικόνα 6-12 Τελικός χάρτης μετά την δημιουργία της λεκάνης απορροής	149
Εικόνα 6-13 Περιοχή μελέτης πριν και μετά την επεξεργασία	150
Εικόνα 6-14 Παράθυρο της εντολής Select HMS processes – Επιλογή μεθόδων υπολογισμού υδρολογικών παραμέτρων	152
Εικόνα 7-1 Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίων πυρκαγιάς	161
Εικόνα 7-2 Οριοθέτηση καμένων εκτάσεων με ψηφιοποίηση στο Arcgis	163
Εικόνα 7-3 Αρίθμηση υπολεκανών και ονοματολογία εξόδων για την κάλυψη αναγκών της παρούσας εργασίας	167

Διαγράμματα

Διάγραμμα 1-1 Δείκτης επικινδυνότητας εμφάνισης πυρκαγιάς μέχρι της 4 Σεπτεμβρίου του 2010 και των προηγούμενων 4 χρόνων στην Ελλάδα	43
Διάγραμμα 1-2 Καμένη έκταση (ha) στις 5 ευρωπαϊκές χώρες της Μεσογείου από το έτος 1980 έως το 2009. Πηγή: forest fires in Europe 2009 JRC.....	48
Διάγραμμα 1-3 Αριθμός πυρκαγιών στις 5 ευρωπαϊκές χώρες της Μεσογείου από το έτος 1980 έως το 2009. Πηγή: forest fires in Europe 2009 JRC.....	48
Διάγραμμα 2-1 Σχηματική απεικόνιση πληθυσμού με βάση την χρονολογία στους κύριους οικισμούς της περιοχής μελέτης (Πικέρμι, Ντράφι, Ραφήνα)	63
Διάγραμμα 4-1 Σχηματική απεικόνιση καμένης και άκαυτης έκτασης της λεκάνης ανά χρήση γης μετά την πυρκαγιά του 2009	111
Διάγραμμα 5-1 Σχέσεις τιμών CN και ποσοστού κάλυψης για κάθε ομάδα υδροπερατότητας εδάφους (Goodrich, 2005)	125
Διάγραμμα 6-1 Διαδικασία προεπεξεργασίας μοντέλου εδάφους μέσω του πακέτου εντολών Terrain Preprocessing	142
Διάγραμμα 6-2 Διαδικασία δημιουργίας και επεξεργασίας της περιοχή μελέτης μέσω της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS Main View 9 και HEC-GeoHMS Project View 9 αντίστοιχα	149
Διάγραμμα 6-3 Διαδικασία εξαγωγής τοπογραφικών χαρακτηριστικών μέσω της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS Project View 9.	151

Διάγραμμα 6-4 Διαδικασία δημιουργίας αρχείων εισόδου HEC-HMS μέσω της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS Project View 9.	153
Διάγραμμα 6-5 Σύγκριση προσομοιωμένο με παρατηρημένο υδρογράφημα (Κασσελά, Α. 2011)	154
Διάγραμμα 6-6 α,β,γ,δ. Σχηματική απεικόνιση διαφοροποίησης τιμών CN πριν και μετά τις υπό μελέτη πυρκαγιές για κάθε υπολεκάνη.....	157
Διάγραμμα 7-1 Συνολική απεικόνιση διαφοροποίησης τιμών CN πριν και μετά τις υπό μελέτη πυρκαγιές για κάθε υπολεκάνη.....	164
Διάγραμμα 7-2 Διαφοροποίηση τιμών αρχικής κατακράτησης σε κάθε υπολεκάνη και για κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά.....	165
Διάγραμμα 7-3 Υδρογραφήματα πριν και μετά τις υπό μελέτη πυρκαγιές (8/2/2009) (επαναπροσδιορισμός CN, Ια)	170
Διάγραμμα 7-4 Υδρογραφήματα πριν και μετά τις υπό μελέτη πυρκαγιές (6/12/2009) (επαναπροσδιορισμός CN, Ια)	173
Διάγραμμα 7-5 Υδρογραφήματα πριν και μετά τις υπό μελέτη πυρκαγιές (6/12/2009) (επαναπροσδιορισμός CN, Ια, tp)	176
Διάγραμμα 7-6 Συσχέτιση παροχών αιχμής με ποσοστό καμένης έκτασης (επαναπροσδιορισμός CN, Ια)	178
Διάγραμμα 7-7 Συσχέτιση παροχών αιχμής με ποσοστό καμένης έκτασης (επαναπροσδιορισμός CN, Ια, tp)	178
Διάγραμμα 7-8 Μεταβολή παροχών πριν και μετά την επίδραση πυρκαγιάς (επαναπροσδιορισμός CN, Ια)	179
Διάγραμμα 7-9 Μεταβολή παροχών πριν και μετά την επίδραση πυρκαγιάς (επαναπροσδιορισμός CN, Ια, tp)	180

Πίνακες

Πίνακας 2-1 Στοιχεία πληθυσμιακής ανάπτυξης για τους οικισμούς Πικέρμι, Ντράφι, Ραφήνας.....	62
Πίνακας 2-2 Κατηγορίες κάλυψης γης.....	71
Πίνακας 4-1 Χαρακτηριστικά σενάριων πυρκαγιάς	103
Πίνακας 4-2 Συντεταγμένες σημειακών εστιών των σεναρίων πυρκαγιάς	105
Πίνακας 4-3 Ποσοστό καμένης έκτασης ανά χρήση γης για την πυρκαγιά 2009	111
Πίνακας 5-1 Κατηγορίες με βάση την υγρασία του εδάφους.....	117
Πίνακας 5-2 Τιμές curve number (CN) ανάλογα της χρήσης γης Corine και Ομάδα υδροπερατότητας εδάφους (Κασσελά Α.)	119
Πίνακας 5-3 Κατηγορίες σφοδρότητας πυρκαγιάς	121
Πίνακας 5-4 Τιμές CN για κάθε ομάδα υδροπερατότητας εδάφους (A, B, C, D) και οι χρήσεις γης καθώς επίσης και το ποσοστό της κάθε χρήσης (Goodrich, 2005 - μετά από επεξεργασία)	124

Πίνακας 5-5 Τιμές CN για συνθήκες πριν και μετά την επίδραση πυρκαγιάς ανάλογα με τη χρήση γης και την ομάδα υδροπερατότητας του εδάφους της υπό μελέτη περιοχής	127
Πίνακας 5-6 Αποτελέσματα των διεργασιών στο ArcGis	134
Πίνακας 5-7 Αποτελέσματα διεργασιών στο Excel	135
Πίνακας 5-8 Τελική τιμή CN υπολεκάνης.....	135
Πίνακας 5-9 Τιμές κλάσματος (I_a/S) και αρχικής κατακράτησης για την κάθε υπολεκάνη (Κασσελά Α.)	136
Πίνακας 6-1 Αποτελέσματα τοπογραφικών υπολογισμών με τη χρήση του πακέτου εντολών Basin Characteristics	151
Πίνακας 6-2 Τιμές CN μετά την επίδραση των πυρκαγιών.....	155
Πίνακας 6-3 Τιμές δυνητικής, αρχικής κατακράτησης και αριθμού καμπύλης μετά την επίδραση των υπό μελέτη πυρκαγιών	158
Πίνακας 7-1 Ποσοστό καμένης έκτασης για κάθε σενάριο πυρκαγιάς.....	163
Πίνακας 7-2 Τιμές χρόνου υστέρησης (tp) πριν και μετά τις υπό μελέτη πυρκαγιές	166
Πίνακας 7-3 Συνολικός πίνακας ποσοστού καμένης έκτασης για κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά	177
Πίνακας 7-4 Χαρακτηριστικά βροχόπτωσης για κάθε υπό μελέτη επεισόδιο	177
Πίνακας 7-5 Εύρος μεταβολής ανά υπό μελέτη πυρκαγιά	180
Πίνακας 10-1 Περιγραφή μοντέλων καύσιμης ύλης κατά τον Albini (1976)	214
Πίνακας 10-2 Τα Μ.Κ.Υ. που αναπτύχθηκαν για το σύστημα πρόβλεψης συμπεριφοράς πυρκαγιάς BEHAVE (Andrews, 1986) και η προσαρμογή τους στις συνθήκες της ελληνικής βλάστησης (Καλαμποκίδης,2004)	214
Πίνακας 10-3 Τα πρότυπα Μ.Κ.Υ. που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο διάδοσης πυρκαγιάς του Rothermel	215
Πίνακας 10-4 Υπολογισμός σταθμισμένου και τελικού CN μετά την πυρκαγιά – Σενάριο 1 ^ο	216
Πίνακας 10-5 Υπολογισμός σταθμισμένου και τελικού CN μετά την πυρκαγιά – Σενάριο 2 ^ο	217
Πίνακας 10-6 Υπολογισμός σταθμισμένου και τελικού CN μετά την πυρκαγιά – Σενάριο 3 ^ο	221
Πίνακας 10-7 Υπολογισμός σταθμισμένου και τελικού CN μετά την πυρκαγιά – Πυρκαγιά 2009.....	230
Πίνακας 10-8 Παροχές αιχμής και ποσοστιαία μεταβολή παροχής αιχμής για κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά (CN, I_a)	237
Πίνακας 10-9 Εύρος μεταβολής για κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά (CN, I_a)	237
Πίνακας 10-10 Παροχές αιχμής και ποσοστιαία μεταβολή παροχής αιχμής για κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά (CN, I_a, tp).....	238
Πίνακας 10-11 Εύρος μεταβολής για κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά (CN, I_a, tp)	238

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πλαισίου εκτίμησης της μεταβολής της υδρολογικής απόκρισης των λεκανών απορροής μετά την επίδραση πυρκαγιάς.

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε στη λεκάνη απορροής της Ραφήνας, η οποία τοποθετείται ανατολικά του Νομού Αττικής και έχει έκταση 127 km². Η περιοχή παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον ως προς την εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας λόγω της ραγδαίας αύξησης του πληθυσμού στους κύριους οικισμούς της λεκάνης. Επίσης, η περιοχή θεωρήθηκε κατάλληλη για την συγκεκριμένη έρευνα αφού διαθέτει μετρητικούς σταθμούς σε όλο το μήκος της. Τέλος η περιοχή επλήγη από το φαινόμενο της πυρκαγιάς τον Αύγουστο του 2009 δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο κατάλληλες συνθήκες για διερεύνηση των αλλαγών στο υδρολογικό καθεστώς της λεκάνης μετά την επίδραση πυρκαγιάς.

Εκτός από τη διερεύνηση της πραγματικής πυρκαγιάς, για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης διαμορφώθηκαν σενάρια πυρκαγιάς με τη χρήση του συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών G.FMIS. Το σύστημα αυτό είναι το πρώτο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα και διαθέτει μοντέλα καύσιμης ύλης που αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες των μεσογειακών οικοσυστημάτων. Το σύστημα αυτό έχει επιχειρησιακό χαρακτήρα και χρήστης του συγκεκριμένου λογισμικού είναι και η Πυροσβεστική Υπηρεσία Ελλάδος.

Επιπλέον στο πλαίσιο της εργασίας αναπτύχθηκε μεθοδολογία επαναπροσδιορισμού των υδρολογικών παραμέτρων (αριθμού καμψύλης, αρχικής κατακράτησης και χρόνου υστέρησης) μετά την επίδραση πυρκαγιάς σύμφωνα με αντίστοιχα αποτελέσματα μελετών στη διεθνή βιβλιογραφία αλλά και συμπεριλαμβάνοντας τις συνθήκες που επικρατούν στην συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.

Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε εισήχθησαν ως δεδομένου εισόδου στο υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS, με την βοήθεια του οποίου προσομοιώθηκε η απορροή γεγονότων βροχόπτωσης διαφορετικών χαρακτηριστικών.

Από τη γενική διερεύνηση των αποτελεσμάτων και ειδικότερα από τη σύγκριση των παρατηρημένων και εκτιμημένων υδρογραφημάτων στην περιοχή μελέτης, για συνθήκες μετά την πυρκαγιά, αποδεικνύεται η αποτελεσματικότητα και ορθότητα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία.

Extended Abstract

Over the past few years, Mediterranean countries including Greece suffer from frequent wildfire events. This has led to increased awareness not only in terms of the effects of forest fires on vegetation, but also in order to prevent possible loss of life and property, changes in the hydrological response of river basins and increase in erosion/sedimentation process at the once vegetated areas.

Moreover, according to the European Flood Directive (EU 2007/60), published on 26/11/2007, which intends to reduce the risks and adverse consequences of floods in European Union and is a complement to EU legislation for integrated water resources management (EU WFD 2000/60), it is very important to develop an integrated framework for assessing the change in the hydrological response in watersheds. More specifically, the Directive aims to establish a framework for evaluation and management of risks associated with floods in particular on human health and life, the environment, cultural heritage, economic activity and infrastructure.

The purpose of this thesis is to investigate the change of the hydrological response in watersheds following a wildfire event and develop a methodological framework that will support the redefinition of the hydrological parameters after the influence of the wildfire.

For that reason, a systematic literature review has been accomplished in order to investigate all aspects related with the way the wildfires affect the soil properties, the vegetation cover and in general the hydrological response. In addition to that, the results about the increase of runoff volume and peak discharges of similar studies are included in the thesis.

Specifically, the direct and indirect effects of wildfires on hydrological response are mentioned below:

- a. **changes in the physical and chemical soil properties:** organic ground cover is converted to soluble ash and gives rise to phenomena such as water repellency. During combustion hydrophobic organic compounds in litter and topsoil are volatilized and released upwards to the atmosphere and downwards into the soil profile along a temperature gradient. Downward translocated hydrophobic compounds condense on cooler soil particles at or below the soil surface forming water repellent conditions.

- b. **runoff and erosion rates increase:** the formation of the water repellency at the soil acts as a barrier to water infiltration and as a consequence the runoff volume and peak discharges increase. Furthermore, there seems to be an increase to the sediment yield.

The Rafina catchment has been selected as the case study of the current research on the way the hydrological response changed. The area is located in the eastern region of the Prefecture of Attica, covers 127.17 km² and includes different land uses. This area has been chosen for the following reasons:

- the catchment is considered to be suitable for this research since it had been monitored during the last years for academic and research purposes and therefore exist reliable pre-fire data records
- a significant increase in the population of the area at the main settlements has been recorded.
- according to several studies the area is vulnerable to erosion at great extent in case of forest destruction.

In the framework of this thesis the Geographic Fire Management Information System – G.FMIS– has been chosen for the fire simulations of several scenarios. It is considered appropriate because it provides fuel models that consist samples of mediterranean ecosystems. In particular, three scenarios have been considered changing the wind and fuel moisture, thus affecting in a different way the catchment. A real fire case which occurred in the area in August 2009 has been studied, as well.

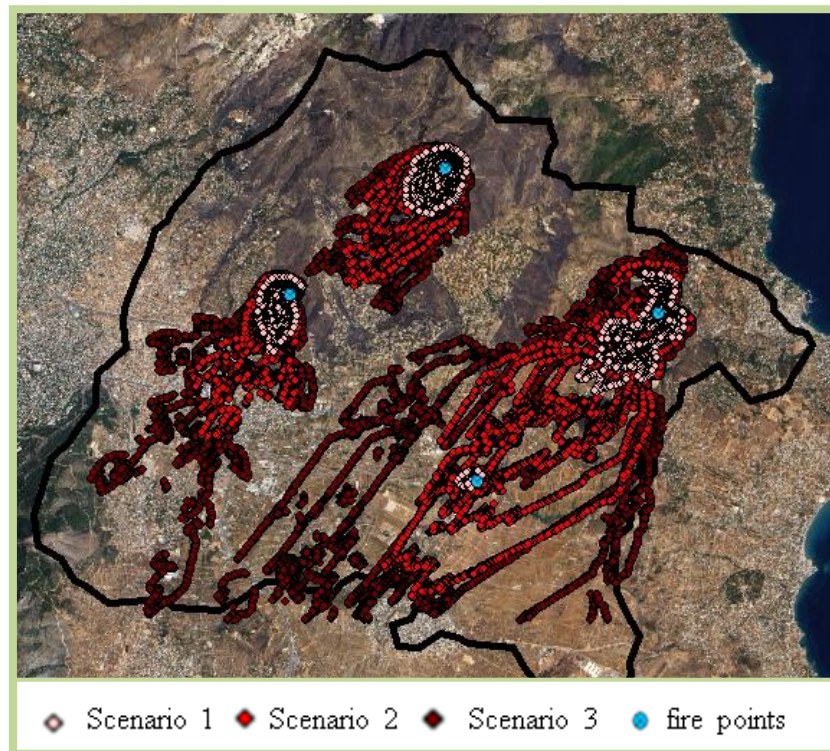
After the study of the fire a methodology is developed to assess the changes in the hydrological parameters: curve number, initial abstraction and lag time. The values of the curve numbers were defined in proportion with the land uses and hydrology soil group, in accordance with Goodrich's results. The initial abstraction was defined according to the curve numbers' values that resulted from the methodology above using the SCS method. The value of lag time after the fire was defined based on literature review and was reduced by 40% compared with its pre-fire values (Elliot, 2005, Cydzik, 2010)

Finally, the semi-distributed hydrological model HEC-HMS has been used to assess the hydrological response of the catchment for the different scenarios. The

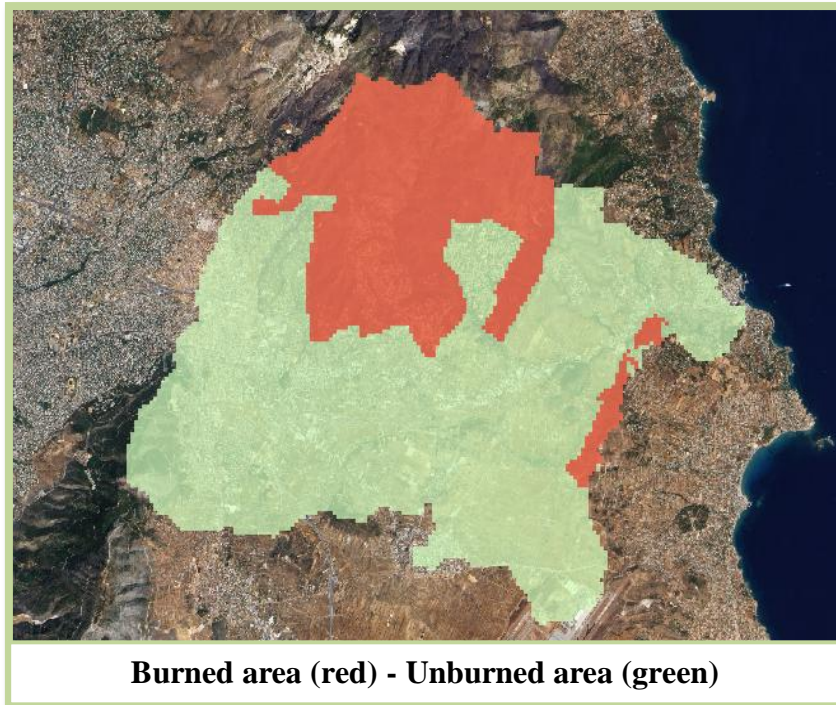
catchment was divided in five subbasins, each one with different pre-fire and post-fire values of hydrological parameters.

Results

The results of the fire simulation are shown in the picture below:



The area which was affected by the real fire event of 2009 has been estimated according to a satellite image and the boundaries of the burnt area were determined using ArcGis software. The area is shown in the figure below.

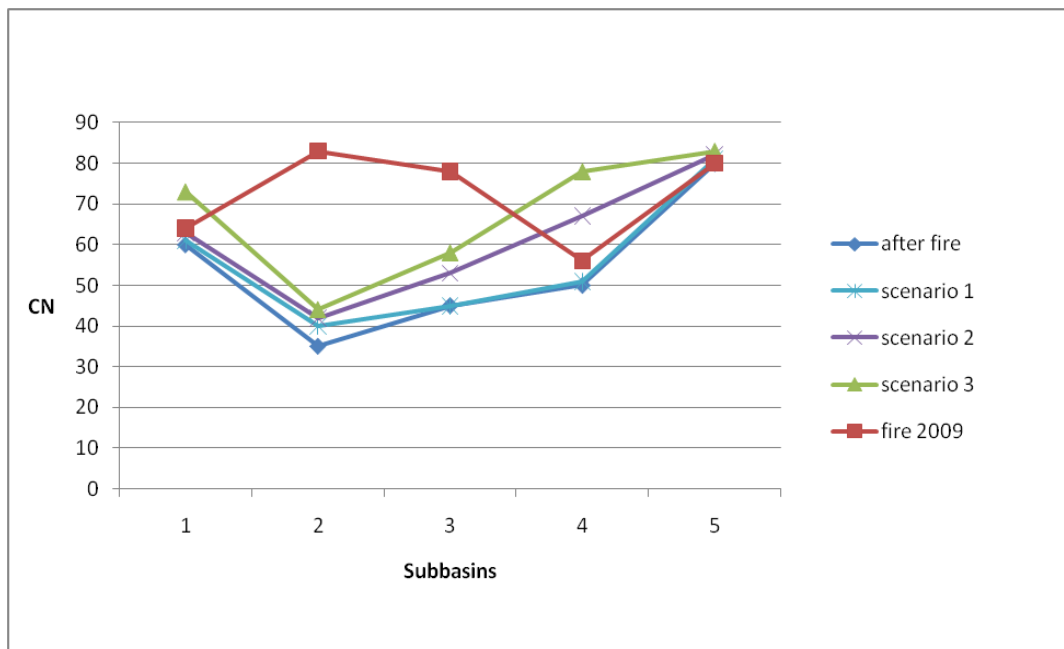


The percentages of the affected area are shown in the table below.

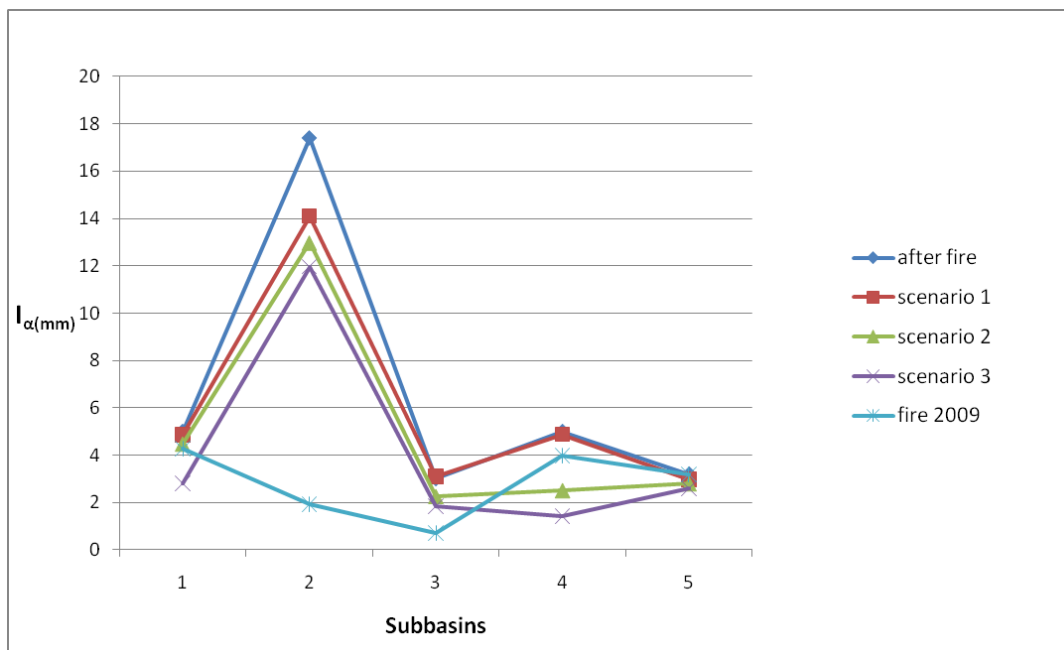
Fires	Burnt area (%)
Scenario1	4,0
Scenario 2	23,0
Scenario 3	49,0
Fire 2009	28,0

The results of the methodology, based on which new hydrological parameters were defined after each fire and for each subbasin, are shown in the figures below.

- **CN values after fire**



- **Initial abstraction values after fire**



- **Lag time**

Lag times after fire were altered as much as 40% in comparison with their original values (the value being defined based on literature review). The estimation of the reduction of lag time for each subbasin was made according to the percentage of the burned area after each fire and the results are shown below.

Subbasins	pre-fire tp	reduction (%)	tp scenario 1
1	1,47	0,77	1,46
2	2,4	4,23	2,30
3	0,7	0,22	0,70
4	3,8	1,17	3,76
5	4,83	4,35	4,62

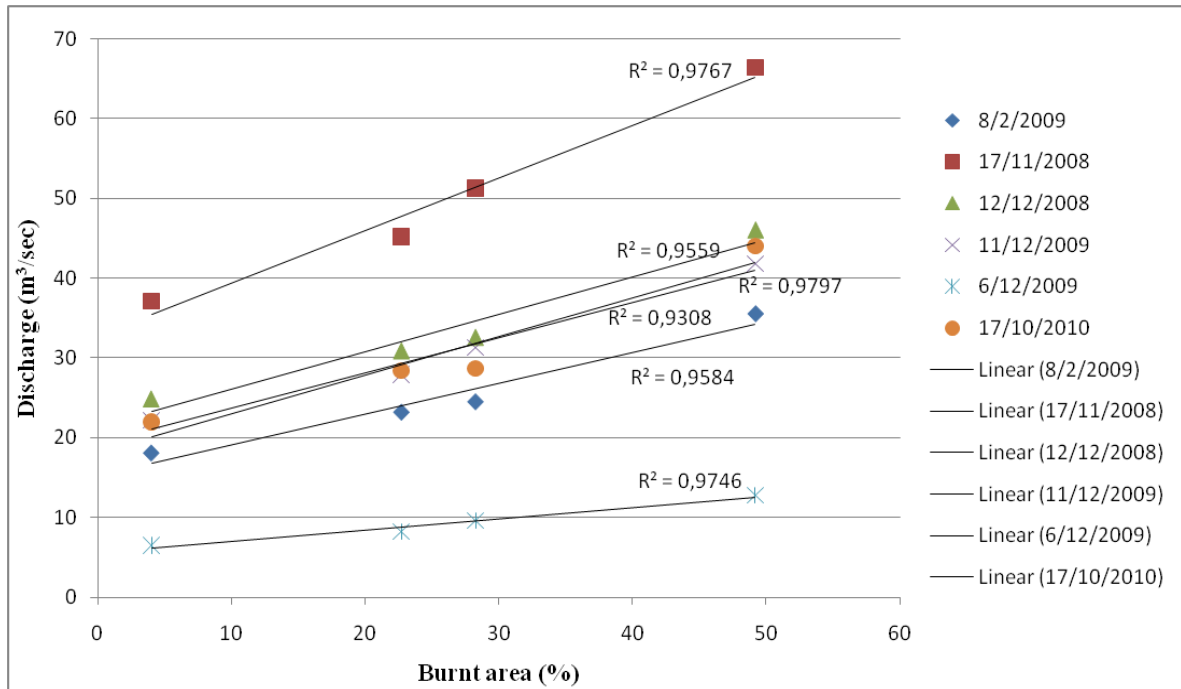
Subbasins	pre-fire tp	reduction (%)	tp scenario2
1	1,47	3,94	1,41
2	2,4	6,54	2,24
3	0,7	8,60	0,64
4	3,8	17,87	3,12
5	4,83	6,88	4,50

Subbasins	pre-fire tp	reduction (%)	tp scenario 3
1	1,47	18,04	1,20
2	2,4	8,12	2,21
3	0,7	15,53	0,59
4	3,8	29,22	2,69
5	4,83	11,15	4,29

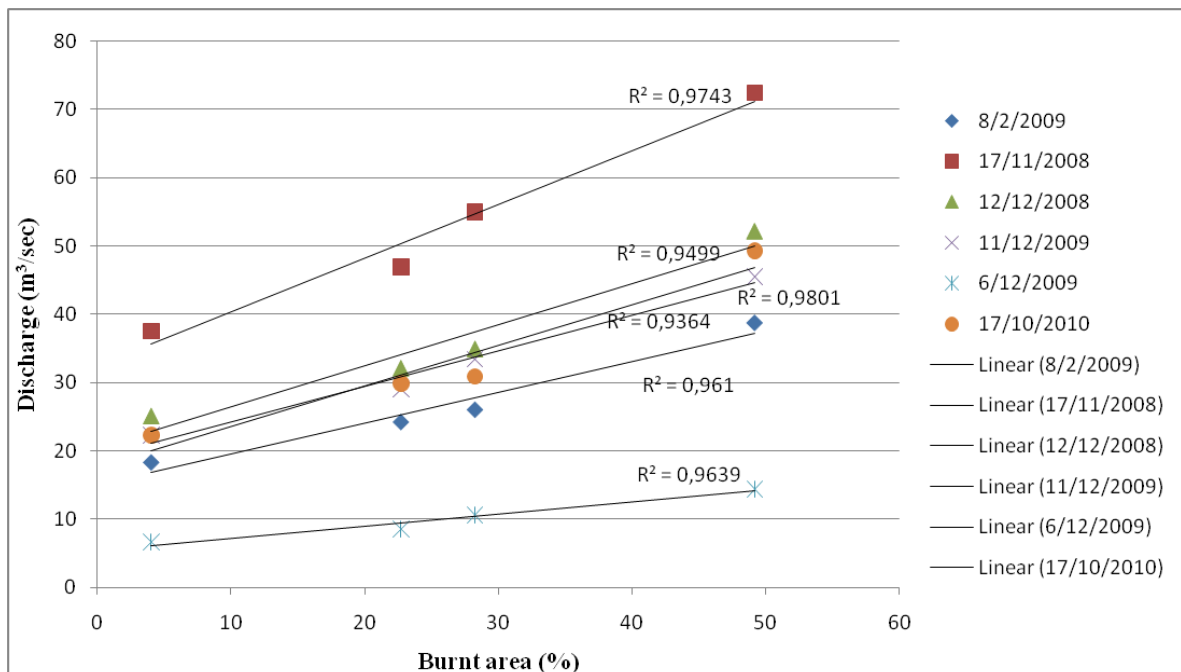
Subbasins	pre-fire tp	reduction (%)	tp after fire 2009
1	1,47	6,26	1,38
2	2,4	40,00	1,44
3	0,7	40,00	0,42
4	3,8	6,45	3,55
5	4,83	12,43	4,23

Furthermore, the values of the peak discharges were associated with the percentage of the burnt area after each fire with both approaches for several rainfall events. The results below refer to Rafina's observation point.

- redefining two hydrological parameters (CN, I_a)

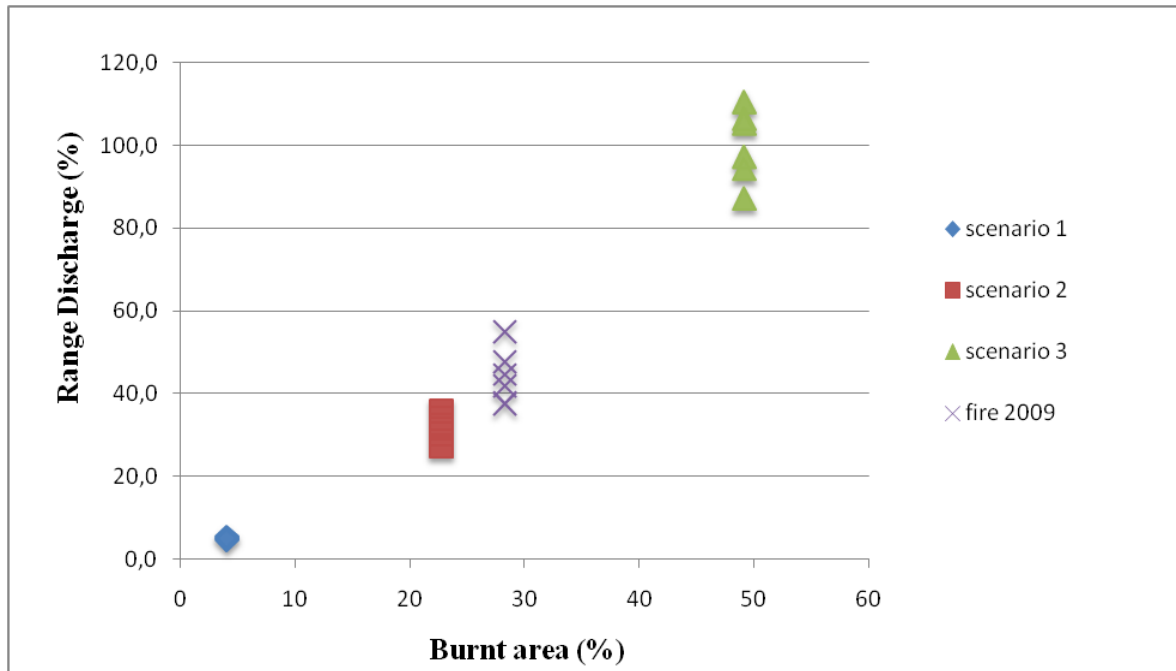


- redefining three hydrological parameters (CN, I_a , t_p)

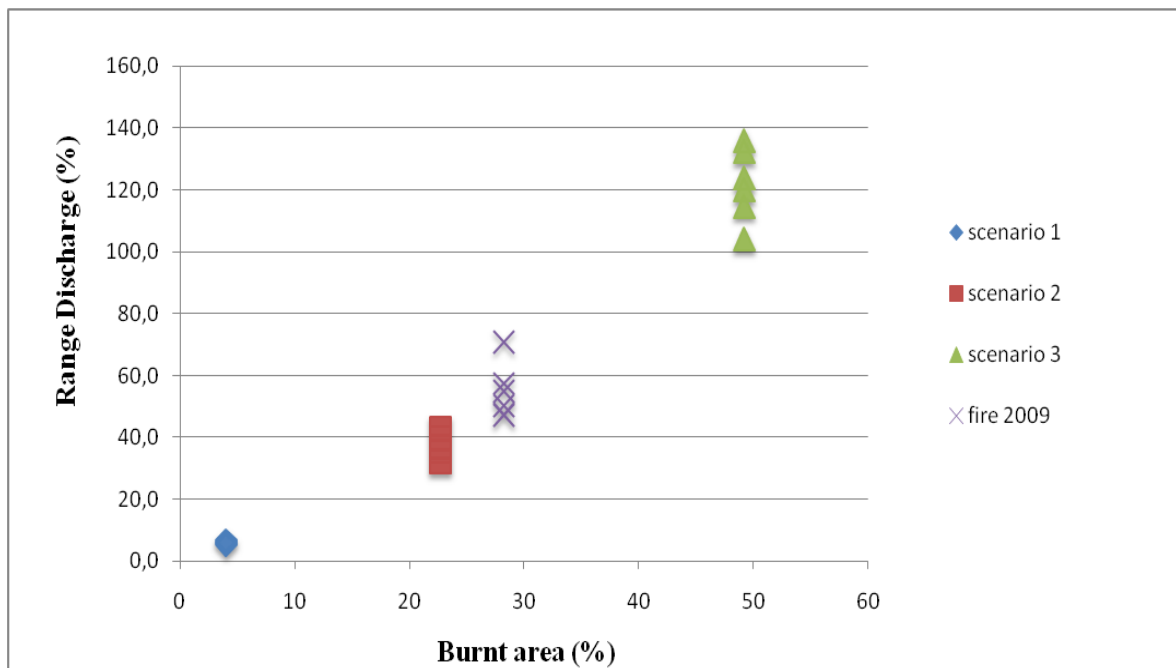


In addition, the peak discharges were correlated to the percentage of burnt area with both approaches at same observation point. The results are shown in the table below.

- redefining two hydrological parameters (CN, I_a)



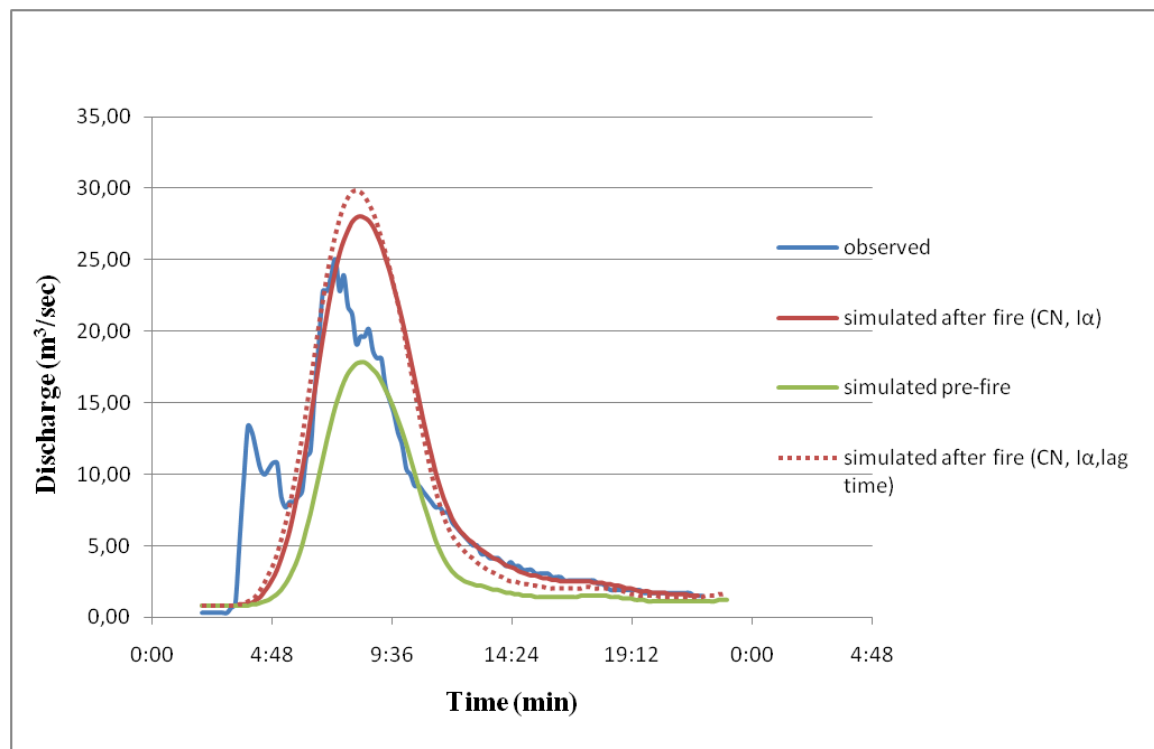
- redefining three hydrological parameters (CN, I_a , tp)



Fire	Range discharge (%) (CN, I_a)	Range discharge (%) (CN, I_a , tp)
Scenario 1	0,8	1,5
Scenario 2	8,6	11
Scenario 3	23,5	32
Fire 2009	17,5	23,7

Finally, the simulated pre-fire and post-fire hydrographs resulting from the HEC-HMS model were compared with the corresponding observed hydrographs. Generally, the simulated hydrographs and the observed ones seem to be quite close to each other, which implies the effectiveness of the proposed methodology regarding the reliable redefinition of the selected hydrological parameters after a fire event.

- **example of comparison between observed and simulated hydrographs**



Conclusions

The main conclusions of the thesis:

from the Geographic Fire Management Information System (G.FMIS):

- The burnt area grows simultaneously with the speed of the wind and at the same time the humidity of fuels reduces. The first factor seems to affect most the final results.
- An uneven expansion of the fire in different parts of the watershed is observed, which results mostly from the variety of fuels.
- Unevenness in the shape of the burnt areas is also observed. The main reason of this result is that the model should not be applied in urban areas
- The final percentage of the burnt area for the scenarios 1,2,3 comes up to 4%, 23% and 48% respectively.

from the study of the real fire of 2009:

- According to the digitization of the burnt area of the real fire of 2009 from satellite image, the fire affected 35.000 acres, that is 28% of the total watershed.
- The event affected the forest lands by 20,2%, while the percentages of the affected urban and cultivable area come up to 5,0% and 2,4% respectively.

from the methodology of redefining hydrological parameters:

- The values of the CN change proportionately to the surface of the area affected by each fire. More specifically, the subbasins 2 and 3, which actually are the experimental basin (X-Basin), appear to have a significant difference in the value of CN in the fire of 2009, with percentage changes 137% and 73% respectively. Remarkable changes of CN are shown in the subbasin 4 in the second and third fire scenarios, with percentage changes 34% and 56% respectively.
- Due to the extremely limited area that is affected by the first fire scenario, the slightest differentiation in the values of CN are observed in this case for all subbasins.

- The value of initial abstraction is significantly reduced in the subbasins where a significant CN increase was estimated. The reason of this reduction is the inversely proportional relation of the initial abstraction with the CN.
- The lag time which was estimated according to literature review tends to represent in more detail the hydrological conditions of the experimental basin.

from the hydrological model HEC-HMS:

- A significant influence of the surface of the burnt area on its hydrological response both for the subbasins and the entire catchment can be observed from the simulated hydrographs.
- It has also been detected that as the surface of the burnt area increases, the peak discharge in the subbasins' outputs increases as well
- The smaller the subbasin surface is, the more the peak discharge is increased

from the correlation between the burnt area and peak discharges for fires which were studied:

- A linear correlation between the burnt area and the peak discharges is also detected, with a high correlation coefficient for all the storm events which were studied.
- The most important characteristic of the rainfall is its depth, which increased, it increases the peak discharges as well.
- As the percentage of the burnt area increases, the variation of peak discharge before and after the fire, increases as well. In particular, according to the redefining method for the two parameters (CN, I_a) for the first scenario the values of the peak discharge vary up to 5%, while for the second, third scenario and the real fire of 2009, the variation is estimated up to 32%, 100% and 44% respectively. As far as the redefining method for the three parameters (CN, I_a , t_p) is concerned, the variation is estimated up to 6%, 37%, 122% and 55% respectively.
- As the burnt area percentage increases, the range of variation increases as well. Particularly, according to the redefining method for the two parameters (CN, I_a) the range in the first scenario rises up to 0,8%, in the second 8,6%,

while it increases up to 23,5% and up to 17,5% for the third scenario and the real fire of 2009. As far as the redefining method for the three parameters (CN, I_a , t_p) the range rises up to 1,5%, 11%, 32% and 23,7% respectively.

 **from the comparison between simulated and observed hydrographs after the fire of 2009:**

- The results indicate the necessity of redefining the model parameters for the simulation of the conditions after the fire event, because the simulation under the existing conditions before the fire, for the same storm event, underestimates significantly the hydrological response of the watershed.
- Generally, both approaches overestimate the runoff volume, but at the same time they approach in a better way the peak discharge, with the approach-estimated(-40%)- in which the three parameters (CN, I_a , t_p) are redefining and they give better result almost in every observation point
- In terms of flood risk the most important observation point is the Fladar point (before Rafina's settlement). From the comparison of the hydrographs for a specific storm event, both in peak discharge and runoff volume of the observed hydrograph are approached well with the redefining method of the two parameters (CN, I_a).

To sum up, according to the previous conclusions, radical change in the hydrological response of the basin after the fire event is observed. Finally, the effectiveness and the validity of the methodology developed and presented in the present thesis are proved and a possible expansion of their application is proposed.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή



1. Εισαγωγή

1.1 Στόχος

Οι αυξανόμενες σε αριθμό πυρκαγιές τα τελευταία χρόνια, έχουν δημιουργήσει μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα τόσο στην Ελλάδα όσο και στις υπόλοιπες χώρες της Μεσογείου. Το γεγονός αυτό έχει αφυπνίσει την επιστημονική κοινότητα όπου συστηματικά μελετά την επίδραση αυτών τόσο στην ζωή των ανθρώπων όσο και στο περιβάλλον της λεκάνης απορροής.

Η συσχέτιση των πυρκαγιών με την αύξηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας και η θέσπιση της οδηγίας 2007/60 για διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου, καθιστούν επιτακτική ανάγκη τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου πλαισίου εκτίμησης της μεταβολής της υδρολογικής συμπεριφοράς των λεκανών απορροής μετά την επίδραση πυρκαγιάς.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αναπτύχθηκε μεθοδολογία επαναπροσδιορισμού των υδρολογικών παραμέτρων μετά την επίδραση πυρκαγιάς και προσομοιώθηκε η υδρολογική απόκριση της υπό μελέτη λεκάνης με τη χρήση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS. Για τη διαμόρφωση σεναρίων πυρκαγιάς χρησιμοποιήθηκε το σύστημα διαχείρισης G.FMIS καθώς επίσης μελετήθηκε και η πυρκαγιά που έπληξε την περιοχή τον Αύγουστο του 2009.

1.2 Διάρθρωση εργασίας

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει εννιά κεφάλαια και ένα παράρτημα ως εξής:

Το κεφάλαιο 1 περιλαμβάνει εισαγωγικά στοιχεία για τις δασικές πυρκαγιές με κύριο άξονα τους παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά τους. Ακόμα αναφέρονται οι αιτίες που καθιστούν την Ελλάδα και τις υπόλοιπες μεσογειακές χώρες ευπαθείς στην εμφάνιση πυρκαγιών. Επιπλέον καταγράφονται οι επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών στην υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών απορροής σύμφωνα με τα αποτελέσματα βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

Το κεφάλαιο 2 εξετάζει τα κριτήρια επιλογής της περιοχής μελέτης για τον σκοπό της εργασίας, και δίνονται γενικά στοιχεία της λεκάνης απορροής της Ραφήνας καθώς και του εξοπλισμού που είναι εγκατεστημένος στην περιοχή.

Το κεφάλαιο 3 εξετάζει την καταλληλότητα των δύο πιο ευρέως διαδεδομένων μοντέλων προσομοίωσης δασικών πυρκαγιών (BehavePlus, Farsite)

και περιγράφει το σύστημα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών G.FMIS το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην εργασία για την κάλυψη των αναγκών δημιουργίας σεναρίων πυρκαγιάς.

Το κεφάλαιο 4 περιγράφει τα στοιχεία των τριών σεναρίων που διαμορφώθηκαν μετά την προσομοίωση με τη χρήση του λογισμικού G.FMIS καθώς επίσης και στοιχεία για την πραγματική πυρκαγιά που έπληξε την περιοχή μελέτης τον Αύγουστο του 2009.

Το κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει την μεθοδολογία επαναπροσδιορισμού των υδρολογικών παραμέτρων μετά την επίδραση πυρκαγιάς που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Το κεφάλαιο 6 περιγράφει την διαδικασία της υδρολογικής προσομοίωσης πριν και μετά την επίδραση πυρκαγιάς με τη χρήση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS.

Το κεφάλαιο 7 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα τόσο του συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών G.FMIS όσο και του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS. Επιπλέον εξετάζει την συσχέτιση ποσοστού καμένης έκτασης με την παροχή αιχμής και την μεταβολή της. Ακόμα περιλαμβάνει τη σύγκριση της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης απορροής της Ραφήνας πριν και μετά την πυρκαγιά του 2009.

Το κεφάλαιο 8 καταγράφει τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας μελέτης και διατυπώνει προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Το κεφάλαιο 9 περιλαμβάνει την βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης.

Το παράρτημα περιέχει πίνακες μοντέλων καύσιμης ύλης, υπολογισμού σταθμισμένου CN για τις πυρόπληκτες πυρκαγιές και τελικού CN για κάθε υπολεκάνη, καθώς επίσης και πίνακες με τις μεταβολές και το εύρος των μεταβολών των παροχών αιχμής για κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά.

1.3 Χαρακτηριστικά δασικών πυρκαγιών

Τα χαρακτηριστικά κάθε πυρκαγιάς λίγο ή πολύ διαφέρουν. Αυτό οφείλεται στην επίδραση μεγάλου αριθμού παραγόντων, οι οποίοι αλληλεπιδρούν με περίπλοκους τρόπους τόσο μεταξύ τους όσο και με τη φωτιά. Για να γίνουν κατανοητές αυτές οι επιδράσεις αρχικά πρέπει να γίνουν γνωστά τα θεμελιώδη στοιχεία που είναι απαραίτητα για την ύπαρξη φωτιάς.(<http://www.fri.gr/>)

1.3.1 Τα θεμελιώδη στοιχεία της φωτιάς

Η φωτιά είναι αποτέλεσμα μιας χημικής διεργασίας για την οποία απαιτείται η συνύπαρξη τριών θεμελιωδών στοιχείων κατάλληλα συνδυασμένων μεταξύ τους. Τα στοιχεία αυτά είναι η καύσιμη ύλη, η θερμότητα και το οξυγόνο. Συχνά, παρουσιάζονται στα βιβλία σαν πλευρές ενός τριγώνου που ονομάζεται “το τρίγωνο της φωτιάς” (Εικόνα 1-1). Αν αφαιρεθεί έστω και μία από τις πλευρές του τριγώνου, τότε το τρίγωνο παύει να υπάρχει. Το ίδιο ισχύει και για την ύπαρξη της φωτιάς εάν αφαιρεθεί η καύσιμη ύλη, ή το οξυγόνο ή η θερμότητα. Πάνω σε αυτή την αρχή στηρίζονται όλες οι μέθοδοι πρόληψης και καταστολής των δασικών πυρκαγιών.



Εικόνα 1-1 Το τρίγωνο της φωτιάς.

Η καύσιμη ύλη είναι απαραίτητη γιατί σε αυτήν εγκλείεται η θερμότητα και από αυτήν τροφοδοτούνται οι φλόγες. Στις δασικές πυρκαγιές η καύσιμη ύλη αποτελείται από ζωντανή και νεκρή βιομάζα. Η ύπαρξη θερμότητας είναι απαραίτητη για την προθέρμανση της καύσιμης ύλης μέχρι τουλάχιστον τους 300 °C (βαθμούς Κελσίου). Όταν η καύσιμη ύλη προθερμαίνεται παράγει αναφλέξιμα αέρια. Τα αέρια αυτά συνδέονται με το οξυγόνο που υπάρχει στον αέρα με τη χημική αντίδραση της καύσης εκλύοντας κυρίως μεγάλες ποσότητες θερμότητας, διοξειδίου του άνθρακα και υδρατμών. Η φλόγα είναι η περιοχή της καύσης των αερίων η οποία γίνεται ορατή χάρη στην ακτινοβολία που παράγεται. Η θερμοκρασία της ξεπερνά τους 1000 °C.

1.3.2 Μετάδοση της θερμότητας σε δασικές πυρκαγιές

Η θερμότητα της φλόγας μεταδίδεται στη γύρω καύσιμη ύλη και την προθερμαίνει μέχρι να φθάσει και αυτή σε θερμοκρασία ανάφλεξης. Έτσι η φλόγα προχωρά σε νέα θέση και η πυρκαγιά εξαπλώνεται. Η μετάδοση της θερμότητας γίνεται και με τους τρεις γνωστούς τρόπους δηλαδή:

- με επαφή, από ένα σημείο της καύσιμης ύλης σε ένα άλλο χάρη στην αγωγιμότητα αυτής στη θερμότητα
- με επαγωγή, δηλαδή με μεταφορά και διάχυση των θερμών αερίων της καύσης και
- με ακτινοβολία που προέρχεται από τη φλόγα.

Από τους τρεις αυτούς τρόπους η επαφή έχει πολύ μικρό ρόλο στην εξάπλωση της πυρκαγιάς λόγω της μικρής αγωγιμότητας της καύσιμης ύλης.

Η μεταφορά θερμότητας με επαγωγή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική όπως μπορεί να πιστοποιήσει εύκολα κανείς εάν περάσει το χέρι του επάνω από μία φλόγα κεριού. Η συνεισφορά της επαγωγής στη συνολική θερμότητα που προθερμαίνει την καύσιμη ύλη στις δασικές πυρκαγιές είναι εξαιρετικά μεταβλητή. Σε πυρκαγιές επιφανείας σε επίπεδες περιοχές χωρίς άνεμο το σύνολο των θερμών αερίων ανέρχεται προς τα επάνω και διαχέεται στην ατμόσφαιρα χωρίς να έρθει σε επαφή με την καύσιμη ύλη μπροστά από τη φλόγα. Όταν όμως καίγεται επιεδάφια καύσιμη ύλη κάτω από κόμμες δένδρων, τότε οι κόμμες δέχονται μεγάλες ποσότητες θερμότητας από την επαγωγή των θερμών αερίων. Η συνεισφορά της επαγωγής στη μεταφορά θερμότητας για την προθέρμανση της καύσιμης ύλης και την εξάπλωση της πυρκαγιάς αυξάνεται σημαντικά στο μέτωπο της πυρκαγιάς όταν φυσάει ισχυρός άνεμος που μεταφέρει τα θερμά αέρια μπροστά από τη φωτιά και γίνεται μεγαλύτερη όσο υψηλότερη είναι η καύσιμη ύλη. Η ύπαρξη μεγάλης κλίσης στο έδαφος αυξάνει αυτή τη συνεισφορά ακόμη περισσότερο.

Η ακτινοβολία που προέρχεται από τη φλόγα είναι ο σημαντικότερος τρόπος μεταφοράς θερμότητας και παίζει πάντοτε σημαντικό ρόλο στην εξάπλωση της πυρκαγιάς. Η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας αυξάνεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή. Π.χ. εάν η προσπίπτουσα ακτινοβολία στην καύσιμη ύλη σε απόσταση 20 μέτρων από τη φλόγα έχει ένταση A τότε εάν η φλόγα πλησιάσει στα 10 μέτρα η ένταση της ακτινοβολίας θα είναι τετραπλάσια. Η αρχή αυτή έχει μεγάλη σημασία για την κατανόηση της

σημαντικότερης αύξησης της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην καύσιμη ύλη όταν μειώνεται η απόσταση της φλόγας από αυτήν, είτε λόγω της κλίσης του εδάφους είτε λόγω της κλίσης της φλόγας με την επίδραση του ανέμου. Το ίδιο βέβαια συμβαίνει και με τη θερμότητα που δέχονται οι δασοπυροσβέστες όταν τους πλησιάζει η φλόγα.

1.3.3 Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών

Στο δάσος η ύπαρξη καύσιμης ύλης και αέρα είναι βέβαια αυτονόητη. Όταν υπάρξει και κάποια κατάλληλη πηγή θερμότητας που προθερμαίνει την καύσιμη ύλη το αποτέλεσμα είναι η εκδήλωση πυρκαγιάς. Το πώς θα συμπεριφερθεί όμως η κάθε πυρκαγιά εξαρτάται απόλυτα από ορισμένους παράγοντες που την επηρεάζουν. Σε κάθε κατηγορία υπάρχουν περισσότεροι του ενός παράγοντες που επιδρούν στη συμπεριφορά της φωτιάς. Οι παράγοντες αυτοί εμπίπτουν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- χαρακτηριστικά καύσιμης ύλης
- καιρικές συνθήκες
- τοπογραφικές συνθήκες

1.3.3.1 Η καύσιμη ύλη

Το σύνολο του δάσους αποτελεί καύσιμη ύλη, καθώς όλα τα μέρη του (ξηροφυλλοτάπητας, χόρτα, πόες, μικροί και μεγάλοι θάμνοι, δένδρα) είναι αναφλέξιμα υλικά. Ο τρόπος όμως που τα υλικά αυτά αναφλέγονται και η επίδρασή τους στη συμπεριφορά της φωτιάς ποικίλει ανάλογα με τη διάταξή τους στο χώρο, την ποσότητά τους, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, τη θερμοκρασία τους και την περιεχόμενη σε αυτά υγρασία.

Η διάταξη στο χώρο κατατάσσει την καύσιμη ύλη σε υποεδάφια, επιεδάφια και εναέρια. Η υποεδάφια καύσιμη ύλη περιλαμβάνει όλα τα αναφλέξιμα υλικά που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια και περιλαμβάνει τον βαθύ χούμο, τις ρίζες και σάπιους μισοθαμένους κορμούς και κλαδιά. Η καύσιμη αυτή ύλη όταν είναι ξερή καίγεται, πάντοτε όμως με αργούς ρυθμούς λόγω της έλλειψης του απαραίτητου οξυγόνου. Έτσι, η συνεισφορά της στην εξάπλωση της φωτιάς είναι πολύ μικρή.

Αντίθετα, μπορεί να διατηρήσει τη φωτιά για ώρες ή και ημέρες μετά την κατάσβεση της φλόγας από τους πυροσβέστες αποτελώντας πηγή αναζωπυρώσεων.

Η επιεδάφια καύσιμη ύλη περιλαμβάνει όλα τα αναφλέξιμα υλικά που βρίσκονται στο έδαφος ή ακριβώς επάνω από αυτό. Τέτοια υλικά είναι:

- ο χούμος, δηλαδή η νεκρή καύσιμη ύλη (βελόνες, φύλλα, κλαδάκια κλπ.) που έχει αποσυντεθεί σε βαθμό που είναι μη αναγνωρίσιμη η προέλευσή της,
- ο ξηροφυλλοτάπητας, δηλαδή τα νεκρά κατακείμενα χόρτα, βελόνες, φύλλα, κλαδάκια κλπ. που δεν έχει προχωρήσει η αποσύνθεσή τους,
- τα χόρτα,
- οι σχετικά μικροί θάμνοι,
- τα νεαρά δενδρύλλια,
- οι νεκροί κατακείμενοι κορμοί και τα κλαδάκια στο έδαφος (από φυσική αποκλάδωση, θραύσεις από χιόνι ή άνεμο, υπολείμματα υλοτομιών κλπ.), και
- τα πρέμνα, δηλαδή η βάση του δένδρου ύψους μερικών δεκάδων εκατοστών από το έδαφος που, όταν αυτό υλοτομηθεί, παραμένει μαζί με τις ρίζες στο δάσος.

Η αρχική ανάφλεξη των δασικών πυρκαγιών γίνεται κατά κανόνα στην επιεδάφια καύσιμη ύλη. Για την καύση της δεν υπάρχει έλλειψη οξυγόνου και έτσι οι πυρκαγιές που δίνει μπορεί να έχουν επικίνδυνη συμπεριφορά, ιδίως ως προς την ταχύτητα εξάπλωσής τους.

Η εναέρια καύσιμη ύλη περιλαμβάνει όλα τα πράσινα και νεκρά υλικά που βρίσκονται στην κόμη, μακριά από το έδαφος. Τα υλικά αυτά περιλαμβάνουν τα κλαδιά και τα φύλλα ή βελόνες των δένδρων, νεκρά ιστάμενα δένδρα, υψηλούς θάμνους καθώς και άλλες μορφές βιομάζας που βρίσκονται στην κόμη (αναρριχώμενα φυτά, βρύα κλπ.). Η ανάφλεξη της εναέριας καύσιμης ύλης κατά κανόνα αυξάνει κατά πολύ το μήκος της φλόγας και την ένταση της πυρκαγιάς. Παράλληλα δημιουργεί τις προϋποθέσεις για τη μετάδοση της πυρκαγιάς σε μεγάλες αποστάσεις με καύτρες.

Η ποσότητα της καύσιμης ύλης, μετρούμενη σε τόνους ανά στρέμμα ή σε κιλά ανά τετραγωνικό μέτρο, είναι ένας από τους βασικότερους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η θερμική ένταση της πυρκαγιάς. Γενικά, όσο περισσότερη καύσιμη ύλη υπάρχει τόσο περισσότερη είναι η διαθέσιμη ενέργεια προς έκλυση.

Το πόσο γρήγορα εκλύεται η περιεχόμενη στην καύσιμη ύλη ενέργεια, άρα και η ένταση του μετώπου της πυρκαγιάς, δεν εξαρτάται μόνο από την ποσότητά της

αλλά και από άλλα δύο χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης: τις διαστάσεις της (πάχος) και τον βαθμό συμπίεσής της.

Η περιεχόμενη υγρασία στην καύσιμη ύλη, δηλαδή η ποσότητα σε γραμμάρια νερού που περικλείεται σε κάθε γραμμάριο ξερής βιομάζας, παίζει έναν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά της φωτιάς. Έναν ρόλο μάλιστα που είναι εύκολα αντιληπτός γιατί η υγρασία είναι ένας παράγοντας ιδιαίτερα μεταβλητός στη διάρκεια του έτους αλλά και σε ημερήσια βάση. Όσο μεγαλύτερη η περιεχόμενη υγρασία τόσο περισσότερη ενέργεια απαιτείται για να ανέβει η θερμοκρασία της καύσιμης ύλης στους 300 °C και να αναφλεγεί γιατί πρέπει πρώτα να εξατμισθεί το περιεχόμενο νερό στους 100 °C. Η θέρμανση και η εξάτμιση του νερού απαιτούν πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας. Έτσι η προθέρμανση και ανάφλεξη της καύσιμης ύλης καθυστερεί, επηρεάζοντας αντίστοιχα και τη συνολική συμπεριφορά της φωτιάς.

Η δασική βιομάζα που αποτελεί την καύσιμη ύλη είναι ζωντανή ή νεκρή. Η υγρασία της ζωντανής καύσιμης ύλης κυμαίνεται μεταξύ 50 και 300% δηλαδή σε κάθε γραμμάριο ξερής βιομάζας περιλαμβάνονται 0,5 έως 3 γραμμάρια νερό. Η μεταβολή της υγρασίας αυτής εξαρτάται κυρίως από τη φυσιολογική κατάσταση των φυτών και διαφέρει αρκετά μεταξύ των διαφόρων φυτικών ειδών. Έτσι, μεταβάλλεται σημαντικά με την εποχή η οποία καθορίζει και τη φάση ανάπτυξης του φυτού και εξαρτάται σε μικρότερο βαθμό από τις συνθήκες ξηρασίας.

Η μεγάλη διαφορά της ζωντανής με τη νεκρή καύσιμη ύλη ως προς την περιεχόμενη υγρασία είναι ότι η υγρασία της δεύτερης εξαρτάται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος και κυμαίνεται παρακολουθώντας τις αλλαγές αυτού. Έτσι, η έκθεση στον ήλιο, η θερμοκρασία του αέρα και φυσικά η βροχή επηρεάζουν την υγρασία της νεκρής καύσιμης ύλης. Τον πιο σημαντικό όμως ρόλο παίζει η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας γιατί αυτή μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη διάρκεια του 24ώρου επηρεάζοντας άμεσα την υγρασία της καύσιμης ύλης και συνεπώς και της συμπεριφοράς της φωτιάς. Η συνεχής αυτή μεταβολή κάνει τον παράγοντα αυτό ιδιαίτερα σημαντικό για την κατανόηση και πρόβλεψη των αλλαγών στη συμπεριφορά της φωτιάς.

Η υγρασία της νεκρής καύσιμης ύλης κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 2 και 30% και εξαρτάται κυρίως από τη σχετική υγρασία του αέρα και σε μικρότερο βαθμό από τη θερμοκρασία. Περισσότερο διαβρέχεται η καύσιμη ύλη όταν εκτεθεί στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (χιόνι, βροχή κλπ.). Στις αλλαγές της σχετικής

υγρασίας και της θερμοκρασίας η υγρασία της καύσιμης ύλης ανταποκρίνεται με κάποια μικρότερη ή μεγαλύτερη καθυστέρηση ανάλογα με τις διαστάσεις της.

Από τα παραπάνω γίνεται εμφανής η μεγάλη σημασία της ποσότητας της νεκρής λεπτής καύσιμης ύλης και της περιεχόμενης σε αυτήν υγρασίας για τη συμπεριφορά της φωτιάς. Οι περισσότερες πυρκαγιές αρχίζουν με ανάφλεξη των καυσίμων της κατηγορίας αυτής η οποία μάλιστα είναι τόσο ευκολότερη όσο πιο ξερά είναι τα καύσιμα. Όταν οι πρώτες φλόγες δυναμώσουν ακολουθεί η ανάφλεξη των μέσης διαμέτρου νεκρών καυσίμων αλλά και των ζωντανών φυτών.

Η θερμοκρασία της καύσιμης ύλης είναι άλλος ένας σημαντικός παράγοντας για τη συμπεριφορά της φωτιάς. Όσο θερμότερα είναι τα δασικά καύσιμα τόσο λιγότερη ενέργεια απαιτείται για την ανάφλεξή τους. Έτσι αναφλέγονται ταχύτερα και το ίδιο ισχύει για την εξάπλωση της φωτιάς. Η θερμοκρασία των καυσίμων εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αέρα και την έκθεση των καυσίμων στην ηλιακή ακτινοβολία. Το αποτέλεσμα της τελευταίας είναι πολύ σημαντικό καθώς η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ καυσίμων εκτεθειμένων στον ήλιο και καυσίμων στη σκιά νεφών ή της κόμης των δένδρων μπορεί να ξεπεράσει τους 25 °C.

1.3.3.2 Οι καιρικές συνθήκες

Ο καιρός είναι ο περισσότερο μεταβλητός παράγοντας που επηρεάζει τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών. Οι παράμετροι του καιρού που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών είναι:

- ο άνεμος (ταχύτητα και διεύθυνση)
- η σχετική υγρασία του αέρα
- η θερμοκρασία του αέρα
- τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (βροχή, χιόνι, πάχνη, δροσιά)
- η ύπαρξη νεφώσεων ή ηλιοφάνειας
- η σταθερότητα της ατμόσφαιρας.

Οι παράμετροι αυτές στον τόπο της φωτιάς εξαρτώνται από:

- τις συνοπτικές μετεωρολογικές συνθήκες
- την επίδραση της τοπογραφίας
- την επίδραση της ίδιας της πυρκαγιάς στα καιρικά φαινόμενα

Η σχετική υγρασία του αέρα, η θερμοκρασία, η ηλιοφάνεια και τα κατακρημνίσματα επιδρούν στη συμπεριφορά της φωτιάς μέσω της επίδρασής τους

στην περιεχόμενη υγρασία και τη θερμοκρασία της καύσιμης ύλης όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Η ταχύτητα του ανέμου, είναι ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες για τη συμπεριφορά της φωτιάς. Η ταχύτητα αυτή μετράται με ανεμόμετρα σε χλμ/ώρα. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου τόσο περισσότερο οι φλόγες αποκτούν κλίση προς τα εμπρός και πλησιάζουν την καύσιμη ύλη μπροστά τους. Η αποτελεσματικότητα της ακτινοβολίας πολλαπλασιάζεται και αυξάνεται κατακόρυφα η μεταφορά θερμότητας με επαγωγή για την προθέρμανση της καύσιμης ύλης. Έτσι, η ταχύτητα διάδοσης της φωτιάς πολλαπλασιάζεται, νέα καύσιμη ύλη συνεχώς αναφλέγεται και έτσι οι φλόγες μεγαλώνουν. Τυχόν μικρά διάκενα της καύσιμης ύλης που συχνά υπάρχουν στο δάσος παύουν να αποτελούν εμπόδιο στην εξάπλωση της φωτιάς.

Το μέγεθος της επίδρασης του ανέμου διαφέρει μεταξύ των διαφόρων τύπων καύσιμης ύλης. Γενικά είναι μεγαλύτερο για λεπτά καύσιμα όπως τα χόρτα και για καύσιμα που δεν είναι συμπιεσμένα. Η διάταξη των καυσίμων σε ύψος κατά κανόνα συνεπάγεται μεγαλύτερη ευαισθησία στην επίδραση του ανέμου όταν αυτά αναφλεγούν. Συχνά, όταν οι συνθήκες ξηρασίας δεν είναι ακραίες, η μετάδοση της πυρκαγιάς σε θαμνώνες (όπου η καύσιμη ύλη είναι διατεταγμένη σε αρκετό ύψος) απαιτεί την ύπαρξη ισχυρού ανέμου. Κατά τις νυκτερινές ώρες, που συνήθως η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται και αυξάνεται η σχετική υγρασία, υγραίνοντας τη νεκρή καύσιμη ύλη, συχνά η εξάπλωση της πυρκαγιάς σε θαμνώνες παύει χωρίς την επέμβαση των δασοπυροσβεστών. Η μείωση της αποτελεσματικότητας προθέρμανσης των καυσίμων με την πτώση του ανέμου, σε συνδυασμό με την σχετικά υψηλή υγρασία των ζώντων θάμνων και την αύξηση της υγρασίας των νεκρών καυσίμων κάνουν αδύνατη την εξάπλωση της πυρκαγιάς.

Η επίδραση ισχυρού ανέμου στην πυρκαγιά, ιδιαίτερα όταν αυτή εξελίσσεται σε επικόρυφη πυρκαγιά, έχει και ένα άλλο σημαντικό όσο και επικίνδυνο χαρακτηριστικό. Προκαλεί τη μεταφορά αναμένων τεμαχιδίων καύσιμης ύλης όπως κουκουνάρια, φύλλα, φλοιό κλπ. σε απόσταση δεκάδων ή και εκατοντάδων μέτρων μπροστά από το μέτωπο της φωτιάς. Τα τεμαχίδια αυτά ονομάζονται “καύτρες”. Όταν οι καύτρες προσγειωθούν σε λεπτή νεκρή και ξερή καύσιμη ύλη (π.χ. χόρτα) προκαλούν νέες εστίες φωτιάς, συχνά πέρα από δρόμους και αντιπυρικές ζώνες, μηδενίζοντας τις προσπάθειες των δασοπυροσβεστών και εκθέτοντάς τους σε σημαντικό κίνδυνο εγκλωβισμού από τη φωτιά.

Η κατάσταση σταθερότητας της ατμόσφαιρας είναι άλλος ένας παράγοντας που αν και όχι άμεσα αντιληπτός μπορεί να αποτελέσει καθοριστικό παράγοντα για την εξέλιξη μιας πυρκαγιάς. Όταν η θερμοκρασιακή δομή της ατμόσφαιρας είναι τέτοια που αντιστέκεται στην κάθετη κίνηση του αέρα η ατμόσφαιρα ονομάζεται σταθερή και δεν διευκολύνει την ανάπτυξη της πυρκαγιάς γιατί δυσκολεύει την τροφοδοσία της με οξυγόνο. Αντίθετα, όταν η ατμόσφαιρα είναι ασταθής τότε οι συνθήκες διευκολύνουν την τροφοδοσία με οξυγόνο, και ευνοούν τη δημιουργία μεγάλης στήλης καπνού και τη γρήγορη εξάπλωση της πυρκαγιάς. Όταν εμφανίζεται φωτοχημικό νέφος στις μεγάλες πόλεις και όταν υπάρχει θολούρα και διάχυτος καπνός στην ατμόσφαιρα η ατμόσφαιρα είναι σταθερή. Αντίθετα, ένδειξη αστάθειας στην ατμόσφαιρα αποτελούν ο καθαρός καταγάλανος ουρανός, η πολύ καλή ορατότητα, η εμφάνιση μικρών νεφών με κάθετη ανάπτυξη στις κορυφές των βουνών (σωρίτες) και η δημιουργία καταιγίδων.

1.3.3.3 Οι τοπογραφικές συνθήκες

Η τοπογραφία στην περιοχή κάθε πυρκαγιάς έχει μεγάλη σημασία για τη συμπεριφορά της. Τα τοπογραφικά στοιχεία που έχουν ιδιαίτερη σημασία για την πυρκαγιά είναι η κλίση του εδάφους, η έκθεση της πλαγιάς, το υψόμετρο και ορισμένα γενικά χαρακτηριστικά της τοπογραφίας όπως φαράγγια, διάσελα, και κορυφογραμμές. Η επίδρασή της τοπογραφίας στην πυρκαγιά είναι τόσο άμεση όσο και έμμεση.

Η πυρκαγιά κατά κανόνα εξαπλώνεται προς τα υψηλότερα μέρη κάθε πλαγιάς, εκτός εάν υπάρχει ισχυρός αντίθετος άνεμος. Η ταχύτητα εξάπλωσής της είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση. Σε ελαφριά καύσιμα (πχ. χόρτα) όταν ο άνεμος φυσάει κατά τη φορά της κλίσης η ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς μπορεί να είναι απίστευτα μεγάλη. Η κλίση επηρεάζει άμεσα τη συμπεριφορά της φωτιάς με δύο τρόπους:

- λόγω της κλίσης οι φλόγες πλησιάζουν την καύσιμη ύλη μπροστά τους όπως συμβαίνει και στην περίπτωση ισχυρού ανέμου. Έτσι αυξάνεται σημαντικότερα η ακτινοβολία που προθερμαίνει την καύσιμη αυτή ύλη και επιταχύνεται η ανάφλεξή της.

- η παραγόμενη θερμότητα ανέρχεται παράλληλα με την πλαγιά δημιουργώντας ένα θερμό ρεύμα αέρα (επαγωγή) που αυξάνει την ταχύτητα εξάπλωσης ακόμη παραπάνω.

Όταν η κλίση είναι μεγάλη, σοβαρό πρόβλημα αποτελούν φλεγόμενα κομμάτια καύσιμης ύλης που κατρακυλούν στην πλαγιά δημιουργώντας νέες εστίες φωτιάς κοντά στη βάση της. Στη συνέχεια οι νέες φωτιές εξαπλώνονται και πάλι προς τα επάνω στην πλαγιά με τη βοήθεια της κλίσης έχοντας διαθέσιμη άφθονη άκαυτη ύλη.

Η έκθεση της πλαγιάς παίζει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά της φωτιάς γιατί συμμετέχει σε μεγάλο βαθμό στη διαμόρφωση της θερμοκρασίας και της υγρασίας της καύσιμης ύλης. Γενικά, στις βόρειες πλαγιές οι οποίες δέχονται τη λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία η καύσιμη ύλη είναι ψυχρότερη και περισσότερο υγρή από ότι στις υπόλοιπες πλαγιές. Οι θερμότερες και ξηρότερες συνθήκες και μάλιστα κατά την κρισιμότερη περίοδο της ημέρας επικρατούν στις νότιες και νοτιοδυτικές πλαγιές. Οι ανατολικές πλαγιές θερμαίνονται σημαντικά κατά τις προμεσημβρινές ώρες ενώ οι δυτικές πλαγιές δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία μέχρι τη δύση του ήλιου. Όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση της πλαγιάς τόσο περισσότερο ισχύουν οι παραπάνω αρχές. Επίσης, είναι ιδιαίτερα σημαντικό το ότι όταν θερμαίνεται μια πλαγιά δημιουργούνται τοπικοί άνεμοι προς τα επάνω της πλαγιάς που επίσης συνεισφέρουν στη γρηγορότερη εξάπλωση της φωτιάς. Κατά τις νυκτερινές ώρες που το έδαφος της πλαγιάς κρυώνει, ο αέρας που έρχεται σε επαφή με αυτό κρυώνει επίσης. Τότε αρχίζει μία ροή ανέμου προς τα χαμηλότερα σημεία της πλαγιάς που καθώς “μάχεται” την επίδραση της κλίσης, αποτελεί αρνητικό στοιχείο στην εξάπλωση της φωτιάς και προσφέρει σημαντική βοήθεια στους δασοπυροσβέστες.

Τόσο η έκθεση της πλαγιάς όσο και το υψόμετρο σε πολλές περιπτώσεις καθορίζουν τον τύπο και τα χαρακτηριστικά της βλάστησης. Γενικά στις βόρειες πλαγιές η βλάστηση είναι περισσότερο πλούσια ενώ στις νότιες μπορεί να είναι αραιή και υποβαθμισμένη. Το υψόμετρο επηρεάζει τη θερμοκρασία του αέρα που κατά μέσο όρο μειώνεται κατά 1 °C ανά 100 μ. υψομετρικής ανόδου. Το γεγονός αυτό, πέρα από την άμεση επίδρασή του στη φωτιά, επηρεάζει και τις συνθήκες ανάπτυξης των φυτών. Έτσι, το υψόμετρο είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη σύνθεση των φυτοκοινωνιών και επομένως και τα πυρικά τους χαρακτηριστικά.

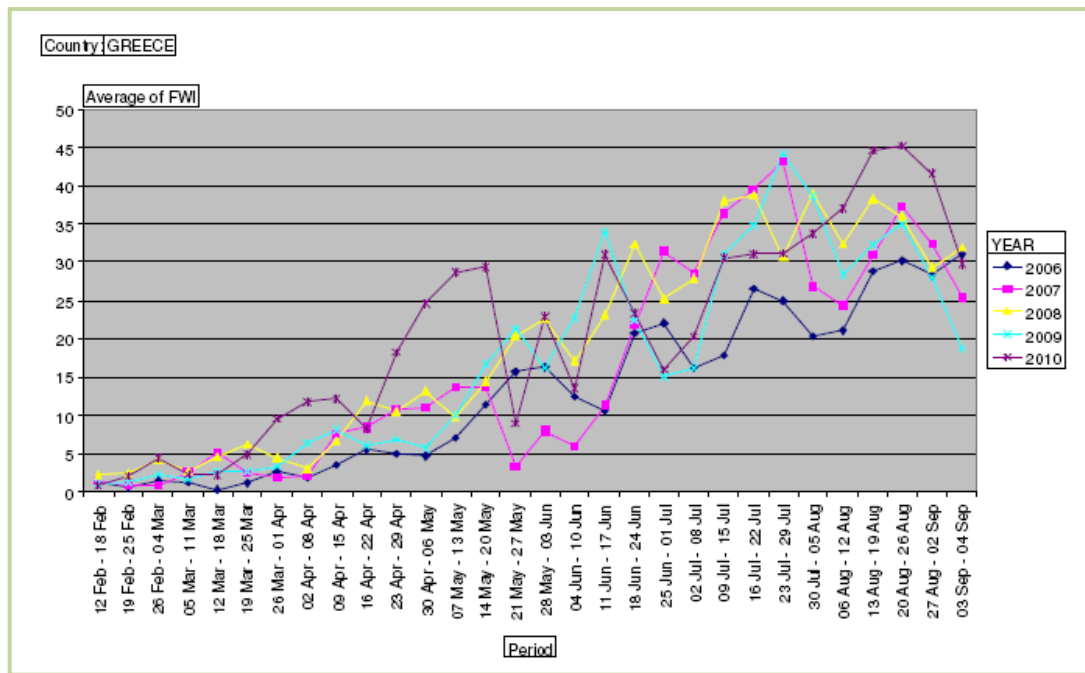
Η γενική τοπογραφική διαμόρφωση μιας περιοχής επηρεάζει έμμεσα αλλά σημαντικά τη συμπεριφορά της φωτιάς. Η μεταβολή κλίσεων, εκθέσεων και

υψομέτρων έχουν βέβαια τα αποτελέσματα που προαναφέρθηκαν. Όμως, ιδιαίτερα σημαντική είναι η επίδραση των διάφορων τοπογραφικών στοιχείων στην ταχύτητα, την κατεύθυνση και τους στροβιλισμούς του ανέμου. Παραδείγματος χάρη, όταν ο άνεμος διέρχεται από ένα βαθύ και στενό φαράγγι η ταχύτητά του αυξάνεται εντυπωσιακά. Ακόμη, όταν ο κατεύθυνση του ανέμου τέμνει μια κορυφογραμμή και η ταχύτητά του είναι αρκετά μεγάλη στην πίσω πλευρά αυτής δημιουργούνται συχνά έντονοι στροβιλισμοί που μεταβάλλουν τη συμπεριφορά της φωτιάς σε σχέση με την αναμενόμενη.

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό τοπογραφικό στοιχείο που συχνά δημιουργεί ακραίες συνθήκες εξάπλωσης της φωτιάς είναι το κλειστό φαράγγι, δηλαδή το βαθύ φαράγγι που είναι κλειστό στο ένα άκρο του. Όταν υπάρχει αρκετή βλάστηση στις πλαγιές του φαραγγιού και μια πυρκαγιά εισέλθει στη βάση του η συμπεριφορά της μπορεί να αλλάξει δραματικά. Το φαράγγι μπορεί να λειτουργήσει σαν καμινάδα δημιουργώντας ισχυρό ρεύμα αέρα προς τα επάνω και τραβώντας την πυρκαγιά μέχρι την κορυφή του με εκπληκτικό ρυθμό. Στην ένταση του φαινομένου συντελεί η ύπαρξη ανέμου στην κορυφή του φαραγγιού και η ύπαρξη αστάθειας στην ατμόσφαιρα

1.4 Δασικές πυρκαγιές στην Ελλάδα

Στον ελλαδικό χώρο, η καταστροφή δασών και λοιπών περιοχών από πυρκαγιές, είναι ένα φαινόμενο το οποίο επαναλαμβάνεται κάθε χρόνο, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες. Η συνθήκη αυτή επιβεβαιώνεται και από την αναφορά του European Forest Fire Information System (EFFIS) για το 2010. Η αυξητική τάση του δείκτη FWI (Fire Weather Index) κατά του καλοκαιρινούς μήνες - δηλαδή του δείκτη ο οποίος χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του κινδύνου πυρκαγιάς σύμφωνα με τις μετεωρολογικές συνθήκες - μαρτυρά την τρωτότητα της χώρας σε εμφάνιση πυρκαγιών την συγκεκριμένη εποχή (Διάγραμμα 1-1).



Διάγραμμα 1-1 Δείκτης επικινδυνότητας εμφάνισης πυρκαγιάς μέχρι της 4 Σεπτεμβρίου του 2010 και των προηγούμενων 4 χρόνων στην Ελλάδα

Πηγή: European Forest Fire Information System (EFFIS_ Newsletter_2010)

Τραγικό παράδειγμα αποτελούν οι δασικές πυρκαγιές τον Αύγουστο του 2007, όπου συνέβη μία από τις μεγαλύτερες φυσικές καταστροφές στην ιστορία της σύγχρονης Ελλάδας. Σύμφωνα με την ετήσια αναφορά Forest Fire in Europe 2007, του Joint Research Center (JRC), η συνολική καμένη έκταση ανέρχεται στα 225.733,9 ha. Περισσότερο από το 70% της έκτασης αυτής οφείλεται σε πέντε μεγάλες πυρκαγιές στην Πελοπόννησο (170.000 ha) και δύο στην Εύβοια (25.000 ha) (Εικόνα 1-2). Αποτέλεσμα των καταστροφικών αυτών πυρκαγιών ήταν η απώλεια δεκάδων ζώων, η εκκένωση πολλών χωριών, η καταστροφή περιοχών οι οποίες έχουν χαρακτηριστεί ως προστατευμένες περιοχές Natura 2000, απειλήθηκαν τοπία παγκόσμιου ενδιαφέροντος όπως ο χώρος της Αρχαίας Ολυμπίας και γενικά προκλήθηκαν μεγάλου μεγέθους οικονομικά και κοινωνικά προβλήματα τόσο σε τοπικό όσο και σε εθνικό επίπεδο.



Εικόνα 1-2 Δορυφορική εικόνα (Aqua, Nasa) στις 25 Αυγούστου 2007

Οι μεγάλες πυρκαγιές είναι μέρος των φυσικών διεργασιών των οικοσυστημάτων σε πολλές περιοχές του κόσμου όπου η φυτική βιομάζα γίνεται εύφλεκτη είτε κατά την διάρκεια της περιόδου ξηρασίας ή, στις υγρές περιοχές, μετά από σειρά ετών ξηρασίας. Όπως έχει αναγνωριστεί από την σύνοδο των ΟΗΕ για την Αντιμετώπιση της Ερημοποίησης (UNCCD), οι ξηρές ύφυγρες έως και ημίξηρες περιοχές είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς στις μεγάλες καταστροφικές πυρκαγιές. Αντίθετα, οι ξηρότερες περιοχές δεν μπορούν να συγκρατήσουν μόνιμη βλάστηση και έτσι οι πυρκαγιές δεν είναι συχνές.

Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό, ότι το φαινόμενο των συχνών πυρκαγιών στην Ελλάδα - όταν δεν οφείλεται στον ανθρώπινο παράγοντα- οφείλεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό στο μεσογειακό της κλίμα. Ο τύπος αυτός κλίματος, αλλά και το οικοσύστημα που τον συνοδεύει, έχει περιορισμένη εξάπλωση στη γήινη επιφάνεια και δημιουργήθηκε σχετικά πρόσφατα (πλειστόκαινο). Αρκετοί επιστήμονες πιστεύουν, ότι ο κλιματικός αυτός τύπος διατηρείται χάρη στα ψυχρά

ωκεάνια ρεύματα, τα οποία αν εκλείψουν τότε μαζί τους θα εκλείψει και το μεσογειακό κλίμα (Κωνσταντινίδης Π. και συνεργάτες, 2001). Το κλίμα αυτό χαρακτηρίζεται για το θερμό καλοκαίρι του, τους ήπιους χειμώνες του, τη μικρή, σχετικά, στάθμη βροχόπτωσης και τη μεγάλη διάρκεια της ηλιοφάνειας που παρουσιάζει. Ένα κλίμα λοιπόν, σαν το μεσογειακό, δημιουργεί τις κατάλληλες συνθήκες για την εμφάνιση σφοδρών πυρκαγιών. Εκτός από το κλίμα όμως, συνεισφέρει και η μεσογειακή βλάστηση. Αναλυτικότερα, οι περιοχές που έχουν μεσογειακό κλίμα, παρά το γεγονός ότι είναι απομακρυσμένες η μία από την άλλη, εντούτοις ανέπτυξαν έναν κοινό τύπο βλάστησης, με ιδιαίτερη μορφή και σύνθεση και προσαρμοσμένο στις ιδιόμορφες θερμικές, υδατικές, φυσικές και λοιπές συνθήκες της μεσογειακής ζώνης, καθώς και στις συχνές πυρκαγιές και τη συχνή επιβάρυνσή τους από την κτηνοτροφία. Στη χώρα μας, έχουν το άριστο της ανάπτυξής τους οι αιθαλής σκληρόφυλλοι θάμνοι (Εικόνα 1-3,β) που σχηματίζονται από είδη όπως η κουμαριά, ο σχίνος, το πουρνάρι, το φυλλύκι, η αριά, ο ασπάλαθος, η ξυλοκερατιά. Η ποώδης βλάστηση στις περιοχές αυτές ή απουσιάζει τελείως μην αντέχοντας την αλληλοπάθεια και τον ανταγωνισμό σε φως και νερό των θάμνων ή η παρουσία της είναι φτωχή περιοριζόμενη κυρίως στα κράσπεδα και τα διάκενα των δασοσκεπών εκτάσεων. Η παρουσία κωνοφόρων ειδών (Εικόνα 1-3,α), όπως είναι η χαλέπιος πεύκη (*Pinus halepensis*), η τραχεία πεύκη (*Pinus brutia*), η κουκουναριά (*Pinus pinea*) και άλλα είδη, συμπληρώνουν τη σύνθεση της μεσογειακής βλάστησης. Τέλος, αισθητή είναι η παρουσία χαμηλών αρωματικών θάμνων, γνωστών ως φρύγανα (Εικόνα 1-3,γ).

Τα κωνοφόρα είδη και η αιθαλής θάμνοι είναι είδη πολυτιμότητα και αναντικατάστατα για τις μεσογειακές περιοχές, γιατί έχουν μεγάλη οικολογική ανοχή στην θερινή ξηρασία, και λόγω ότι το μεσογειακό κλίμα είναι επιρρεπές στις δασικές πυρκαγιές, έχουν αναπτύξει ειδικούς μηχανισμούς επιβίωσης από αυτές. Επίσης τους έχει δοθεί η ονομασία “πυρόφυτα” ώστε να επισημανθεί ότι τα φυτά αυτά μπορούν να διεξέλθουν μιας δασικής πυρκαγιάς χάρη στους μηχανισμούς αντοχής που διαθέτουν απέναντι στη φωτιά, αλλά και της ταχύτατης φυσικής αναγέννησής τους μετά από αυτήν. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα η ισορροπία του οικοσυστήματος αποκαθίσταται και πάλι, έτσι ώστε το καμένο οικοσύστημα να μη



(α)

(β)



(γ)

Εικόνα 1-3 Μεσογειακή βλάστηση

(α) Κωνοφόρο είδος - *Pinus pinea* (κουκουναριά)

(β) Αειθαλής θάμνος - *Pistacia lentiscus* (σχίνος)

(γ) Χαμηλός αρωματικός θάμνος - *Erica manipuliflora* (ρείκι)

διακρίνεται από το άκαυτο. Η ανάκαμψη αυτή στα μεν κωνοφόρα, γίνεται με τη διασπορά σπόρων που ελευθερώνονται από τους κώνους μετά από κάθε φωτιά ενώ στους δε αειθαλής θάμνους, πραγματοποιείται με τη διατήρηση των κοιμώντων οφθαλμών ανενεργών σε ολόκληρη τη ζωή του φυτού, λίγο κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, προστατευόμενοι από τη φωτιά. Όσον αφορά τα φρύγανα είναι χαμηλοί θάμνοι οι οποίοι αντέχουν στις υψηλές θερμοκρασίες και στην ξηρασία και φύονται σε χαμηλά υψόμετρα. Ως επί το πλείστον είναι αρωματικοί και πολλοί είναι γνωστοί για τις φαρμακευτικές τους ιδιότητες, καθώς χρησιμοποιούνται στην πρακτική ιατρική ήδη από την αρχαιότητα. Αυτός ο τύπος βλάστησης είναι χαρακτηριστικός

των μεσογειακών οικοσυστημάτων και θεωρείται ότι είναι συνήθως αποτέλεσμα υποβάθμισης προϋπάρχουσας βλάστησης, μακκίας και δάσους. Αναπτύσσεται κυρίως σε φτωχά και βραχώδη ασβεστολιθικά και πυριτικά εδάφη ή σε εκτάσεις που έχουν επανειλημμένως καεί από πυρκαγιές. Εξαιτίας των αιθέριων ελαίων που περιέχουν πολλά από αυτά τα φυτά, αποτελούν πολύ καλή πρώτη ύλη για πυρκαγιές την θερμή περίοδο του έτους.

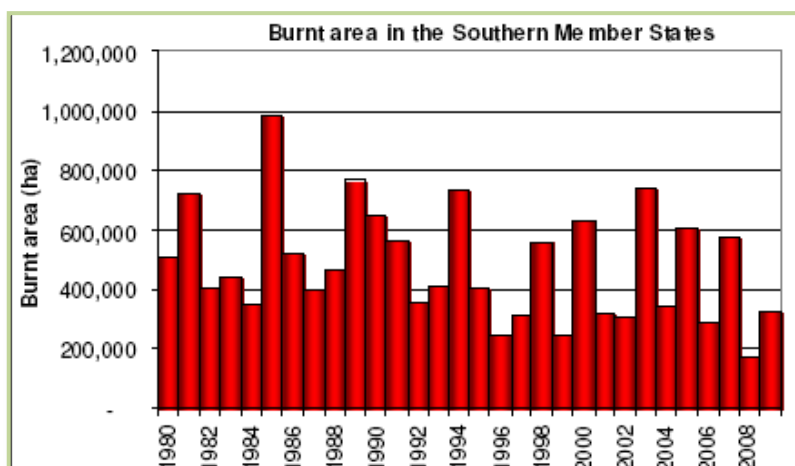
Η εμφάνιση των δασικών πυρκαγιών χωρίς την παρουσία του ανθρώπου εκτιμάται 120-150 χρόνια. Όμως η αύξηση των ακούσιων και εκούσιων εμπρησμών, έχει μειώσει τραγικά αυτόν τον χρόνο. Η εμφάνιση συχνών πυρκαγιών σε ένα δασικό σύμπλεγμα οδηγεί αναπόφευκτα σε αναστολή των μηχανισμών επιβίωσής του και πολύ συχνά σε μείωση της παραγωγικής ικανότητάς του, αλλά και σε υποβάθμιση των παραγωγικών διαδικασιών των δασικών εκμεταλλεύσεων συνολικότερα.

Η Ελλάδα διαθέτει αξιόλογο και αξιοζήλευτο δασικό πλούτο. Σύμφωνα με την τελευταία απογραφή είναι σημαντική η έκταση που κατέχουν τα δάση στη χώρας μας (25 εκατ. στρ.). Τα δάση αυτά έχουν την ικανότητα να παράγουν ανανεώσιμες πρώτες ύλες, όπως ξύλο, ρητίνη, καρπούς κ.ά. Παράλληλα έχουν την ικανότητα να προσφέρουν στον άνθρωπο ύψιστης σημασίας ωφέλειες ως αποτέλεσμα των φυσικών λειτουργιών τους, όπως αυτές εκφράζονται μέσα από την υδρονομική προστασία, τη ρυθμιστική επίδραση στον κύκλο των νερών της βροχής και στις ευκαιρίες που παρέχουν στον καταπιεζόμενο σήμερα άνθρωπο των μεγαλουπόλεων, για αναψυχή και αναβάθμιση της ποιότητας ζωής του. Τέλος, τα φυσικά αποθέματα των δασών μας προσφέρουν μεγάλες υπηρεσίες, με το ρυθμιστικό τους ρόλο στο χώρο του περιβάλλοντος και την ικανότητά τους να προσφέρουν πολύτιμες ευκαιρίες για φυσική ζωή και εξέλιξη σε ένα μεγάλο αριθμό ειδών και πληθυσμών του φυτικού και ζωικού βασιλείου. Εκτιμάται ότι η φυσική χλωρίδα στην Ελλάδα κατέχει, από άποψη βιοποικιλότητας, τη δεύτερη θέση στην Ευρώπη, μετά την Ιβηρική χερσόνησο, ενώ αξιοζήλευτη θέση διατηρεί και η άγρια πανίδα, τόσο με τα θηλαστικά της, όσο και με τα πουλιά που ενδημούν ή διέρχονται από τα ελληνικά δάση.

1.5 Επίδραση των δασικών πυρκαγιών στην υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών απορροής

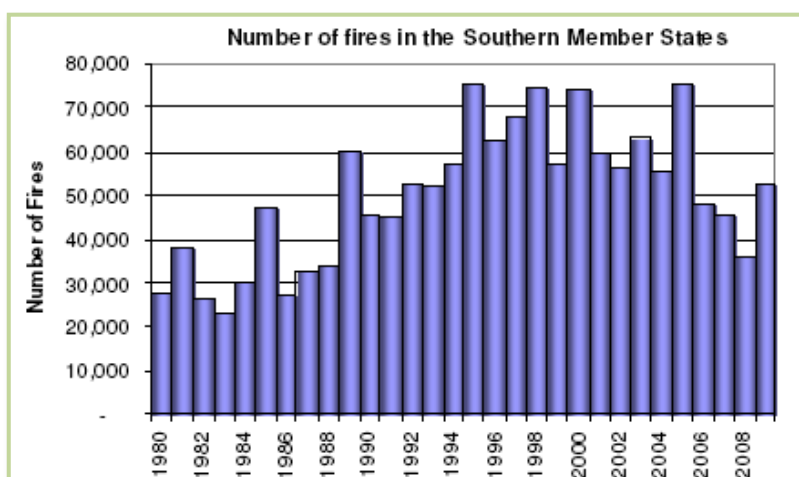
Οι αυξανόμενες σε αριθμό πυρκαγιές τα τελευταία χρόνια, έχουν δημιουργήσει μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα τόσο στην Ελλάδα όσο και στις υπόλοιπες χώρες

της Μεσογείου. Η συνολική έκταση που έχει επηρεαστεί από τις φωτιές στις ευρωπαϊκές χώρες της Μεσογείου (Πορτογαλία, Ισπανία, Γαλλία, Ιταλία, Ελλάδα) μεταβάλλεται αξιοσημείωτα από χρονιά σε χρονιά, γεγονός που υποδηλώνει το σημαντικό ρόλο των εκάστοτε μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν Σχήμα.



Διάγραμμα 1-2 Καμένη έκταση (ha) στις 5 ευρωπαϊκές χώρες της Μεσογείου από το έτος 1980 έως το 2009. Πηγή: forest fires in Europe 2009 JRC

Όσον αφορά όμως στον αριθμό των πυρκαγιών διακρίνεται μια αυξητική τάση μετά το 1990 Σχήμα.



Διάγραμμα 1-3 Αριθμός πυρκαγιών στις 5 ευρωπαϊκές χώρες της Μεσογείου από το έτος 1980 έως το 2009. Πηγή: forest fires in Europe 2009 JRC

Το γεγονός αυτό έχει αφυπνίσει την επιστημονική κοινότητα όπου συστηματικά μελετά την επίδραση αυτών τόσο στην ζωή των ανθρώπων όσο και στο περιβάλλον της λεκάνης απορροής.

Αν εξετάσουμε λοιπόν, το φαινόμενο της πυρκαγιάς σε επίπεδο λεκάνης απορροής, η εκδήλωση και η εξέλιξή του, έχει σοβαρότατες οικονομικές, κοινωνικές, οικολογικές, αισθητικές κ.α επιπτώσεις σε αυτήν και τους κατοίκους της περιοχής. Αναλυτικότερα, από την πυρκαγιά επηρεάζονται η χλωρίδα και η πανίδα της λεκάνης, οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους, καθώς επίσης και η ποιότητα του νερού και του αέρα. Επιπλέον, επηρεάζονται οι εργασίες και τα εισοδήματα των κατοίκων, οι κοινωνικές του δραστηριότητες, η ψυχική τους υγεία, η πολιτιστική τους κληρονομιά κλπ. Επίσης, εκτός από τις παραπάνω επιπτώσεις, οι εκτεταμένες δασικές πυρκαγιές, σύμφωνα με μελέτες, έχουν επίδραση και στην υδρολογική συμπεριφορά των φυσικών λεκανών (Anderson et al., 1976, Tiedemann et al., 1979, Meeuwing, 1971, DeBano, 1981, Robichaud, 2000a,b, Simanton et al., 1990, Johnsen et al., 2001, Pierson et al., 2001, 2002a, Robichaud, 2005).

1.5.1 Άμεσες και έμμεσες επιδράσεις των πυρκαγιών στην υδρολογική συμπεριφορά λεκανών απορροής

Αναφορικά με τις άμεσες και έμμεσες επιδράσεις των πυρκαγιών στην υδρολογική απόκριση λεκανών απορροής, αρκετές μελέτες έχουν επισημάνει τις επιδράσεις των πυρκαγιών, εξετάζοντας την μείωση της διηθητικής ικανότητας του εδάφους (Wright and Bailey, 1982), την αύξηση της επιφανειακής απορροής (De Bano, 1981), την επιτάχυνση της διαδικασίας διάβρωσης του εδάφους (Booker, 1998, Booker et al., 1998, Wilson, 1999), την αύξηση των απωλειών των θρεπτικών συστατικών του εδάφους (Thomas, 1999), τις αλλαγές στις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους (Giovannini et al., 1997), και τις αλλαγές επίσης στη δυναμική της βλάστηση (Trabaud, 1996).

1.5.1.1 Άμεσες επιδράσεις των πυρκαγιών στην υδρολογική συμπεριφορά λεκανών απορροής

Συγκεκριμένα, οι αλλαγές στην υδρολογική δίαιτα των λεκανών απορροής συνδέονται άμεσα με την καταστροφή της φυτοκάλυψης του εδάφους, η οποία συνεπάγεται με σημαντική μείωση της παρεμπόδισης της βροχής από τα φυτά, κατ'επέκταση σημαντική μείωση της εξατμισοδιαπνοής και άρα αύξηση της επιφανειακής απορροής (Morris and Moses, 1987, Prosser and William, 1998,

Johansen et al., 2001, Wohlgenmth et al., 2001, Moffet et al., 2007, Pierson et al., 2008).

Γενικά, είναι γνωστό ότι οι κόμεις των δένδρων και η βλάστηση γενικότερα λειτουργούν ως ένα πρώτο εμπόδιο που μετριάξει την ορμή του νερού, ενώ παράλληλα απορροφούν και μέρος της ποσότητας που πέφτει. Νερό απορροφά και το ριζικό σύστημα των φυτών, το οποίο επιπλέον επιδρά θετικά και στην κατείδυση των κατακρημνισμάτων αφού διασωληνώνει το έδαφος. Οι επιπτώσεις αυτές είναι πιο σημαντικές όσο μεγαλύτερη είναι η αποψίλωση της βλάστησης. Κατά συνέπεια, χωρίς τη βλάστηση, παρατηρείται αύξηση της έντασης και της ποσότητας της επιφανειακής απορροής του νερού, μείωση της ικανότητας κατείδυσης αυτού, και ταυτόχρονα προκαλείται διάβρωση του εδάφους. Έτσι, το νερό όχι μόνο δε συγκρατείται, αλλά παρασύρει μαζί του και φερτά υλικά απογυμνώνοντας το έδαφος ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονες κλίσεις. Σε έρευνες που έχουν διεξαχθεί σε εδάφη μη επηρεασμένα από πυρκαγιές, οι ερευνητές έχουν καταλήξει ότι τα δένδρα και γενικότερα η φυτοκάλυψη ευνοεί την αποθήκευση του νερού στο έδαφος και μετριάξει τις επιδράσεις από την δημιουργία του υδροφοβικού στρώματος, σε διήθηση και διάβρωση (Rauzi et al., 1968, Blackburn et al., 1986).

Αναλυτικότερα, σε πολλές μεσογειακές χώρες παρατηρήθηκε αύξηση της επιφανειακής απορροής και διάβρωσης κατά τουλάχιστον μία με δύο τάξεις μεγέθους σε σχέση με τις μη καμένες περιοχές (Inbar, 1998, Rulli et al 2005, Rulli, 2006), ενώ σε άλλες περιπτώσεις αναφέρεται αύξηση έως και τρεις τάξεις (Dyrness, 1976, Helvey, 1980, Morris and Moses, 1987, DeBano et al., 1996, DeBano, 2000b, Robichaud et al., 2000).

Όσον αφορά την αύξηση της επιφανειακής απορροής, σε περιοχές με μεσογειακού τύπου οικοσυστήματα, (Καλιφόρνια, Ιταλία, Τασμανία, Ισραήλ και Ιβηρική χερσόνησο) έχει παρατηρηθεί ότι κυμαίνεται από 11% (Anderson, 1976) μέχρι 300% (Nasser, 1988) σε μεγάλες λεκάνες απορροής, μέχρι 800% σε μικρές (Campbell, 1977) και μέχρι 50.000% σε πειραματικές επιφάνειες (Inbar, 1998). Εκτός από την αύξηση της επιφανειακής απορροής αναμένεται αύξηση και στις πλημμυρικές αιχμές, οι οποίες κυμαίνονται από 45% (Anderson, 1976) μέχρι 600% (Nasser, 1988) σε μεγάλες λεκάνες, ενώ σε μικρές η αύξηση φτάνει και 5700% (Campbell, 1977)

Σε πρόσφατη έρευνα των Rulli et al. (2006), παρατηρήθηκε αύξηση από 1800% έως 5700% της πλημμυρικής απορροής και από 1900% έως 3600% της παροχής

αιχμής για το ίδιο ύψος βροχόπτωσης που σημειώθηκε πριν και 6 μήνες μετά από την πυρκαγιά του 2003 σε πειραματικές επιφάνειες (στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται με την ονομασία «plots») σε λεκάνες απορροής στην Ιταλία. Επίσης οι ίδιοι μελετητές το 2007 κατέληξαν ότι αυξάνεται σημαντικά ο κίνδυνος πλημμύρας, εφόσον αναμένεται ότι σε έντονο γεγονός βροχόπτωσης θα σχηματισθεί πλημμυρική παροχή πολύ μεγαλύτερη από αυτή που θα σχηματιζόταν σε αμετάβλητες συνθήκες - χωρίς την εμφάνιση πυρκαγιάς. Η παραπάνω διαπίστωση προήλθε από την μελέτη εννέα μικρών λεκανών στην περιοχή Saint Gabriel Mountains (Καλιφόρνια, USA) κάτω από φυσιολογικές (πριν την πυρκαγιά) και μεταβαλλόμενες (μετά την πυρκαγιά) συνθήκες, με την βοήθεια υδρολογικού μοντέλου. Η πιθανότητα να συμβούν ακραία πλημμυρικά επεισόδια μετά την πυρκαγιά αυξήθηκε κατά μία τάξη μεγέθους (Rulli et al., 2007).

Αλλά και προγενέστερες έρευνες έχουν επισημάνει αντίστοιχες αυξητικές τάσεις στα επίπεδα απορροής και στην πιθανότητα εμφάνισης πλημμυρικών φαινομένων.

Οι Lopez και Batalla (2001) παρατήρησαν αύξηση κατά 30% της πλημμυρικής απορροής και κατά 120% των παροχών αιχμής για τα ίδια δεδομένα βροχόπτωσης πριν και έξι μήνες μετά τη πυρκαγιά του 1994 στη λεκάνη του Arbuçies. Ενώ ο Walsh et al. (1994) παρατήρησε αύξηση 5-25% στην επιφανειακή απορροή συγκρίνοντας καμένες και άκαυτες εκτάσεις δασών με ευκαλύπτους και πεύκα στην Πορτογαλία. Επιπλέον, ο Lavabre et al. (1993) μελετώντας τις επιδράσεις δασικής πυρκαγιάς - η οποία έκαψε το 85% της υπό μελέτη έκτασης - στην υδρολογική συμπεριφορά πειραματικής λεκάνης στην Μεσόγειο, η οποία καλύπτεται από πεύκο-δρύινο δάσος, σε διάφορες χρονικές στιγμές, κατέληξε σε αύξηση 30% στην ετήσια απορροή για ίδιες τιμές ετήσιας βροχόπτωσης, ενώ οι μηνιαίες και ημερήσιες τιμές απορροής αυξήθηκαν κατά 25%. Τα αποτελέσματα συνδέθηκαν με την μείωση της εξατμισοδιαπνοής λόγω απώλεια της φυτικής κάλυψης. Επίσης παρατηρήθηκε εξαιρετικά μεγάλη αύξηση στη συχνότητα εμφάνισης πλημμύρας. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς 10 χρόνων - η οποία εκτιμήθηκε σε συνθήκες πριν την πυρκαγιά - εμφανίστηκε τρεις φορές μετά τον πρώτο χρόνο της πυρκαγιάς, παρόλο που τα γεγονότα βροχόπτωσης δεν ξεπέρασαν την περίοδο επαναφοράς του ενός χρόνου.

Η αύξηση της απορροής και κατά συνέπεια του κινδύνου πλημμύρας διαφέρει ανάλογα και με το χρονικό διάστημα που έχει περάσει από την πυρκαγιά. Οι Scott and Van Wyk (1990) αναφέρουν 200% αύξηση στην ετήσια απορροή και έως 300% αύξηση στην παροχή αιχμής κατά την διάρκεια του έτους που ακολούθησε τις πυρκαγιές, σε λεκάνη της νότιας Αφρικής. Ο Cerda το 1998 εκτίμησε τις αλλαγές στην επιφανειακή απορροή μετά από πυρκαγιές σε πειραματικές επιφάνειες, οι οποίες καλύπτονται με τυπική μεσογειακή βλάστηση χαμηλής ανάπτυξης, για τα επόμενα έξι χρόνια. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με προσομοίωση γεγονότων βροχόπτωσης πάνω από τις πειραματικές επιφάνειες. Σύμφωνα με την έρευνα, μετά την πυρκαγιά, ο συντελεστής απορροής μειώθηκε από τον πρώτο χειμώνα (45%) μέχρι και τον έκτο χειμώνα (6%).

Τέλος έχει παρατηρηθεί διαφοροποίηση στο σχήμα του πλημμυρογραφήματος, όπου δευτερεύοντες οξείες αιχμές αντικαθιστούν τον ομαλό κατερχόμενο κλάδο του πλημμυρογραφήματος που καταγραφόταν πριν την εμφάνιση πυρκαγιάς (Brown 1972).

1.5.1.2 Έμμεσες επιδράσεις των πυρκαγιών στην υδρολογική συμπεριφορά λεκανών απορροής

Όπως προαναφέρθηκε, οι πυρκαγιές επηρεάζουν την υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης απορροής και με έμμεσο τρόπο, μεταβάλλοντας τις χημικές (DeBano et al., 1977, Giovannini and Lucchesi, 1983) και τις φυσικές (Doehring, 1968, Wells, 1981, Gionannini et al., 1988) ιδιότητες του εδάφους, οι οποίες επιδρούν στη διήθηση και κατά συνέπεια στην υδρολογική δίαιτα της λεκάνης.

Αναλυτικότερα, οι σφοδρές πυρκαγιές έχουν επιζήμιες συνέπειες στις φυσικές ιδιότητες του εδάφους καταστρέφοντας αρχικά την οργανική ουσία. Η οργανική ουσία συμβάλλει στη διατήρηση των συσσωματωμάτων του εδάφους και κατά συνέπεια η καταστροφή της επιφέρει σημαντικές αλλαγές στη δομή του εδάφους. Η μεταβολή αυτή στη δομή του εδάφους μπορεί να αυξήσει τη φαινομενική πυκνότητα (DeByle, 1981), και να μειώσει το πορώδες του εδάφους (Wells et al., 1979) κυρίως από την καταστροφή των μακροπόρων (>0,6 mm διάμετρο). Το πορώδες του εδάφους μπορεί να μειωθεί και από τον αφανισμό των ασπόνδυλων ζώων, τα οποία συμβάλλουν στη δημιουργία μακροπόρων (Kettredge, 1983). Επίσης, μείωση του εδαφικού πορώδους συντελείται και με την έκθεση του γυμνού εδάφους στις

σταγόνες τις βροχής, όπου επιφέρει καταστροφή των συσσωματωμάτων του εδάφους και φράξιμο των πόρων (Ralston and Hatchell, 1971).

Επιπλέον, προγενέστερες έρευνες έχουν δείξει ότι οι επαναλαμβανόμενες πυρκαγιές σε μια περιοχή έχουν αθροιστική επίπτωση στις φυσικές ιδιότητες του εδάφους. Συγκεκριμένα, η οργανική ύλη του εδάφους που καίγεται συχνά είναι συνήθως μειωμένη και το έδαφος είναι πιο συμπαγές και λιγότερο διαπερατό από ότι το μη καμένο έδαφος (Wahlenberg et al., 1939, Garren, 1943).

Όσον αφορά τις χημικές ιδιότητες του εδάφους, από τη δεκαετία του '70 είναι γνωστό ότι μετά από δασικές πυρκαγιές, παρατηρείται σχηματισμός υδρόφοβου στρώματος μέσα στο έδαφος, σε μικρό σχετικά βάθος 5-10 cm (Εικόνα 1-4), ως αποτέλεσμα της καύσης της οργανικής ουσίας του εδάφους. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς και την καύση οργανικού υλικού, υδρόφοβες ουσίες εξαερώνονται και διαχέονται μέσα στο έδαφος και συμπυκνώνονται σε βαθύτερα στρώματα, όπου το έδαφος είναι ψυχρότερο. Τέτοια στρώματα εδάφους σ' ένα συγκεκριμένο βάθος, επιτρέπουν την επιφανειακή διείσδυση του νερού και την εν συνεχεία συγκέντρωσή του στο αδιαπέρατο από το νερό στρώμα εδάφους (DeBano et al., 1976) (Εικόνα 1-6). Το άφθονο νερό που συγκεντρώνεται στο έδαφος πάνω από το αδιάβροχο στρώμα, πολτοποιεί το έδαφος το πάνω από το στρώμα αυτό, το οποίο στη συνέχεια μετακινείται προς τα κατόντη υπό την επίδραση της μεγάλης κλίσης του εδάφους. Έτσι εξηγείται η αθρόα μεταφορά στερεών υλικών, στα πεδινά και στις θάλασσες μετά από δασικές πυρκαγιές. Το υδροφοβικό αυτό στρώμα σύμφωνα με τις αναφορές σχηματίζεται σε θερμοκρασίες 176-288 °C και καταστρέφεται σε βαθμούς πάνω από τους 288 °C (Neary et al., 1999).



Εικόνα 1-4 Υδροφοβικό στρώμα (ενδεικνυόμενο από το χέρι) σε αμμώδες έδαφος.



(α)



(β)

Εικόνα 1-5 (α) Δημιουργία λιμναζόντων νερών και (β) ανομοιογενών διαβρεγμένων περιοχών σε αμμώδη εδάφη, λόγω σχηματισμού του υδροφοβικού στρώματος.

Πηγή: Doerr et al., 2000



Εικόνα 1-6 Συγκράτηση του νερού στην επιφάνεια του εδάφους λόγω σχηματισμού υδροφοβικού στρώματος μετά από πυρκαγιά.

Πηγή: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/BAER/> (USDA Forest Service (USDAFS) Agricultural Research Service (αριστερά) και Annette Parsons, USDAFS (δεξιά))

Οι μέγιστες θερμοκρασίες που επικρατούν στο έδαφος κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς ποικίλουν ανάλογα την προηγούμενη υγρασιακή κατάστασή του, το πάχος του ξηροφυλλοτάπητα και τη διάρκεια της πυρκαγιάς (DeBano, 1991). Η χωρική διαφοροποίηση αυτών των παραγόντων εξηγεί την ανομοιομορφία στον σχηματισμό του υδροφοβικού στρώματος σε καμένα εδάφη (Εικόνα 1-5). (Brock and DeBano, 1990, Scott and Van Wyk, 1990, Imeson et al., 1992)

Η ύπαρξη υδροφοβικού στρώματος δεν ταυτίζεται πάντα με το φαινόμενο της πυρκαγιάς. Έρευνα σε εδάφη που φιλοξενούν δάση από ευκαλύπτους έδειξε ότι η παρουσία του υδροφοβικού στρώματος είναι ανεξάρτητη από την επίδραση της πυρκαγιάς, σε αντίθεση με τα εδάφη από πευκοδάση που παρουσιάζουν φαινόμενα υδροφοβικότητας μόνο μετά την πυρκαγιά. (Scott, 1993)

Με τη δημιουργία του υδροφοβικού στρώματος μέσα στο έδαφος μετά από πυρκαγιά έχουν ασχοληθεί πάρα πολλοί ερευνητές (DeBano et al., 1970, Dunn and DeBano, 1977, Wells et al., 1979, DeBano, 1981, Coelho et al., 1990, McNabb and Swanson, 1990, Wallis and Horne, 1992, Imeson et al., 1992, Inbar et al., 1998, DeBano, 2000a,b, Doerr et al., 2000, Robichaud, 2000, Harper et al., 2001), ενώ αρκετοί (Scott and Van Wyk, 1990, Scott and Shulze, 1992, Scott, 1993, Prosser and Williams, 1998, Robichaud, 2000, Robichaud and Hungerford, 2000, Sheridan et al., 2001) συνέδεσαν την αύξηση της απορροής με την δημιουργία του υδροφοβικού στρώματος.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι οι δασικές πυρκαγιές επιδρούν και στις υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους, αφού με τη μείωση του πορώδους και το σχηματισμό του υδρόφοβου στρώματος μειώνεται και ο ρυθμός διήθησης του νερού μέσα στο έδαφος (DeBano, 1971, Van Dam et al., 1990). Όσον αφορά την υδραυλική αγωγιμότητα (K_s), σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην υδρολογική λεκάνη του χειμάρρου Λυκόρρεμα, του Πεντελικού όρους - πειραματική υδρολογική λεκάνη του Τομέα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του Γ.Π.Α. (Σούλης και συνεργάτες, 2007) - οι τιμές της K_s που μετρήθηκαν μετά την επίδραση της πυρκαγιάς ήταν πολύ μικρότερες από αυτές που μετρήθηκαν στις υπάρχουσες συνθήκες. Συγκεκριμένα, σε αμμοαργιλώδη εδάφη παρατηρήθηκε μείωση 72% ($K_{s,πριν} = 8,97$ cm/h και $K_{s,μετά} = 2,50$ cm/h) και σε αμμοπηλώδη παρατηρήθηκε μείωση 83% ($K_{s,πριν} = 14,80$ cm/h και $K_{s,μετά} = 2,55$ cm/h) (Σούλης και συνεργάτες, 2009). Επίσης, πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι και το κάρβουνο που δημιουργείται μετά από την πυρκαγιά, επηρεάζει τις υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους. Λεπτά σωματίδια από κάρβουνο αυξάνουν την ικανότητα συγκράτησης της υγρασίας του εδάφους και έχουν τη δυνατότητα να κάνουν αμμώδη εδάφη να συμπεριφέρονται σαν αργιλώδη (Moore, 1996).

Στο πλαίσιο της ενότητας αυτής, για την πληρότητα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, αξίζει να σημειωθεί και η αντίθετη άποψη.

Υπάρχουν έρευνες, οι οποίες υποστηρίζουν ότι οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους σπάνια επηρεάζονται από πυρκαγιές οι οποίες χαρακτηρίζονται μικρής έως μέτριας έντασης (Hudson, 1983) και στις περιπτώσεις αυτών των πυρκαγιών, ο χρόνος που απαιτείται για να επανέλθουν τα επίπεδα της απορροής σε επίπεδα που ίσχυαν πριν την εμφάνιση της πυρκαγιάς, εξαρτάται απόλυτα από τον χρόνο ανάκαμψης της φυτικής κάλυψης. Επίσης ο Imeson et al (1992) επισήμανε ότι το έδαφος περιέχει μακροπόρους, οι οποίοι σπάνια καταστρέφονται από την επίδραση πυρκαγιάς και κατά συνέπεια εμποδίζουν την δημιουργία υψηλών επιπέδων απορροής, διοχετεύοντας το νερό σε κατώτερα στρώματα παρακάμπτοντας το υδροφοβικό στρώμα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Τέλος, πρόσφατη έρευνα έδειξε ότι οι επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών – αύξηση επιφανειακής απορροής, μείωση της διηθητικής ικανότητας, κ.α - στην υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης οφείλονται αρχικά στην μείωση της βλάστησης και της εδαφοκάλυψης και έπειτα στην αύξηση της συνδεσιμότητας των περιοχών που συμβάλλουν στην απορροή παρά στην δημιουργία υδροφοβικού στρώματος, το οποίο παρουσιάζει μεγάλη χρονική

ανομοιομορφία και δυσκολία στην αποτίμησή του λόγω της βραχυπρόθεσμης μεταβολής στην δράση του (Pierson, 2008).

Εκτός από τις προαναφερθείσες επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών σε επίπεδο λεκάνης απορροής, αναφέρεται και η δραματική επίδραση των πυρκαγιών στην διάβρωση των εδαφών (Εικόνα 1-7), αποτέλεσμα τόσο της μείωσης της φυτικής κάλυψης (White and Wells, 1979, Wells, 1981, Dieckmann et al., 1992) όσο και της μεταβολής στις ιδιότητες του εδάφους (Sevink et al., 1989, Giovannini and Lucchesi, 1991, Imeson et al., 1992, Kutiel and Inbar, 1993).

Μελέτες στο Ν.Μεξικό και στην Αριζόνα έδειξαν ότι τα επίπεδα διάβρωσης αυξήθηκαν δραματικά μετά από πυρκαγιές, ενώ σε περιοχές που δεν έχουν υποστεί έντονες μεταβολές το φαινόμενο της διάβρωσης κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα (Robichaud et al., 2000, Wilson et al., 2001). Όσον αφορά τη στερεοαπορροή - η συνολική ποσότητα φερτών υλικών που διέρχονται από μια διατομή αναφοράς (π.χ διατομή ποταμού) σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Εκφράζεται σε μονάδες μάζας και πολλές φορές ανάγεται στην επιφάνεια της λεκάνης απορροής ανάντη της διατομής αναφοράς (Kirby and Morgan, 1980, Κουτσογιάννης, 1986) - μετά την εμφάνιση πυρκαγιών, σύμφωνα με τις υπάρχουσες βιβλιογραφικές αναφορές, παρουσιάζει υψηλή μεταβλητότητα ανάλογα την τοπογραφία της περιοχής (Rulli et al., 2007).

Συγκεκριμένα, ο Johansen et al. (2001) υπολόγισε στερεοαπορροή της τάξης του $75 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ μετά από την Cerro Grande πυρκαγιά σε πευκοδάσος στο Ν. Μεξικό με αναλογία μεταξύ καμένων και άκαυτων πειραματικών επιφανειών της τάξης του 25. Επίσης, ο Wilson. (1999) εξετάζοντας δασική περιοχή από ευκαλύπτους στην Τασμανία, εκτίμησε ότι μετά την πυρκαγιά η στερεοαπορροή έφθασε περίπου τα $80 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ αλλά η περιοχή που επλήγει περισσότερο από την πυρκαγιά εμφάνισε διάβρωση μόνο πέντε φορές μεγαλύτερη από την περιοχή που παρέμεινε άκαυτη. Ακόμα οι Benavides-Solorio και MacDonald (2001) μελετώντας τρεις διαφορετικές πυρκαγιές σε πευκοδάση του Κολοράντο (Colorado Front Range), εκτίμησαν ότι η διάβρωση κυμαίνεται μεταξύ 32 και $50 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, σε εκτάσεις που κήκαν από πυρκαγιές υψηλής έντασης. Υπολόγισαν επίσης ότι η διαφορά διάβρωσης μεταξύ καμένων και άκαυτων περιοχών κυμαίνεται από 10 μέχρι 26 φορές με τις καμένες περιοχές να παράγουν μεγαλύτερη ποσότητα.

Επιπλέον, έρευνες έδειξαν ότι τα επίπεδα στερεοαπορροής μεταβάλλονται ανάλογα με το χρονικό διάστημα που έχει επέλθει από την πυρκαγιά. Στις μεσογειακές περιοχές, οι έρευνες έδειξαν ότι οι εδαφικές απώλειες που προκλήθηκαν από την επίδραση πυρκαγιάς μειώθηκαν σε χρονικό διάστημα από δύο (Cerdà, 2005) έως δέκα χρόνων (Inbar, 1998). Τα αποτελέσματα αυτά είναι σύμφωνα και με έρευνες που διεξάχθηκαν και σε άλλες περιοχές (Robichaud et al., 2000). Ακόμα, ο Soto et al. (1995) κατέγραψε τη μέγιστη στερεοαπορροή τέσσερις μήνες μετά την πυρκαγιά, ενώ ο Vega et al. (2005) παρατήρησε ότι αξιοσημείωτη στερεοαπορροή εμφανίστηκε οκτώ μήνες μετά την πυρκαγιά. Τέλος, οι Cerdà and Lasanta (2005) παρατήρησαν σε δύο διαφορετικές πειραματικές επιφάνειες ότι η αιχμή της διάβρωσης εμφανίστηκε μετά από ένα και δύο χρόνια αντίστοιχα.

Άλλες μελέτες επικέντρωσαν την έρευνα τους στο χρονικό διάστημα όπου τα επίπεδα διάβρωσης επανέρχονται στις προγενέστερες συνθήκες, πριν δηλαδή την δράση της πυρκαγιάς. Ο Robichaud et al., 2000 αναφέρει 3 με 9 χρόνια μετά την πυρκαγιά, ενώ άλλοι ερευνητές 3 με 4 χρόνια (Morris and Moses, 1987, Martin and Moody, 2001) έως και 5 χρόνια (Wright and Bailey, 1982).

Τέλος, έρευνες για την επίδραση των δασικών πυρκαγιών στη διάβρωση των εδαφών, έχουν διεξαχθεί και στον ελλαδικό χώρο (Μακρής και Μαντούδη, 1997, Παπαθεοδοσίου και Χριστοδούλου, 2009)

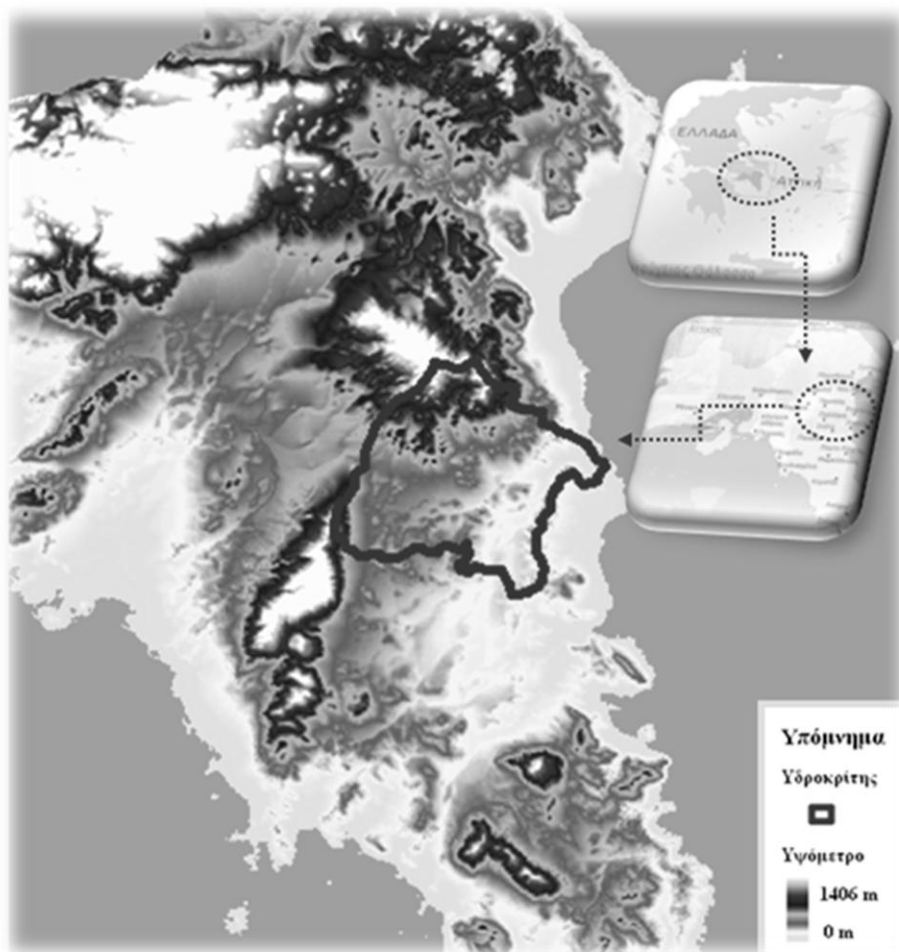


Εικόνα 1-7 Αύξηση της διαβρωσιμότητας των εδαφών (αριστερά) και πλημμύρες μετά την επίδραση πυρκαγιάς (δεξιά)

Πηγή : <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/BAER/> (John A. Moody, USGS Hydrologic and Erosional Responses of Burned Watersheds)

Κεφάλαιο 2

Περιοχή Μελέτης



2. Περιοχή Μελέτης

2.1 Επιλογή Περιοχής Μελέτης

Ανάλογα με τον σκοπό της εκάστοτε μελέτης θα πρέπει να επιλέγεται και η περιοχή μελέτης, η οποία θα πληρεί τις προϋποθέσεις για την συγκεκριμένη έρευνα. Στην παρούσα εργασία, για τον σκοπό της διερεύνησης των επιπτώσεων των δασικών πυρκαγιών στην υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών απορροής, επιλέχθηκε η λεκάνη απορροής της Ραφήνας. Συγκεκριμένα, η περιοχή του ρέματος Ραφήνας περιλαμβάνει όλη τη νότια Πεντέλη, το ΒΑ τμήμα Υμηττού και τα βόρεια Μεσόγεια μέχρι το νέο αεροδρόμιο των Σπάτων. (Εικόνα 2-2)

Στη διεθνή βιβλιογραφία, σε αντίστοιχες έρευνες η επιλογή της περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκε ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την διερεύνηση. Η πρώτη μέθοδος αναφέρεται ως “paired - watershed” και χρησιμοποιείται τόσο για πειραματικές όσο και για φυσικές πυρκαγιές. Στην πρώτη περίπτωση αναπτύσσεται μία σχέση απορροής μεταξύ των δύο λεκανών (πειραματικής και ελέγχου) πριν την εφαρμογή του πειράματος της πυρκαγιάς στην πειραματική λεκάνη, εφαρμόζοντας ομοιόμορφη βροχόπτωση πάνω από τις δύο λεκάνες. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε σε πολλές μελέτες, της Ν.Αφρικής (Rycroft, 1947, Bosch et al., 1984, 1986, Lindley et al., 1988, Scott, 1993) της Αυστραλίας (O’Loughlin et al., 1982, Ronan, 1986) και της Ευρώπης (Soler et al., 1994, Soto et al., 1994). Στη δεύτερη περίπτωση, κατά την οποία καίγεται μία λεκάνη με φυσικό τρόπο, οι μελετητές χρησιμοποιούν δεδομένα γειτονικής - άκαυτης λεκάνης, η οποία μελετάται συστηματικά, με την παραδοχή ότι οι λεκάνες λόγω της κοντινής τους απόστασης ταυτίζονται ως προς την υδρολογική τους συμπεριφορά (Campbell et al., 1977 Troendle and Bevenger, 1996). Από την άλλη πλευρά, η δεύτερη μέθοδος αναφέρεται ως “calibrated - watershed” όπου αναπτύσσεται μία εμπειρική σχέση πρόβλεψης βροχόπτωσης-απορροής στην λεκάνη που κάηκε από έναν ή περισσότερους μετεωρολογικούς, γεωλογικούς, τοπογραφικούς και υδρολογικούς παράγοντες. Αρκετές μελέτες εφάρμοσαν τη μέθοδο αυτή (Anderson and Trobitz, 1949, Settergren, 1969, Scott, 1993, Sayeeduzzaman and Weirich, 1996, McCaughey et al., 1997). Σύμφωνα όμως με πρόσφατη έρευνα καμία από τις δύο μεθόδους δεν είναι αξιόπιστη για τη μελέτη των επιπτώσεων των πυρκαγιών στην υδρολογία των λεκανών απορροής, λόγω απουσίας δεδομένων πριν την πυρκαγιά,

εκτός και αν μία λεκάνη παρακολουθείται συστηματικά για διαφορετικούς σκοπούς και σε κάποια χρονική περίοδο καταστραφεί από πυρκαγιά (Moody and Martin, 2001). Την προϋπόθεση αυτή πληρεί η περιοχή της λεκάνης απορροής της Ραφήνας, ένα μέρος της οποίας παρακολουθείται από τον Οκτώβριο του 2003 – περιοχή πειραματικής λεκάνης του Εργαστηρίου Υδρολογίας και Διαχείρισης Υδατικών πόρων (ΕΜΠ) – και το υπόλοιπο από το Νοέμβριο του 2005 -σταθμός Πεντέλης- και το Δεκέμβριο του ίδιου χρόνου -σταθμός Πικερμίου- στο πλαίσιο ανάπτυξης του δικτύου METEONET.

Επιπλέον η συγκεκριμένη περιοχή μελέτης παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον λόγω της ραγδαίας αλλαγής των χρήσεων γης της. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αύξηση του πληθυσμού στους κύριους οικισμούς που υπάγονται στη λεκάνη απορροής της Ραφήνας με αποτέλεσμα την έντονη παρουσία του φαινομένου αστικοποίησης στην περιοχή (Πιν. 2-1, Διάγραμμα 2-1). Στο φαινόμενο της αστικοποίησης συμβάλλουν και τα μεγάλα κατασκευαστικά έργα όπως είναι το αεροδρόμιο των Σπάτων και ο δρόμος της Αττικής Οδού που ενώνει την ευρύτερη περιοχή της ανατολικής Αττικής με το κέντρο των Αθηνών. Από τα παραπάνω κρίνεται ως επιτακτική ανάγκη η παρακολούθηση της υδρολογικής απόκρισης της συγκεκριμένης λεκάνης, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που πραγματοποιούνται βίαιες αλλαγές στις χρήσεις γης, όπως στην περίπτωση της πυρκαγιάς, έτσι ώστε να προβλέπονται διαχειριστικά μέτρα για την αποφυγή πλημμυρικών επεισοδίων στα κατάντη της λεκάνης όπου κατοικεί και το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού.

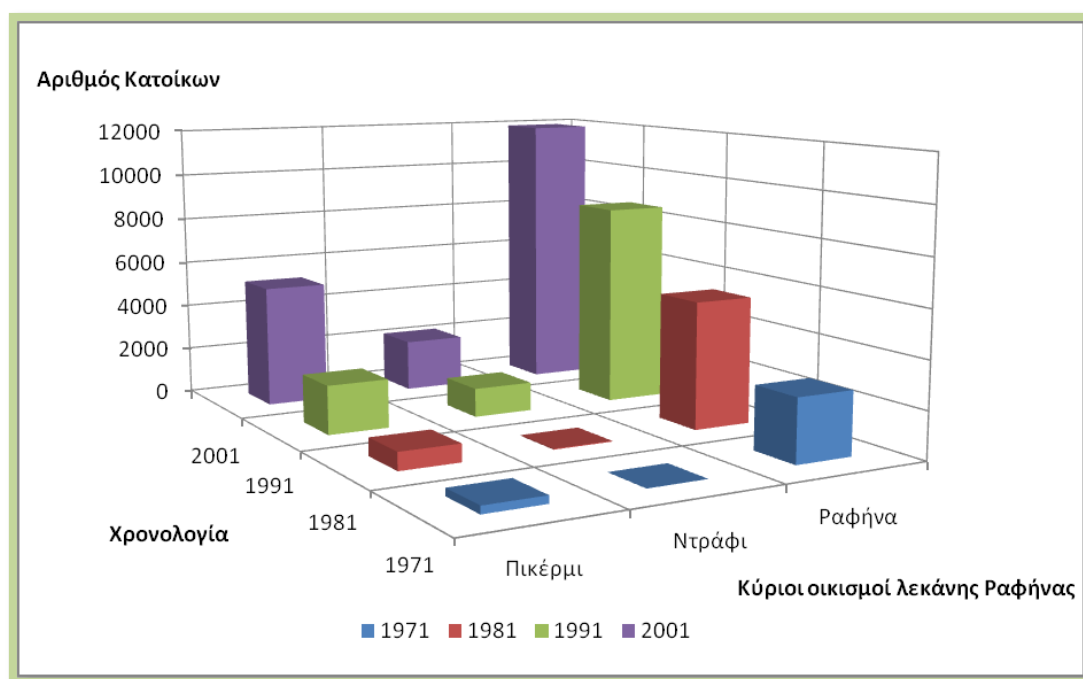
Πίνακας 2-1 Στοιχεία πληθυσμιακής ανάπτυξης για τους οικισμούς Πικέρμι, Ντράφι, Ραφήνας

Κοινότητα Πικερμίου					
Χρονολογία	Πληθυσμός (κάτοικοι)	Αύξηση πληθυσμού (%)	Αθροιστική αύξηση (%)	Απόλυτη διαφορά 1971-2001	Ποσοστιαία διαφορά 1971-2001
1961	213	-	0,00		
1971	317	48,83	48,83	4895	1544,17
1981	756	138,49	187,31		
1991	2077	174,74	362,05		
2001	5212	150,94	512,99		
2007	27069	419,36	932,35		

Κοινότητα Ντραφίου					
Χρονολογία	Πληθυσμός (κάτοικοι)	Αύξηση πληθυσμού (%)	Αθροιστική αύξηση (%)	Απόλυτη διαφορά 1971-2001	Ποσοστιαία διαφορά 1971-2001
1971	6	-	0,00	2199	36650,00
1981	37	516,67	516,67		
1991	1230	3224,32	3740,99		
2001	2205	79,27	3820,26		

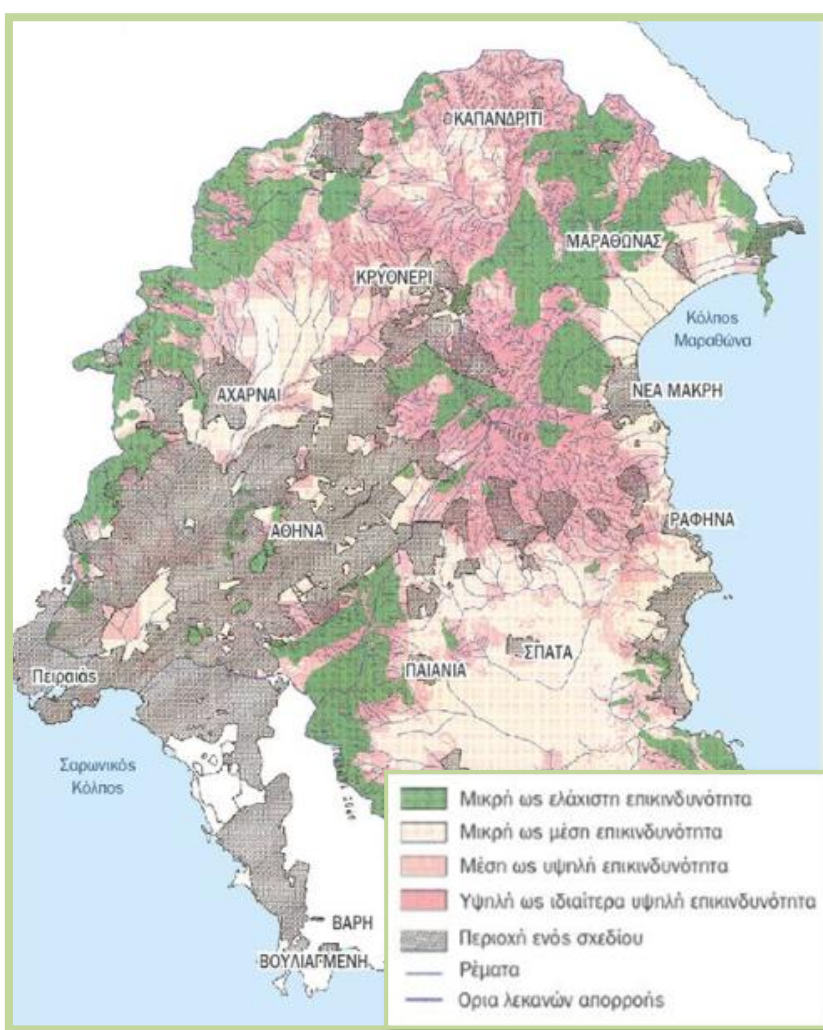
Δήμος Ραφήνας					
Χρονολογία	Πληθυσμός (κάτοικοι)	Αύξηση πληθυσμού (%)	Αθροιστική αύξηση (%)	Απόλυτη διαφορά 1971-2001	Ποσοστιαία διαφορά 1971-2001
1971	2672	-	0,00	9237	345,70
1981	5405	102,28	102,29		
1991	8611	59,32	161,60		
2001	11909	38,30	199,90		

Πηγή: ΕΣΥΕ, (μετά από επεξεργασία)



Διάγραμμα 2-1 Σχηματική απεικόνιση πληθυσμού με βάση την χρονολογία στους κύριους οικισμούς της περιοχής μελέτης (Πικέρμι, Ντράφι, Ραφήνα)

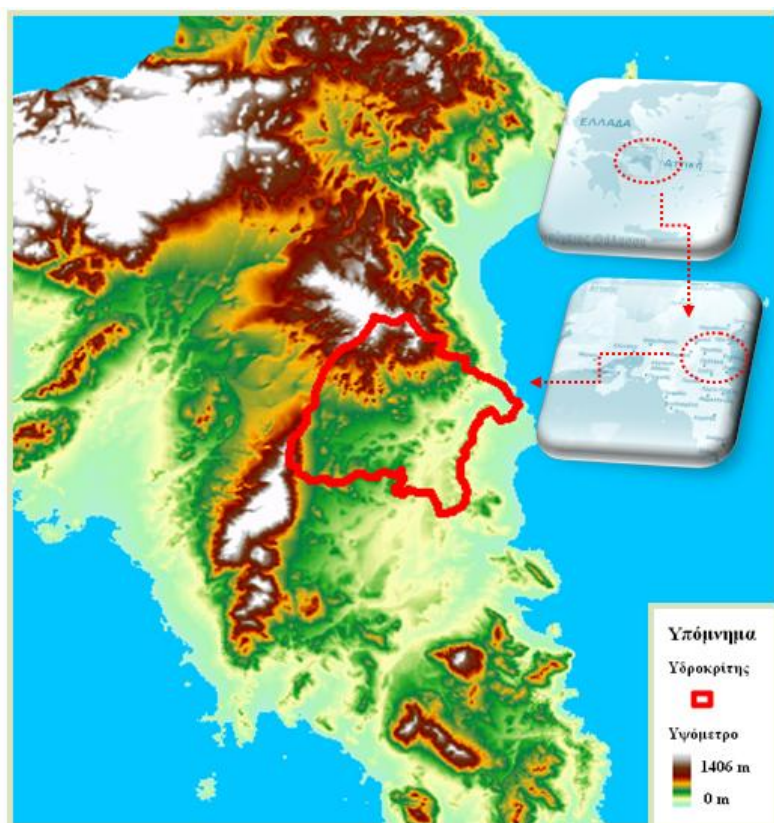
Τέλος, ο καθορισμός της λεκάνης της Ραφήνας ως περιοχή μελέτης κρίνεται απαραίτητος λόγω και της υψηλής έως ιδιαίτερα υψηλής επικινδυνότητας έναντι του κινδύνου διάβρωσης και μεταφοράς του εδαφικού υλικού σε περίπτωση απογύμνωσης του εδάφους (Μαρίνος, Π., Βαλαδάκη-Πλέσσα, Κ., Πλέσσας, Σ., 1995), όπως φαίνεται και στον παρακάτω χάρτη. Αναφορικά ο χάρτης (Εικόνα 2-1) συντάχθηκε με βάση πληροφορίες που αφορούν την σκληρότητα και την αντοχή των πετρωμάτων, την παρουσία ή όχι εδαφικού μανδύα πάνω από τα πετρώματα, τη διηθητική ικανότητα των πετρωμάτων, την υφή του υδρογραφικού δικτύου, τις κλίσεις του εδάφους κ.α δίνοντας πληροφορίες για την συμπεριφορά του εδάφους αν υποστεί εκτεταμένες πυρκαγιές, όπως συνέβη και το καλοκαίρι του 2009.



Εικόνα 2-1 Χάρτης ταξινόμησης περιοχών ανάλογα με την επικινδυνότητα διάβρωσης και μεταφοράς του εδαφικού υλικού. (Μαρίνος, Π., Βαλαδάκη-Πλέσσα, Κ., Πλέσσας, Σ., 1995)

Πηγή: <http://www.tovima.gr/default.asp?pid=2&artid=286982&ct=1&dt=06/09/2009#ixzz1BzhS3spZ>

2.2 Λεκάνη απορροής Ραφήνας

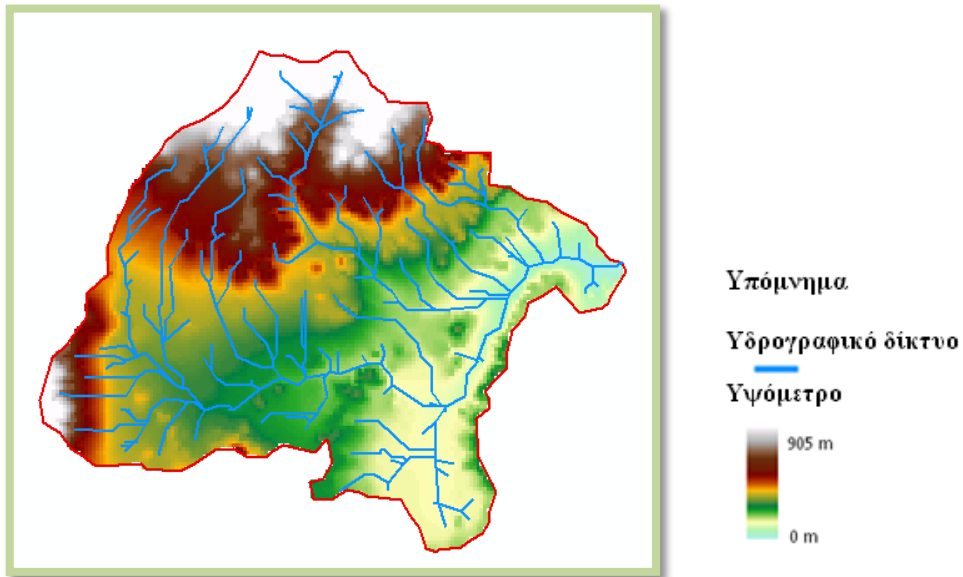


Εικόνα 2-2 Θέση λεκάνης απορροής Ραφήνας

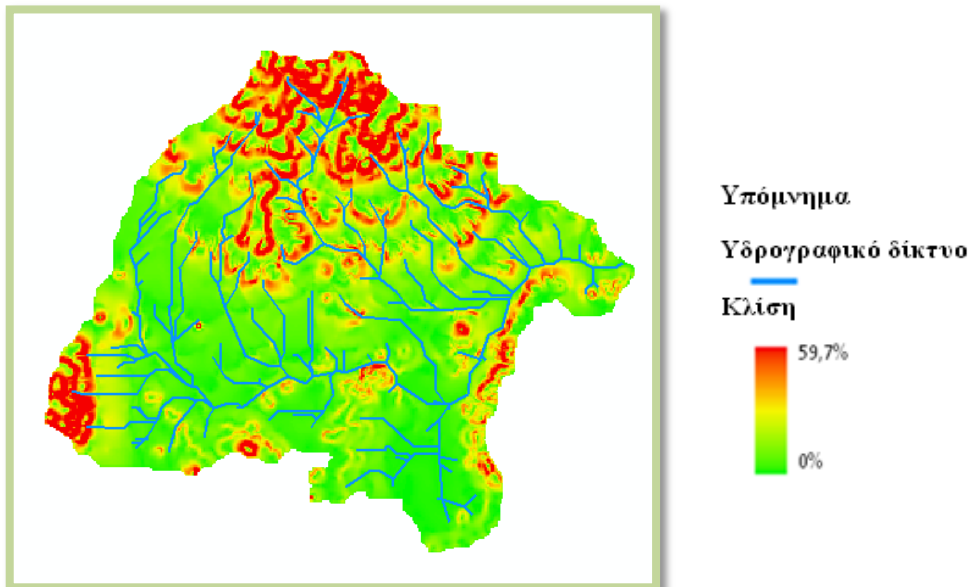
2.2.1 Γεωμορφολογία

Η λεκάνη απορροής του ρέματος της Ραφήνας έχει έκταση 127 km² και οριοθετείται στα βόρεια και βορειοανατολικά από το Πεντελικό όρος (905 m), στα δυτικά και νοτιοδυτικά από τον Υμηττό (728 m) και στα νότια από λόφους μικρού υψόμετρου, Μπούρα (300 m) και Πετροκορφή (167 m). Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης είναι 222 m με μέγιστο και ελάχιστο υψόμετρο 905 m με 0 m αντίστοιχα. Επιπλέον, η κλίση του εδάφους κυμαίνεται μεταξύ 0% και 59,7%, με μέση κλίση 9,48% (Εικόνα 2-3). Όσον αφορά την κεντρική κοίτη του ρέματος, έχει μήκος 25,3 km και διεύθυνση ροής στο ορεινό τμήμα από βόρεια προς νότια, ενώ στη συνέχεια ρέει από δυτικά-νοτιοδυτικά προς τα ανατολικά-βορειοανατολικά εκβάλλοντας στο νότιο Ευβοϊκό κόλπο. Οι κύριοι παραπόταμοί του είναι τα ρέματα Αγ.Παρασκευή, Λυκόρεμα και Νέου Βουτζά που αποστραγγίζουν τις νότιες πλαγιές του Πεντελικού όρους. Αναφορικά με το υδρογραφικό δίκτυο, όπως φαίνεται και στο σχήμα παρουσιάζει

ασυμμετρία ως προς την ανάπτυξή του. Αναλυτικότερα, η κύρια ανάπτυξη του είναι βόρεια της κεντρικής κοίτης ενώ νότια αυτής υπάρχουν λιγιστοί κλάδοι. Επιπλέον, παρουσιάζει ανωμαλία ως προς τη διαδοχική κατά τάξη απορροής των κλάδων του και μεγάλες κλίσεις των ρεμάτων του. Τα παραπάνω δύο γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά αποτελούν τη φυσική αιτία ενδεχόμενης εκδήλωσης πλημμυρών στα κατάντη του ρ.Ραφήνας (Καρύμπαλης, 2005).



(α)



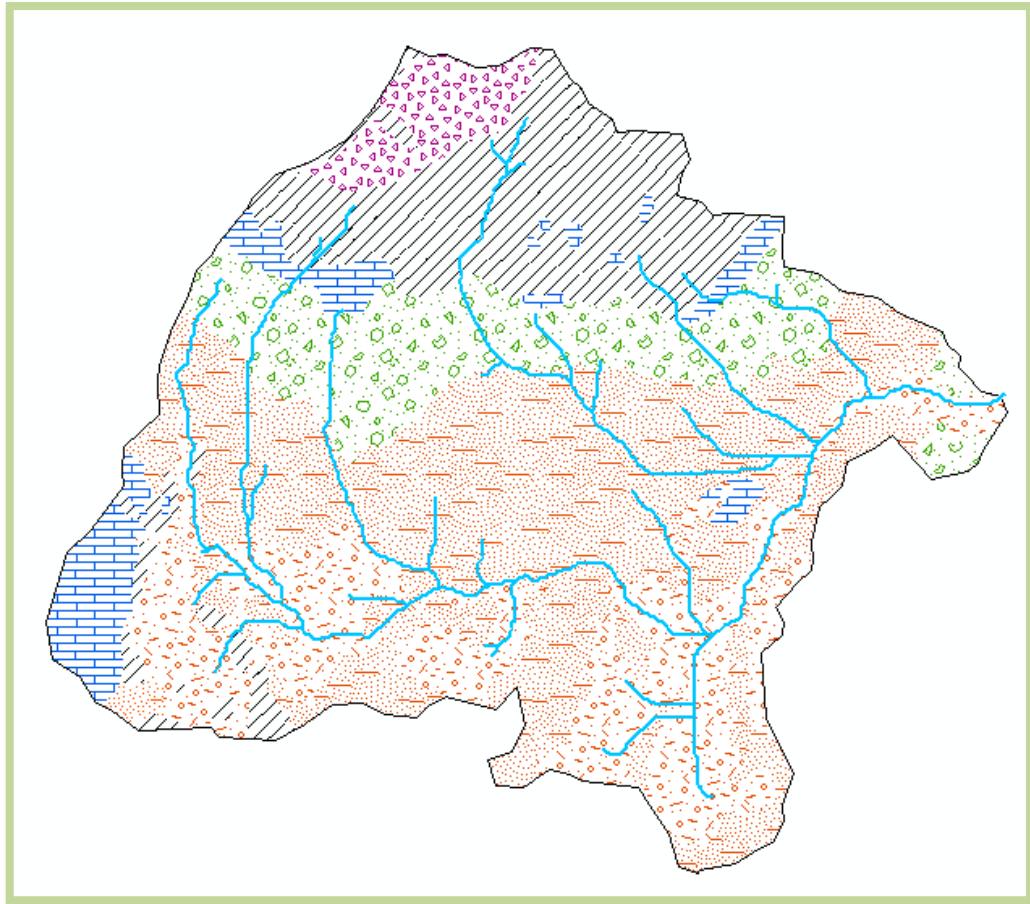
(β)

Εικόνα 2-3 Απεικόνιση του καννάβου (α) υψομέτρου (β) κλίσεων και του υδρογραφικού δικτύου

2.2.2 Γεωλογία




Η λεκάνη απορροής της Ραφήνας δομείται από τους σχηματισμούς της αυτόχθονης ενότητας Αλμυροπόταμου – Αττικής και ένα σημαντικό τμήμα της καταλαμβάνεται από Άνω-Μειοκαινικές αποθέσεις (Εικόνα 2-4). Συγκεκριμένα στο βόρειο τμήμα αναπτύσσονται οι σχιστολιθικοί σχηματισμοί της βορειοανατολικής Αττικής ηλικίας Κατωτέρου-Μέσου Τριαδικού και οι γνεύσιοι (μοσχοβιτικοί-αμφιβολιτικοί), που ανήκουν στην αυτόχθονη ενότητα Αλμυροπόταμου Αττικής καθώς και μικρές εμφανίσεις μαρμάρων της ίδιας ενότητας. Νοτιότερα στις παρυφές του Πεντελικού όρους, αναπτύσσονται Άνω-Μειοκαινικά κροκαλολατυποπαγή που αποτελούν αποθέσεις παλαιών αλλουβιακών κώνων και ριπιδίων. Οι αποθέσεις αυτές μεταβαίνουν σε λιμναίους σχηματισμούς (μάργες, αμμούχοι άργιλοι και πηλοί) ηλικίας Ανωτέρου Μειοκαίνου που περιέχουν την περίφημη Πικερμική πανίδα και καταλαμβάνουν το νότιο τμήμα της λεκάνης. Δυτικά, στην περιοχή του Υμηττού υπάρχει μια εμφάνιση μαρμάρων ηλικίας Μεσοζωϊκού-Μ.Ηωκαίνου της ενότητας Αττικής. Τέλος κατά θέσεις εκατέρωθεν της κύριας κοίτης του Μεγάλου Ρέματος, αναπτύσσονται Ολοκαινικές αλλουβιακές ποταμοχειμάρριες αποθέσεις (Καρύμπαλης, 2005).

Επισημαίνεται ότι οι σχιστολιθικοί σχηματισμοί στην περιοχή της λεκάνης έχουν υποστεί έντονη τεκτονική καταπόνηση και ρωγμάτωση με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν αυξημένη υδατοπερατότητα. Τεκτονικά καταπονημένο και καρστικοποιημένο παρουσιάζεται και το ενδιάμεσο μάρμαρο όπου πιθανότατα τροφοδοτείται από την επιφάνεια μέσω ζωνών διάρρηξης των σχιστόλιθων.(PhD. Σούλης, Κ., 2009)






Εικόνα 2-4 Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης
 Πηγή: Πρωτογενής χάρτης (ΙΓΜΕ, Δρ.Παπαδέας)

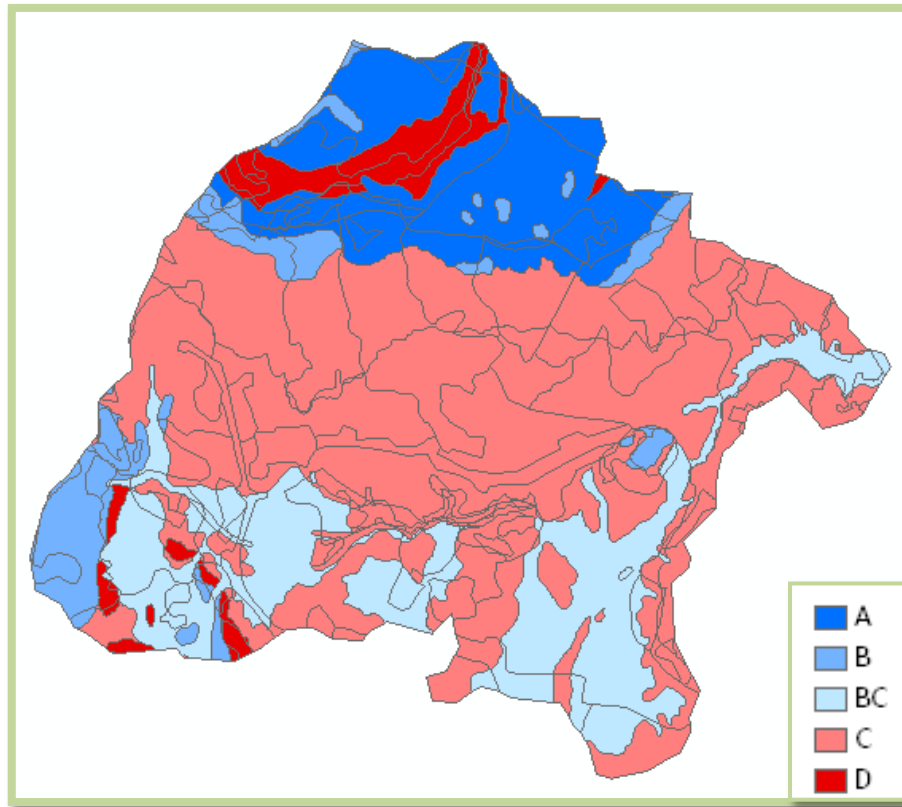
Υπόμνημα

-  Ποταμοχειμάρριες αποθέσεις (Ολόκαινο)
-  Κροκαλολατυποπαγείς σχηματισμοί (Αν. Μειόκαινο)
-  Λιμναίοι σχηματισμοί - μάργες, αμμούχοι άργιλοι, πηλός, κ.α - (Αν.Μειόκαινο)

Αυτόχθονη Ενότητα Αλμυροπόταμου Αττικής

-  Μάρμαρα ΒορειοΑνατολικής Αττικής (Μεσοζωϊκό – Μ. Ηώκαινο)
-  Μοσχοβιτικοί-αμφιβολιτικοί γενεύσιοι
-  Σχιστολιθικοί σχηματισμοί ΒορειοΑνατολικής Αττικής (Κ. – Μ. Τριαδικό)

Σύμφωνα με τον παραπάνω γεωλογικό χάρτη διαμορφώθηκαν οι τιμές της υδροπερατότητας των εδαφών στην περιοχή μελέτης (Κασσελά, Α., 2011)(Εικόνα 2-5)



Εικόνα 2-5 Ομάδες υδροπερατότητας εδαφών της υπό μελέτη περιοχής

Λόγω του ασαφούς διαχωρισμού των γεωλογικών και εδαφικών χαρακτηριστικών της περιοχής, διαμορφώθηκε μια πέμπτη κατηγορία υδροπερατότητας (BC), που ουσιαστικά παρουσιάζει κοινές ιδιότητες τόσο με την B όσο και με την κατηγορία C. (Κασσελά, Α., 2011)

2.2.3 Κλίμα

Το κλίμα στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, όπως και γενικά της ανατολικής Ελλάδας, είναι τυπικά ξηρό μεσογειακό, με ήπιους και υγρούς χειμώνες, σχετικά θερμά και ξηρά καλοκαίρια και, γενικά, μακρές περιόδους ηλιοφάνειας κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους. Η μέση υπερετήσια τιμή της βροχοπτώσης στην Αττική σύμφωνα με μετρήσεις της ΕΜΥ για τους σταθμούς Φιλαδέλφεια, Ελληνικό και Ελευσίνα είναι 414,1 mm, 364,8 mm και 372,9 mm αντίστοιχα (PhD. Σούλης, Κ., 2009)

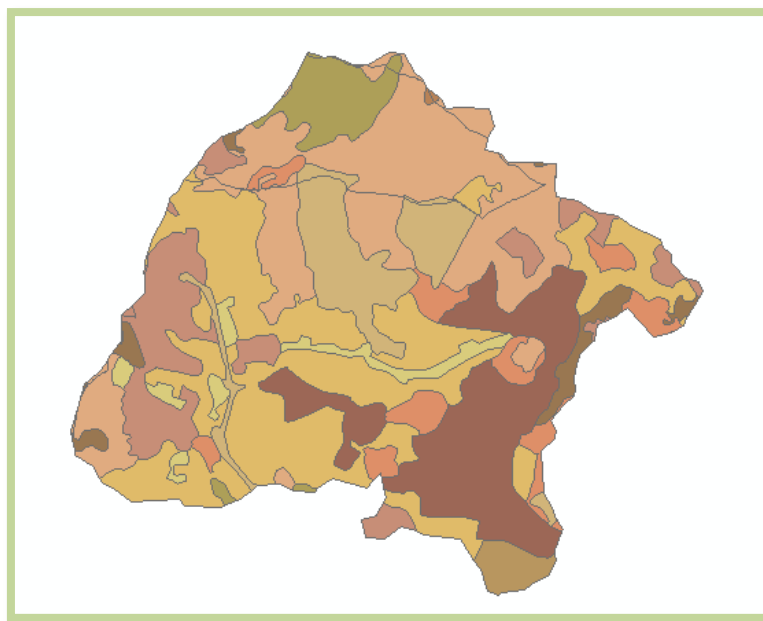
Η κατανομή των βροχοπτώσεων ακολουθεί τα χαρακτηριστικά των ξηρών περιοχών της Ελλάδας, με το μεγαλύτερο μέρος των βροχοπτώσεων να παρατηρούνται την υγρή περίοδο υπό τη μορφή ισχυρών καταιγίδων. Έντονες καταιγίδες παρατηρούνται ακόμα και την περίοδο του καλοκαιριού και χαρακτηρίζονται από μικρή διάρκεια, μεγάλες εντάσεις και πολύ μεγάλη χωρική ανομοιομορφία.

Σε ότι αφορά στις θερμοκρασίες, σύμφωνα πάλι με τις μετρήσεις της ΕΜΥ από το σταθμό Φιλαδέλφεια, ο οποίος είναι ο πλησιέστερος στην περιοχή της λεκάνης, η μέση ελάχιστη θερμοκρασία είναι 5.2 °C και παρουσιάζεται τον Ιανουάριο, ενώ η μέση μέγιστη θερμοκρασία είναι 33.5 °C και παρουσιάζεται τον Ιούλιο (PhD. Σούλης, Κ., 2009).

2.2.4 Κάλυψη γης

Το είδος της κάλυψης της λεκάνης έχει ιδιαίτερη επίδραση στην υδρολογική της συμπεριφορά. Ομαδοποιώντας τις χρήσεις γης σε τρεις κατηγορίες - δασική, καλλιεργήσιμη, αστική - η λεκάνη καλύπτεται κυρίως από καλλιεργήσιμες εκτάσεις με ποσοστό κάλυψης περίπου 50% και ακολουθούν οι δασικές και οι αστικές με ποσοστό 30% και 20% αντίστοιχα. Αναλυτικές πληροφορίες για την κάλυψη της υδρολογικής λεκάνης παρατίθενται στον πίν. 2-2 και στην εικόνα 2-6.

Αναφορικά με τις δασικές εκτάσεις, τα τελευταία είκοσι χρόνια παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές στο είδος της κάλυψής τους. Παλαιότερα καλύπτονταν από πυκνό πευκοδάσος το οποίο όμως καταστράφηκε από τη μεγάλη πυρκαγιά του 1995. Στην εικόνα 2-7 απεικονίζεται φωτογραφικά η κάλυψη της υδρολογικής λεκάνης πριν από την πυρκαγιά του Αυγούστου του 1995.



- Αεροδρόμια
- Αμπελώνες
- Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες
- Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης
- Δάσος κωνοφόρων
- Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση
- Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις
- Σκληροφυλλική βλάστηση
- Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας
- Φυσικοί βοσκότοποι
- Χώροι οικοδόμησης

Εικόνα 2-6 Κάνναβος με τις χρήσεις γης από Corine 2000 της περιοχής μελέτης

Πίνακας 2-2 Κατηγορίες κάλυψης γης

Κατηγορία κάλυψης γης	Έκταση (Km ²)	Ποσοστό Κάλυψης (%)
Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	12,47	9,82
Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	3,30	2,60
Αεροδρόμια	1,92	1,51
Χώροι οικοδόμησης	11,03	8,68
Αμπελώνες	18,94	14,91
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	35,33	27,82
Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	7,01	5,52
Δάσος κωνοφόρων	2,94	2,31
Φυσικοί βοσκότοποι	0,10	0,08
Σκληροφυλλική βλάστηση	5,34	4,20
Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	28,23	22,23
Σύνολο	127,00	100,00



Εικόνα 2-7 Κάλυψη των δασικών εκτάσεων πριν από την πυρκαγιά του 1995

Πηγή: Διδακτορική διατριβή Σούλης Κ., 2009

Μετά την πυρκαγιά του 1995 ακολούθησε αναγέννηση του δάσους με φυσικό τρόπο αλλά και με αναδάσωση (Εικόνα 2-8), και η καταστροφή του πάλι από την πρόσφατη πυρκαγιά του 2009 (Εικόνα 2-9).



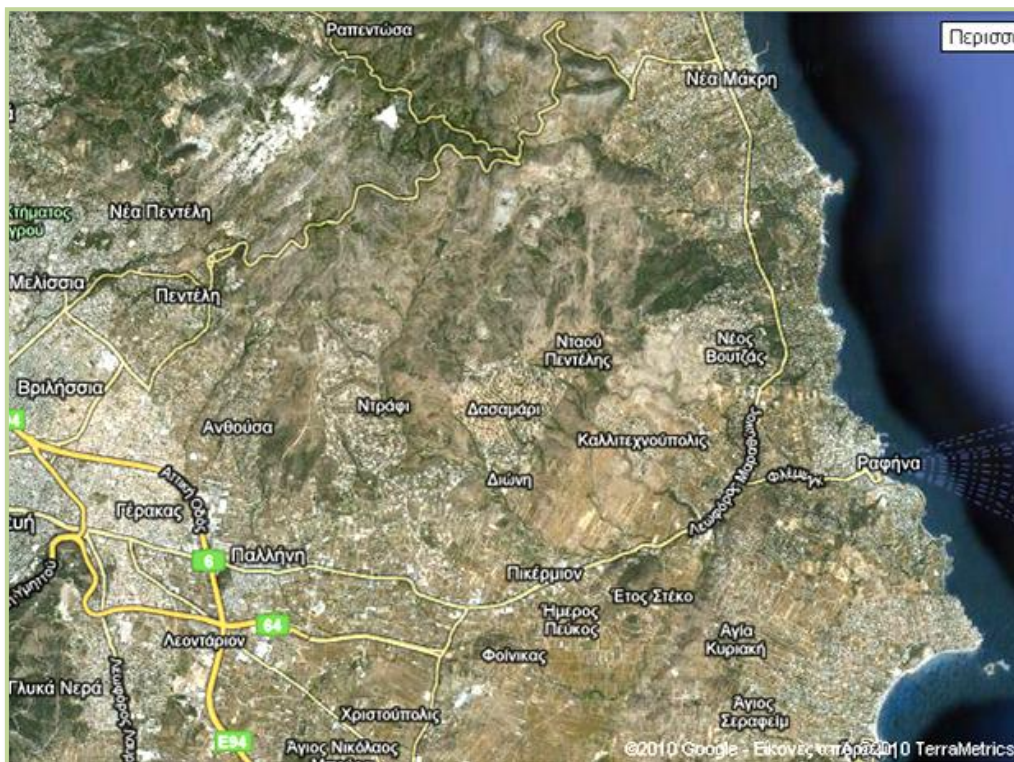
Εικόνα 2-8 Αναγέννηση δάσους

Πηγή: Διδακτορική διατριβή Σούλης Κ., 2009



Εικόνα 2-9 Καταστροφή φυτικής κάλυψης μετά την πυρκαγιά του 2009

Όσον αφορά τις υπόλοιπες χρήσεις γης, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σε μεγάλο βαθμό αύξηση των αστικών και εγκατάλειψη των καλλιεργήσιμων εκτάσεων (Εικόνα 2-10)



Εικόνα 2-10 Απεικόνιση αστικών ζωνών-οικισμών στην περιοχή μελέτης

Πηγή: Google maps, 2010

2.3 Εξοπλισμός περιοχής μελέτης

2.3.1 Εξοπλισμός πειραματικής λεκάνης

Η Πειραματική υδρολογική λεκάνη βρίσκεται στο νομό Αττικής. Το βόρειο τμήμα της, ανήκει στο Δήμο Πεντέλης και χαρακτηρίζεται από μεγάλες κλίσεις. Το νότιο τμήμα της, ανήκει στο Δήμο Πικερμίου και παρουσιάζει ήπιες κλίσεις, αραιοκατοίκηση και ένα μικρό ποσοστό βλάστησης κυρίως κοντά στην έξοδο της λεκάνης. Τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης είναι: έκταση 15.18 km², μέσο υψόμετρο 430 m, με ελάχιστο και μέγιστο υψόμετρο τα 146 m και 950 m αντίστοιχα (www.chi.civil.ntua.gr).

Ο εγκατεστημένος εξοπλισμός αποτελείται από δύο υδρομετρικούς σταθμούς, στην έξοδο και στο κέντρο βάρους της λεκάνης, καθώς και από ένα βροχομετρικό δίκτυο υψηλής πυκνότητας. Συγκεκριμένα, ο υδρομετρικός σταθμός στην έξοδο (Εικόνα 2-11) περιλαμβάνει σταθμήμετρο και σταθμηγράφο για τη συνεχή καταγραφή της στάθμης, καθώς και όργανα καταγραφής της θερμοκρασίας του νερού και του αέρα, ενώ η μέτρηση της παροχής γίνεται με μυλίσκο. Επιπλέον, ο υδρομετρικός σταθμός στο κέντρο βάρους αποτελείται από έναν υπερχειλιστή και ένα σταθμηγράφο. Όσον αφορά το βροχομετρικό δίκτυο αποτελείται από τρεις βροχογράφους στις θέσεις Ντράφι, Αγ.Νικόλαος, Διάβαση Μπάλας, οι οποίοι είναι κατάλληλα διατεταγμένοι, ώστε να δίνουν την πλήρη εικόνα της βροχής για όλη τη λεκάνη (Εικόνα 2-12,13). Τέλος, η συχνότητα καταγραφής όλων των οργάνων είναι δέκα λεπτά.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από όλα τα παραπάνω όργανα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο βροχογράφος στη θέση Ντράφι καταστράφηκε από την πρόσφατη πυρκαγιά τον Αύγουστο του 2009.

2.3.2 Εξοπλισμός METEONET

Το Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ έχει αναπτύξει ένα εκτεταμένο αυτόματο δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών στην Αττική (METEONET)(Εικόνα). Οι σταθμοί του δικτύου διαθέτουν κατάλληλο εξοπλισμό για τη μέτρηση όλων των βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων.

Οι θέσεις των σταθμών έχουν επιλεγεί, έτσι ώστε να καταγράφεται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο η ατμοσφαιρική κατάσταση της περιοχής τόσο χωρικά όσο και χρονικά καθώς και να υποστηρίζεται η πρόγνωση ακραίων γεγονότων. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται, αναλύονται και επεξεργάζονται με την εφαρμογή κατάλληλου λογισμικού καταχωρούνται σε βάση δεδομένων και κατόπιν είναι προσβάσιμες μέσω του διαδικτύου.

Οι σταθμοί είναι κατάλληλα εξοπλισμένοι για την αυτόματη μέτρηση ανά δεκάλεπτο των ακόλουθων παραμέτρων:

- Βροχόπτωση
- Θερμοκρασία (μέγιστη, μέση, ελάχιστη)
- Σχετική Υγρασία
- Ταχύτητα, διεύθυνση και ριπή ανέμου
- Ηλιακή ακτινοβολία
- Καθαρή ακτινοβολία
- Διάρκεια ηλιοφάνειας

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα δύο σταθμών του δικτύου METEONET, Πικερμίου και Πεντέλης λόγω της θέσης τους μέσα και κοντά στα όρια της υπό μελέτη περιοχής αντίστοιχα.



Εικόνα 2-11 Θέση υδρομέτρησης στην έξοδο της πειραματικής λεκάνης – Σταθμηγράφος

Πηγή: www.chi.civil.ntua.gr (μετά από επεξεργασία)



Εικόνα 2-12 Θέση βροχογράφου – εσωτερικό βροχογράφου

Πηγή: www.chi.civil.ntua.gr – Προσωπικό αρχείο



Εικόνα 2-13 Θέσεις σταθμών δικτύου METEONET

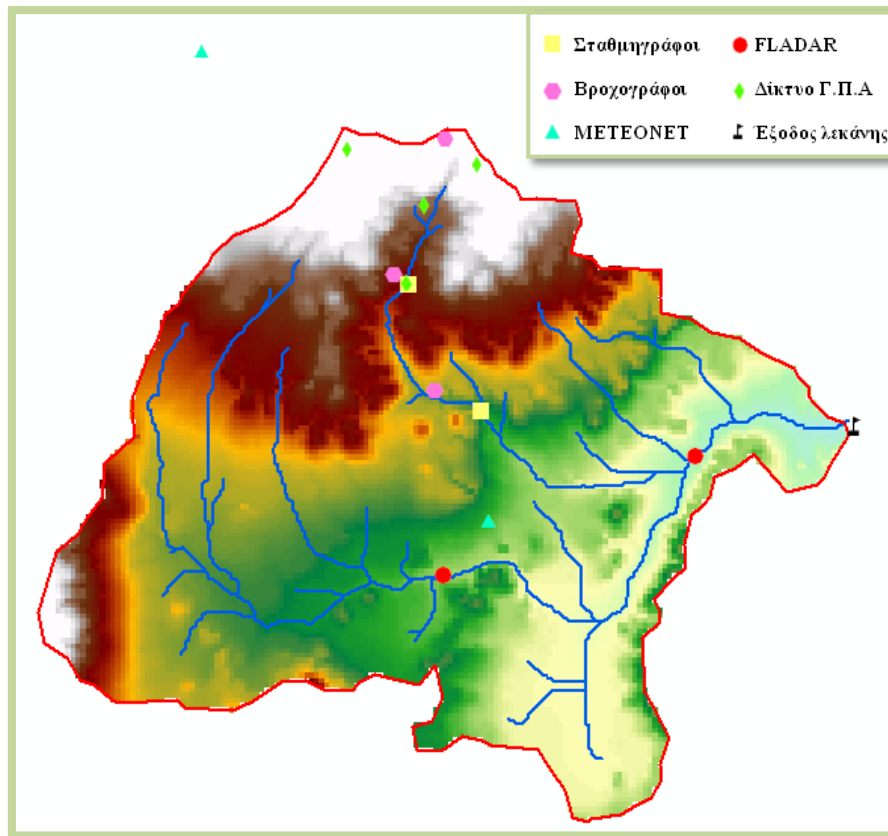
Πηγή: <http://meteonet.chi.civil.ntua.gr/wk/main/splash>

2.3.3 Εξοπλισμός FLADAR

Στο πλαίσιο υλοποίησης του ερευνητικού προγράμματος FLADAR από το Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων (ΕΜΠ) έχοντας ως στόχο την πληρέστερη καταγραφή των απορροών στην περιοχή μελέτης εγκαταστάθηκαν από το 2008 δύο σταθμηγράφοι κατάντη της πειραματικής λεκάνης στις θέσεις Πικέρμι και Ραφήνα. Χρησιμοποιήθηκαν χρονοσειρές απορροής και από τα δύο όργανα στην παρούσα διπλωματική εργασία.

2.3.3.1 Εξοπλισμός άλλων φορέων

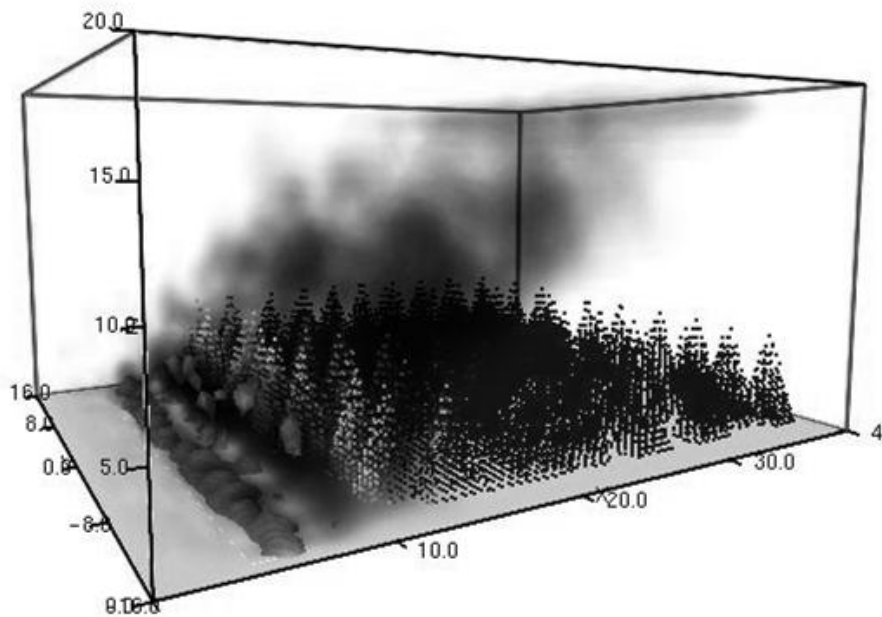
Στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης είναι εγκατεστημένοι μετεωρολογικοί σταθμοί και άλλων φορέων (Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών)(Εικόνα 2-13). Οι σταθμοί αυτοί παρέχουν τη δυνατότητα συγκριτικών μελετών, εξασφαλίζουν την αδιάλειπτη συλλογή δεδομένων και επιτρέπουν τη συστηματικότερη εκτίμηση της συσχέτισης των μετεωρολογικών παρατηρήσεων με τη θέση και το υψόμετρο.



Εικόνα 2-14 Θέσεις εγκατεστημένου εξοπλισμού Εργαστηρίου Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων (ΕΜΠ) και Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής (ΓΠΑ)

Κεφάλαιο 3

Μοντέλα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών



3. Μοντέλα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών

3.1 Μοντέλα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών

Τις τελευταίες δεκαετίες, δεδομένου ότι μία πυρκαγιά έχει καταστρεπτικά αποτελέσματα στο περιβάλλον, στην ανθρώπινη ζωή και στην ιδιοκτησία αγροτικών και αστικών περιοχών, δημιουργήθηκαν διάφορα μοντέλα καθορισμού των χρονικών και χωρικών μεταβολών της διάδοσης και συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς. Τα πολλαπλά αυτά μοντέλα διαφέρουν μεταξύ τους τόσο ως προς τις αρχές δημιουργίας τους (εμπειρικά, ημι-εμπειρικά, στατιστικά, φυσικά κ.α.) όσο και ως προς τις συνθήκες και δυνατότητες εφαρμογής τους. Τα πιο ευρέως διαδεδομένα και διεθνώς αποδεκτά μοντέλα, όπως τα BEHAVEPlus και FARSITE, βασίζονται στην πρότυπη εξίσωση πρόβλεψης διάδοσης πυρκαγιάς του Rothermel (Rothermel, 1972) και περιγράφουν τη διάδοση και συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις της καύσιμης ύλης, της τοπογραφίας και των μετεωρολογικών συνθηκών.

3.1.1 BEHAVE Plus



Το σύστημα πρόβλεψης συμπεριφοράς πυρκαγιάς και μοντελοποίησης της καύσιμης ύλης BEHAVE είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα που αποτελείται από μία συλλογή μαθηματικών μοντέλων (αλγορίθμων) που περιγράφουν τη φωτιά και το περιβάλλον της και χρησιμοποιείται κυρίως για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς με σκοπό τη διαχείρισή της (Andrews, 1986, Rothermel, 1972, Rothermel, 1991). Το σύστημα BEHAVE Plus, ως βελτιωμένη εξέλιξη του BEHAVE, είναι ένα πρόγραμμα φιλικό προς το χρήστη το οποίο επιτρέπει τόσο τη δημιουργία μοντέλου καύσιμης ύλης σε μία συγκεκριμένη θέση, όσο και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς, λαμβάνοντας υπόψη την καύσιμη ύλη, την τοπογραφία και τις μετεωρολογικές συνθήκες (Andrews et al., 2005).

Η ακρίβεια των προβλέψεων συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς από το BEHAVE Plus εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων που δίδονται σε αυτό. Στα δεδομένα αυτά βασίζονται οι υπολογισμοί του ημι-εμπειρικού μοντέλου διάδοσης επιφανειακών πυρκαγιών του Rothermel (Rothermel, 1972).

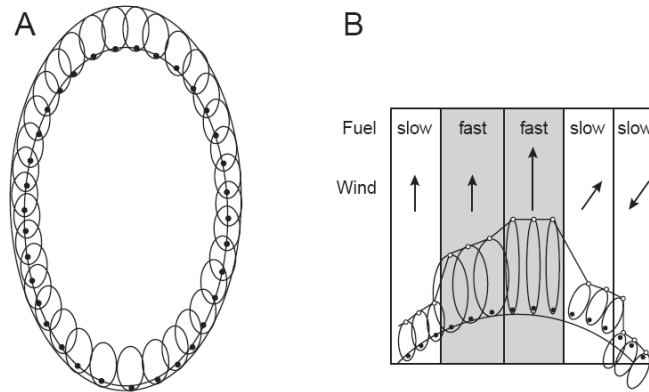
Το σύστημα BEHAVE Plus δίνει την δυνατότητα επιλογής ανάμεσα στα αυθεντικά δεκατρία (13) πρότυπα Μοντέλα Καύσιμης Ύλης (βλ. παράρτημα) και τα σαράντα (40) πρόσφατα σχεδιασμένα πρότυπα Μοντέλα Καύσιμης Ύλης (βλ παράρτημα). Το καθένα από αυτά τα Μοντέλα Καύσιμης Ύλης (M.K.Y.) έχει σχεδιαστεί για να τυποποιήσει και να ποσοτικοποιήσει μία πληθώρα παραμέτρων της καύσιμης ύλης που απαντώνται ευρέως στις ΗΠΑ.

3.1.2 FARSITE



Το FARSITE (Fire Area Simulator) είναι ένα από τα κύρια συστήματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς που αναπτύχθηκε την τελευταία δεκαετία για να περιγράψει τη εξάπλωση και τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών στο χώρο. Το μοντέλο εξάπλωσης πυρκαγιάς FARSITE υπολογίζει ένταση πυρκαγιάς και ταχύτητα εξάπλωσης για πολυάριθμα σημεία κατά μήκος του τοπίου χρησιμοποιώντας το μοντέλο πυρικής συμπεριφοράς του Rothermel (1972), ενώ η εξέλιξη της φωτιάς χωρικά προσομοιώνεται ως ελλειπτικό κύμα διάδοσης σύμφωνα με την Αρχή Huygens. Η Αρχή του Huygens ουσιαστικά δηλώνει ότι ένα κύμα μπορεί να μεταδοθεί από πολλά σημεία στην άκρη του, τα οποία συμπεριφέρονται ως ανεξάρτητες πηγές μικρότερων κυμάτων (Εικόνα 3-1) (Finney, 1998). Το πρόγραμμα FARSITE ενώνει όλα αυτά τα σημεία στην άκρη των μικρών κυμάτων για να καθορίσει το μέτωπο της πυρκαγιάς.

Αναφορικά με τις επικόρυφες πυρκαγιές, το FARSITE συνδυάζει το μοντέλο του Rothermel (1972, 1991) με τα κριτήρια πυρκαγιάς κόμης του Van Wangner (1977, 1993) για την προσομοίωση μετάβασης επιφανειακής πυρκαγιάς σε επικόρυφη και χρησιμοποιεί το μοντέλο του Albin (1979) για την προσομοίωση της απόστασης που πετάγονται οι καύτρες (Finney and Andrews, 1999)



Εικόνα 3-1 Απεικόνιση της αρχής του Huygens χρησιμοποιώντας μικρά ελλειπτικά κύματα

- (α) σε σταθερές συνθήκες χρησιμοποιούνται μικρά κύματα σταθερού σχήματος και μεγέθους για να διατηρηθεί το ελλειπτικό σχήμα της φωτιάς στο χρόνο,
- (β) σε μεταβαλλόμενες συνθήκες φαίνεται η εξάρτηση του μεγέθους του μικρού κύματος από το μοντέλο καύσιμης ύλης και την επιρροή που ασκεί το διάνυσμα άνεμος-κλίση στο σχήμα και τον προσανατολισμό του κύματος

Πηγή: Finney, 1998

Απαιτούμενα δεδομένα για την προσομοίωση πυρκαγιάς στο χωροχρονικό μοντέλο FARSITE είναι παράγοντες όπως η τοπογραφία, χαρακτηριστικά καύσιμης ύλης και καιρικές συνθήκες. Τα μοντέλα καύσιμης ύλης και η τοπογραφία επιβάλλεται να εισέρχονται στο σύστημα ως χωρικά δεδομένα, ενώ οι μετεωρολογικές συνθήκες (ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, βροχόπτωση, νεφοκάλυψη κ.α) ως ποσοτικές τιμές σε τακτά χρονικά διαστήματα. Τα χωρικά δεδομένα θα πρέπει να είναι σε μορφή ASCII, μέσω του προγράμματος ArcGIS και να έχουν το ίδιο ακριβώς μέγεθος (ίδιο αριθμό γραμμών και στηλών) ώστε να επικαλύπτονται πλήρως.

Αναφορικά με την καύσιμη ύλη εισάγονται χωρικά δεδομένα των μοντέλων καύσιμης ύλης που αντιπροσωπεύουν καλύτερα τα συμπλέγματα βλάστησης της περιοχής μελέτης. Τα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης μπορούν να εισαχθούν στο μοντέλο χρησιμοποιώντας είτε ένα από τα πρότυπα μοντέλα καύσιμης ύλης (βλ.παραρτήμα) είτε κάποιο δημιουργημένο τοπικό M.K.Y. (Custom Fuel Model). Στο σύστημα FARSITE είναι ενσωματωμένο το πρόγραμμα BEHAVE Plus, στο σημείο που αφορά την καύσιμη ύλη.

3.2 Επιλογή Μοντέλου Προσομοίωσης πυρκαγιάς

Το BEHAVE Plus και το FARSITE είναι δύο ευρέως διαδεδομένα εργαλεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την στατική και για την χωρική προσομοίωση της συμπεριφοράς και εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς αντίστοιχα. Η ευρεία εξάπλωση τους οφείλεται, εκτός από την αξιοπιστία τους, και στο ότι διατίθενται ελεύθερα στο διαδίκτυο (<http://www.firemodels.org/>). Τα συγκεκριμένα μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί και σε πρόσφατες μελέτες στον ελληνικό χώρο (Ph.D. Βασιλάκος, Χ., 2007, MSc. Τσαρούχη, Γ.Μ., 2010), αντιστοιχίζοντας τις χρήσεις γης της εκάστοτε περιοχής με τα πρότυπα μοντέλα καύσιμης ύλης που περιέχονται στο BEHAVE. Όπως προαναφέρθηκε το σύστημα BEHAVE περιέχει τα αυθεντικά δεκατρία πρότυπα (βλ. παράρτημα) και τα σαράντα πρόσφατα σχεδιασμένα πρότυπα Μοντέλα Καύσιμης Ύλης (βλ παράρτημα) τα οποία έχουν σχεδιαστεί για να τυποποιήσουν και να ποσοτικοποιήσουν μία πληθώρα παραμέτρων καύσιμης ύλης που απαντώνται στις ΗΠΑ. Με δεδομένο ότι η μοντελοποίηση της καύσιμης ύλης είναι μια πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία που απαιτεί λεπτομερή ταξινόμηση της καύσιμης ύλης, μέτρηση των διαφόρων φυσικοχημικών ιδιοτήτων που την χαρακτηρίζουν στο πεδίο, ποσοτική εκτίμηση και μεθοδικότητα προκειμένου να μελετηθεί σε βάθος (Keane et al., 2001), η απουσία τοπικών μοντέλων καθιστά τη μέθοδο της αντιστοίχισης αποδεκτή.

Ωστόσο όπως γίνεται αντιληπτό τα πρότυπα μοντέλα που περιγράφουν τις συνθήκες της καύσιμης ύλης στις ΗΠΑ, δεν ανταποκρίνονται στις συνθήκες που επικρατούν στις χώρες τις μεσογείου, με αποτέλεσμα τα μοντέλα πυρκαγιάς να μην δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα αναφορικά με την συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς σε μεσογειακού τύπου οικοσυστήματα. Συγκριμένα, αναφορικά με τις θαμνώδεις εκτάσεις δεν μπορεί κανένα από τα Μ.Κ.Υ. της Αμερικής (4, 5, SH2) να ερμηνεύσει τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς στη Μεσόγειο, όσο τα τοπικά μοντέλα (Ρούσου, Ο., 2009). Επιπροσθέτως, στα μεσογειακού τύπου οικοσυστήματα, κατά γενική ομολογία η φωτιά εξαπλώνεται μέσω θάμνων, που εμφανίζονται είτε ως θαμνότοποι είτε ως υπόροφος δέντρων, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, όταν οι θάμνοι έχουν χαμηλή περιεχόμενη υγρασία και είναι πιο εύφλεκτοι. Συνεκτιμώντας τα παραπάνω, κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία μοντέλων καύσιμης ύλης που να ανταποκρίνονται στις συνθήκες των μεσογειακών χωρών προκειμένου να μπορεί να γίνει αξιόπιστη

εκτίμηση της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς και καταστολή αυτής. Στο πλαίσιο αυτό, δημιουργήθηκαν ορισμένα παραδείγματα τοπικών Μ.Κ.Υ. για τη Μεσόγειο (Hernando et al., 1995, PROMETHEUS, 1999, Dimitrakopoulos et al., 2001).

Για τις ανάγκες της ενότητας αυτής, λόγω των προαναφερθέντων απορρίφθηκε η χρήση των αμερικάνικων συστημάτων και συγχρόνως επιλέχθηκε το λογισμικό G.FMIS, το οποίο είναι το πρώτο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης γεωγραφικών δεδομένων δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα. Τα αποτελέσματα του προσομοιωτή του G.FMIS έχουν αξιολογηθεί με δεδομένα από πραγματικές πυρκαγιές σε συνεργασία με δημόσιους φορείς στην Ελλάδα και σε άλλες χώρες της ΕΕ. Επιπλέον παρέχει στους χρήστες του τη δυνατότητα χρήσης της τυπολογίας ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ, η οποία περιγράφει με ικανοποιητικό τρόπο και σχετική ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της βλάστησης - σαν καύσιμη ύλη - των ελληνικών και γενικότερα των μεσογειακών δασικών οικοσυστημάτων. Το συγκεκριμένο λογισμικό αναπτύχθηκε και διατίθεται από την εταιρεία ΠΑΝΓΑΙΑΣΥΣ.

Χρήστης του συγκεκριμένου προγράμματος είναι και η Πυροσβεστική Υπηρεσία Ελλάδος.

Όσον αφορά τα συστήματα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών, στον ελληνικό χώρο επίσης, σε στάδιο ανάπτυξης βρίσκεται και το λογισμικό ArcFIRE το οποίο έχει δοκιμαστεί και δοκιμάζεται σε πενήντα περιοχές της Ελλάδος, Ιταλίας, Γαλλίας, Ισπανίας και Πορτογαλίας (Μποναζούντας και συνεργάτες, 2010). Ακόμα, το 2004 μετά από συνεργασία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής με το Πανεπιστήμιο Αιγαίου και άλλους φορείς αναπτύχθηκε το λογισμικό AUTO-HAZARD PRO (Automated Fire and Flood Hazard Protection System) το οποίο είναι σύστημα διαχείρισης των δασικών πυρκαγιών αλλά και των επικείμενων πλημμυρών συγχρόνως (<http://www.autohazard.org>). Τα παραπάνω λογισμικά έχουν επιχειρησιακό χαρακτήρα αφού αναπτύσσουν την τεχνολογία τους για πραγματικό χρόνο.

3.3 Σύστημα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών –



Το G.FMIS (Geographic Fire Management Information System) είναι ένα πληροφοριακό σύστημα υποστήριξης αποφάσεων που αποτελείται από ένα σύνολο εφαρμογών με σκοπό τη συστηματική διαχείριση των δασικών πυρκαγιών αξιοποιώντας τις δυνατότητες των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων (GIS) και την επιστημονική γνώση για τη συμπεριφορά των πυρκαγιών.

Η λειτουργία του βασίζεται σε ένα σύνολο εφαρμογών λογισμικού, το οποίο λειτουργεί σαν επέκταση του λογισμικού Arc-GIS 9.x της ESRI ενσωματώνοντας μεθόδους και τεχνογνωσία στη μοντελοποίηση των δασικών πυρκαγιών ώστε να αξιοποιηθούν σε επιχειρησιακό περιβάλλον. Γενικά, το σύστημα για την ορθή λειτουργία του απαιτεί περιβάλλον Windows XP, το λογισμικό Arc-GIS 9.x, και την επέκτασή του Spatial Analyst, ενώ όσον αφορά τα δεδομένα απαιτεί το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και το χάρτη δασικών καυσίμων (τυποποίηση BEHAVE /ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ)

Το σύστημα διαθέτει ενιαίο περιβάλλον επικοινωνίας, ελληνικά μενού, μεγάλες δυνατότητες διαχείρισης χωρικών δεδομένων και εύχρηστες και φιλικές εφαρμογές για την:

- χαρτογράφηση του κινδύνου πυρκαγιάς
- την εκτίμηση της συμπεριφοράς της φωτιάς στα δάση
- την προσομοίωση της εξάπλωσης πυρκαγιάς και
- τον σχεδιασμό και τη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων για τη δασοπυρόσβεση

Οι δυνατότητες του G.FMIS δίνουν στους χρήστες πολλαπλά πλεονεκτήματα αφού το σύστημα συνεργάζεται με συστήματα έγκαιρου εντοπισμού και αναγγελίας δασικών πυρκαγιών, δίκτυα ασύρματων αισθητήρων, εφαρμογές διαχείρισης στόλου οχημάτων και προσωπικής ασφάλειας.

Επίσης η εκτίμηση κινδύνου πυρκαγιάς για την περιοχή εφαρμογής λειτουργεί επιχειρησιακά εάν το G.FMIS συνδεθεί με δίκτυο συλλογής μετεωρολογικών δεδομένων, αποτελώντας με αυτόν τον τρόπο βασική πληροφορία για την τακτική πρόληψη των πυρκαγιών στην περιοχή που εφαρμόζεται το σύστημα. Παράλληλα, η

λειτουργία προσομοίωσης της συμπεριφοράς πυρκαγιάς που διαθέτει το G.FMIS δίνει τη δυνατότητα να υποστηριχθεί ο προληπτικός σχεδιασμός, ο προγραμματισμός της αρχικής επέμβασης και ο συντονισμός των ενεργειών της κατάσβεσης .

Αναλυτικότερα, το συγκεκριμένο μοντέλο δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη του συστήματος:

- ❏ να οργανώσει τα χωρικά δεδομένα, τα οποία είναι απαραίτητα για την πρόληψη και την καταστολή
- ❏ να έχει εύκολη και άμεση πρόσβαση σε θεματικούς χάρτες που αφορούν πληροφορίες χρήσιμες για τη διαχείριση των πυρκαγιών
- ❏ να δημιουργεί μετεωρολογικούς χάρτες με την κατανομή θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και ανέμου στην περιοχή εφαρμογής
- ❏ να εκτιμά με συστηματικό τρόπο την κατανομή του κινδύνου πυρκαγιάς στην περιοχή ενδιαφέροντος
- ❏ να προσομοιώσει τη συμπεριφορά και να απεικονίσει την εξάπλωση της πυρκαγιάς σε ψηφιακό χάρτη ώστε να τεκμηριώσει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις αποφάσεις καταστολής και συντονισμού
- ❏ να διαχειριστεί τα οχήματα που λαμβάνουν μέρος στη δασοπυρόσβεση και να τα δρομολογήσει κατάλληλα
- ❏ να εμφανίσει τα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς στο Google Earth σε τρισδιάστατο, φωτορεαλιστικό περιβάλλον

Όσον αφορά τη μοντελοποίηση της διαχείρισης των δασικών πυρκαγιών, το G.FMIS ενσωματώνει ένα αριθμό μοντέλων για διαδικασίες που σχετίζονται με τη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών. Τα μοντέλα αυτά είναι τα πλέον τεκμηριωμένα επιστημονικά και τα περισσότερο εφαρμοσμένα επιχειρησιακά σε διεθνές επίπεδο. Συγκεκριμένα για την εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς το G.FMIS χρησιμοποιεί το Καναδικό Σύστημα εκτίμησης κινδύνου πυρκαγιάς (CFFDRS) και τον Πορτογαλικό δείκτη (PI). Αντίστοιχα για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της φωτιάς στα δάση το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τα μοντέλα των Rothermel (1984) και Albini (1976) και την οργάνωση του αμερικανικού μοντέλου BEHAVE. Τα παραπάνω μοντέλα έχουν προσαρμοστεί σε μεγάλο βαθμό στα δεδομένα των ευρωπαϊκών μεσογειακών περιοχών.

3.3.1 Αναγκαιότητα χαρτογράφησης εκτίμησης κινδύνου πυρκαγιάς

Ο όρος «κίνδυνος πυρκαγιάς» είναι αρκετά σύνθετος και χρησιμοποιείται για να εκφράσει μια εκτίμηση σχετικά με:

- ⊕ την ευκολία ανάφλεξης
- ⊕ το ρυθμό εξάπλωσης
- ⊕ τη δυσκολία ελέγχου
- ⊕ τις επιπτώσεις μιας πυρκαγιάς

Η πιθανότητα για έναρξη μιας πυρκαγιάς ως αποτέλεσμα της παρουσίας και δράσης των γενεσιουργών αυτής αιτίων, ορίζεται ως επικινδυνότητα. Η επικινδυνότητα μεταβάλλεται σε κάθε περιοχή κατά τη διάρκεια του έτους εξαρτώμενη από την ύπαρξη φυσικών ή ανθρωπογενών αιτίων σε συνδυασμό με την ευφλεκτικότητα της καύσιμης δασικής ύλης. Η ευφλεκτικότητα αυτή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της καύσιμης δασικής ύλης και τις καιρικές συνθήκες που επιδρούν σε αυτή.

Η γνώση της επικινδυνότητας είναι ένα από τα βασικά στοιχεία που απαιτούνται για την εκτίμηση του συνολικού κινδύνου πυρκαγιάς σε μία περιοχή. Ενώ η αποφασιστικότερη παράμετρος, για τον έγκαιρο έλεγχο μιας πυρκαγιάς και την εν συνεχεία κατάσβεσή της, είναι ο χρόνος ο οποίος παρέρχεται από την στιγμή της έναρξης μιας πυρκαγιάς μέχρι τη στιγμή της επέμβασης των πυροσβεστικών δυνάμεων.

Η εγκατάσταση παρατηρητηρίων (πυροφυλάκεια) μέσα στο δάσος με σκοπό την άμεση αναγγελία της πυρκαγιάς θα μπορούσε να δώσει λύση στο πρόβλημα, πλην όμως δεν αποτελεί ολοκληρωμένη λύση, δεδομένου ότι η αναγγελία γίνεται μετά την εκδήλωση της. Παράλληλα, οι δυνάμεις καταστολής έχουν το βασικό πλεονέκτημα μόνο όταν γνωρίζουν σε ποια περιοχή υπάρχει η μεγαλύτερη πιθανότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς, ώστε να μετακινηθούν εκ των προτέρων προς αυτήν, με σκοπό να επέμβουν άμεσα.

Ειδικότερα για την Ελλάδα, εάν λάβουμε υπόψη ότι ο συνολικός χώρος που λαμβάνουν χώρα οι πυρκαγιές καλύπτει το 80 % της συνολικής έκτασής της, τότε η

παρουσία ενός συστήματος πρόβλεψης - εκτίμησης κινδύνου πυρκαγιάς κρίνεται επιβεβλημένη.

Για να θεωρηθεί συνεπώς ο αντιτυρικός σχεδιασμός στη χώρα μας ολοκληρωμένος, πρέπει να περιλαμβάνει και ένα σύστημα που να εκτιμά αντικειμενικά τον κίνδυνο και αναλύει το σύνολο των παραγόντων που επηρεάζουν και καθορίζουν χρονικά την πιθανότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς σε μια περιοχή, με σκοπό την άμεση επέμβαση. Η πρόβλεψη αυτή κατά την διάρκεια της αντιτυρικής περιόδου αποτελεί στρατηγικό εργαλείο προληπτικού σχεδιασμού και οργάνωσης του αντιτυρικού αγώνα που έχει σαν σκοπό:

- ⊕ τη συγκριτική αντιμετώπιση των δασικών οικοσυστημάτων μιας χώρας, σε δεδομένη χρονική στιγμή, ανάλογα με τον κίνδυνο πυρκαγιάς που διατρέχουν
- ⊕ την υποστήριξη της διοίκησης στη λήψη αποφάσεων
- ⊕ την ενημέρωση των πολιτών για τον κίνδυνο με σκοπό την αποφυγή πρόκλησης πυρκαγιάς από αμέλεια.

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητη η επισήμανση ότι η εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς σε καμία περίπτωση δεν προβλέπει την συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς που εξελίσσεται σε πραγματικό χρόνο.

3.3.2 Προσομοίωση συμπεριφοράς πυρκαγιάς

Το G.FMIS δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να εκτιμήσει τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς και να προσομοιώσει την εξάπλωση της. Το λογισμικό απεικονίζει τις εκτιμήσεις και την περίμετρο ανάπτυξης της πυρκαγιάς σε περιβάλλον GIS.

Το σύστημα χρησιμοποιεί για τους υπολογισμούς της εξάπλωσης και της εκτίμησης της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς, την προσέγγιση του συστήματος BEHAVE (Albini, 1976, Anderson, 1982, Andrews, 1986, Burgan and Rothermel, 1984) και τις εξισώσεις του Rothermel (Rothermel, 1983, Andrews, 1986), με τροποποιήσεις που αφορούν:

- ⊕ την εκτίμηση της υγρασίας της λεπτής καύσιμης ύλης
- ⊕ την κατάλληλη τυποποίηση των δασικών καυσίμων για την περιοχή της Μεσογείου, σύμφωνα με την τυπολογία PROMETHEUS.

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς της φωτιάς στην περιοχή εφαρμογής του συστήματος βοηθάει το διαχειριστή να αποφασίσει σε ποιές θέσεις μπορεί να ελέγξει την εξάπλωση ή ποιά σημεία θα χρειαστούν μέτρα προστασίας και πότε.

3.3.3 Διαχείριση Οχημάτων και Δρομολόγηση

Μία εφαρμογή που ενσωματώνεται στις λειτουργίες του G.FMIS είναι η διαχείριση των οχημάτων που συμμετέχουν στο έργο της δασοπροστασίας. Για την εφαρμογή αυτή απαιτείται να υπάρχουν εγκατεστημένες συσκευές GPS/GPRS στα οχήματα. Το G.FMIS δίνει τη δυνατότητα εντοπισμού και παρακολούθησης της κίνησης των οχημάτων στην προστατευόμενη περιοχή.

Επιπλέον το σύστημα έχει δυνατότητες δρομολόγησης της κίνησης οχημάτων και υποστηρίζει τη χάραξη βέλτιστων διαδρομών για πρόσβαση από επιλεγμένα σημεία εκκίνησης σε σημεία του μετώπου ή άλλες θέσεις που υποδεικνύει στο σύστημα ο διαχειριστής. Η βέλτιστη διαδρομή μπορεί να αναφέρεται στην ταχύτερη ή τη συντομότερη διαδρομή και λειτουργεί σε συνδυασμό με το σύστημα διαχείρισης οχημάτων ή και χωρίς να υπάρχει αυτό.

Η χάραξη λαμβάνει υπόψη τον τύπο οχήματος, την τοπογραφία της περιοχής, τον τύπο και την κατάσταση του οδικού δικτύου. Η διαδρομή απεικονίζεται στον χάρτη μαζί με τα στοιχεία για την απόσταση και τον εκτιμώμενο χρόνο πρόσβασης. Η εφαρμογή της δρομολόγησης συνδυάζεται με εφαρμογές διαχείρισης στόλου οχημάτων για την ολοκληρωμένη αξιοποίηση των πόρων που συμμετέχουν σε ένα συμβάν.

Με τη βοήθεια του λογισμικού μπορούν να αξιολογηθούν εναλλακτικές διαδρομές σε περίπτωση αποκλεισμού δρόμων, να εντοπιστούν περιοχές χωρίς πρόσβαση και να υποστηριχθεί ο προγραμματισμός και η διαχείριση της κίνησης των οχημάτων που συμμετέχουν στη δασοπυρόσβεση.

3.3.4 Μοντέλα καύσιμης ύλης

Για τη διευκόλυνση της περιγραφής των φυσικών, κυρίως, αλλά και των χημικών χαρακτηριστικών της φυτικής βιομάζας μιας δασικής περιοχής έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται η έννοια της δασικής καύσιμης ύλης που αντιστοιχεί

σε μία κατάσταση που περιγράφεται από ένα σύνολο παραμέτρων με καθορισμένες τιμές. Ο κύριος λόγος της δημιουργίας των τύπων καύσιμης ύλης είναι για να χρησιμοποιούνται σε μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης δασικών πυρκαγιών.

Βασικότερη τυποποίηση αυτού του είδους αποτελούν τα δεκατρία μοντέλα καυσίμων (βλ.παράρτημα) που αναπτύχθηκαν στις ΗΠΑ για τη λειτουργία του συστήματος BEHAVE για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της φωτιάς στα δάση.

Χρησιμοποιώντας την ίδια προσέγγιση στην Ευρώπη έχει αναπτυχθεί η τυποποίηση PROMHΘΕΑΣ (τύποι καυσίμων και οι παράμετροι τους) στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος PROMETHEUS της ΕΕ από ομάδα επιστημονικών και ακαδημαϊκών φορέων από χώρες της ΕΕ με επί κεφαλής την εταιρεία ΑΛΓΟΣΥΣΤΕΜΣ ΑΕ. Σκοπός της τυποποίησης ήταν να περιγράψει με ικανοποιητικό τρόπο και ακρίβεια το στοιχείο της βλάστησης - σαν καύσιμη ύλη - των ελληνικών και γενικότερα των μεσογειακών δασικών οικοσυστημάτων.

Η τυποποίηση αυτή αξιολογήθηκε στα πλαίσια των ερευνητικών προγραμμάτων PROMHΘΕΑΣ II και INFLAME της ΕΕ σε συνδυασμό με συστήματα προσομοίωσης και εκτίμησης συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών.

Η τυποποίηση PROMHΘΕΑΣ γίνεται δεκτή και χρησιμοποιείται από το Κοινό Ερευνητικό Κέντρο JRC Ispra το οποίο εκτελεί χρέη τεχνικού συμβούλου της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για θέματα δασικών πυρκαγιών.

Για την τυποποίηση των δασικών καυσίμων βρίσκεται σήμερα σε εξέλιξη το έργο FUELMAP της Ευρωπαϊκής Επιτροπής που αφορά την τυποποίηση της δασικής καύσιμης ύλης για την εξυπηρέτηση της μοντελοποίησης πολλαπλών σκοπών (πρόληψη, συμπεριφορά και επιπτώσεις πυρκαγιών).

3.3.5 Διαχείριση δασικής καύσιμης ύλης

Η δασική βλάστηση στην Ελλάδα παρουσιάζει ποικιλία και διαφοροποίηση ανάλογα με τα κλιματεδαφικά δεδομένα των διαφόρων περιοχών. Οι κλιματεδαφικές συνθήκες χαρακτηρίζουν τον τύπο της βλάστησης αλλά και την προσαρμογή και προσαρμοστικότητα της στην παρουσία της φωτιάς στο οικοσύστημα.

Η δασική βλάστηση είναι ένα από τα βασικά στοιχεία που μαζί με την τοπογραφία και τον άνεμο καθορίζει την έναρξη, την συμπεριφορά και την διάδοση μιας πυρκαγιάς. Η καύσιμη ύλη περιλαμβάνει τη ζωντανή αλλά και τη νεκρή βλάστηση (βιομάζα) που υπάρχει σε μία περιοχή είτε στα δέντρα είτε κατακεείμενη

στο έδαφος. Για να ενσωματωθεί ο χαρακτήρας της βλάστησης στον προσομοιωτή του G.FMIS πρέπει να γίνει αποτύπωση της υφιστάμενης καύσιμης ύλης και τυποποίηση της σύμφωνα με τις καταστάσεις και τις δομές που ορίζουν τα στρώματα των δασικών καυσίμων της περιοχής εφαρμογής.

Η τυποποίηση και η χαρτογράφηση της δασικής καύσιμης ύλης θα βοηθήσει στον εντοπισμό περιοχών προτεραιότητας για τη λήψη προληπτικών μέτρων και ιδιαίτερα περιοχών όπου θα πρέπει να εφαρμοστούν μέτρα διαχείρισης των δασικών καυσίμων (αραιώσεις, κλαδεύσεις κλπ) αλλά και στην υποστήριξη του σχεδιασμού αντιμετώπισης ενδεχόμενης πυρκαγιάς με βάση σενάρια επιλεγμένα από τις αρμόδιες υπηρεσίες και με τη βοήθεια του προσομοιωτή G.FMIS. Τα σενάρια μπορεί να αναφέρονται σε κανονικές συνθήκες της περιόδου των πυρκαγιών προκειμένου να οργανωθεί καλύτερα η αρχική επέμβαση ή σε ακραίες καιρικές συνθήκες (παρατεταμένη ή επαναλαμβανόμενες ξηρασίες και ισχυροί άνεμοι) προκειμένου να αναλυθούν ειδικά μέτρα προστασίας των πολιτών και των περιουσιών τους.

Το G.FMIS μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε χαρτογράφηση της δασικής καύσιμης ύλης, η οποία είναι συμβατή με την τυποποίηση του συστήματος BEHAVE. Συστηματικά χρησιμοποιείται η τυποποίηση ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ (Prometheus project, 1999) η οποία έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία ΑΛΓΟΣΥΣΤΕΜΣ ΑΕ σε συνεργασία με άλλους ευρωπαϊκούς φορείς και η οποία είναι η κύρια τυποποίηση δασικών καυσίμων που εφαρμόζεται στην Ευρώπη.

3.3.5.1 Τυποποίηση ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ

Το λογισμικό προσομοίωσης πυρκαγιών G.FMIS χρησιμοποιεί για την παραμετροποίηση της δασικής καύσιμης ύλης την τυπολογία ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ η οποία περιγράφει με ικανοποιητικό τρόπο και σχετική ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της βλάστησης - σαν καύσιμη ύλη - των ελληνικών και γενικότερα των μεσογειακών δασικών οικοσυστημάτων. Οι τύποι της καύσιμης ύλης κατά την τυποποίηση ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

Καύσιμα εδάφους (τύπος ΠΡΟ1)

- Λιβαδικές εκτάσεις με αγρωστώδη/ποώδη βλάστηση.

- Η καύσιμη ύλη είναι λεπτών διαστάσεων και νεκρή κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού.
- Η πυρκαγιά στα καύσιμα αυτά εξαπλώνεται ταχύτατα αλλά με μικρό ύψος φλόγας



Εικόνα 3-2 Απεικόνιση φυτικής – καύσιμης ύλης τύπου ΠΡΟ1
 Πηγή: www.g-fmis.gr

Χαμηλοί θάμνοι (τύπος ΠΡΟ2)

- Πρόκειται για λιβαδικές εκτάσεις, θαμνώνες με χαμηλούς θάμνους (0.30 - 0.60 m) και με μεγάλο ποσοστό (30 - 40%) ποώδους βλάστησης.
- Στον τύπο αυτό αντιστοιχούν και περιοχές όπου έχουν γίνει αποψιλωτικές υλοτομίες και δεν έχουν απομακρυνθεί τα υπολείμματα της υλοτομίας



Εικόνα 3-3 Απεικόνιση φυτικής – καύσιμης ύλης τύπου ΠΡΟ2
 Πηγή: www.g-fmis.gr

Μέτριοι θάμνοι (τύπος ΠΡΟ3)

- Πρόκειται για μέτριους έως υψηλούς θάμνους (0.60 - 2.0 m). Η κάλυψη του εδάφους από τους θάμνους είναι μεγαλύτερη από 50%.
- Στον τύπο αυτό μπορεί να περιλαμβάνονται επιφάνειες φυσικής αναγέννησης ή τεχνητής αναδάσωσης στο στάδιο πυκνοφυτείας



Εικόνα 3-4 Απεικόνιση φυτικής – καύσιμης ύλης τύπου ΠΡΟ3

Πηγή: www.g-fmis.gr

Υψηλοί θάμνοι (τύπος ΠΡΟ4)

- Πρόκειται για υψηλούς θάμνους (> 2.0 m) και επιφάνειες με κορμίδια ή νεαρές (πυκνές) συστάδες από αναγέννηση.



Εικόνα 3-5 Απεικόνιση φυτικής – καύσιμης ύλης τύπου ΠΡΟ4

Πηγή: www.g-fmis.gr

Συστάδες με καθαρό υπόροφο (τύπος ΠΡΟ5)

- Πρόκειται για συστάδες όπου ο υπόροφος έχει απομακρυνθεί είτε με προδιαγεγραμμένο κάψιμο (όχι στην Ελλάδα) είτε με μηχανικά ή χημικά μέσα.
- Παρόμοιες συνθήκες καυσίμων υπάρχουν επίσης σε πολύ κλειστές συστάδες (συγκόμωση πάνω από 80%) όπου δεν υπάρχει επαρκής φωτισμός στον υπόροφο και δεν ευνοείται η ανάπτυξή του.
- Σ' αυτό τον τύπο εκδηλώνονται συνήθως έρπουσες πυρκαγιές χαμηλής έντασης, χωρίς όμως να αποκλείονται και πυρκαγιές κόμης όταν αυτές προέρχονται από τις γύρω περιοχές



Εικόνα 3-6 Απεικόνιση φυτικής – καύσιμης ύλης τύπου ΠΡΟ5

Πηγή: www.g-fmis.gr

Συστάδες με μέτριο υπόροφο (τύπος ΠΡΟ6)

- Πρόκειται για συστάδες όπου η βάση της κόμης βρίσκεται αρκετά υψηλότερα από την κορυφή του υπορόφου. Ο υπόροφος αποτελείται κυρίως από μικρούς θάμνους, πωδία βλάστηση, βελονοτάπητα και χούμο*.
- Σ' αυτό τον τύπο καυσίμου εμφανίζονται κυρίως έρπουσες πυρκαγιές με διαφορετικές εντάσεις, οι οποίες μπορεί να εξελιχθούν σε πυρκαγιές κόμης κάτω από ακραίες μετεωρολογικές συνθήκες.

*Η εδαφοκάλυψη είναι πάνω από 50%.



Εικόνα 3-7 Απεικόνιση φυτικής – καύσιμης ύλης τύπου ΠΡΟ6
Πηγή: www.g-fmis.gr

Συστάδες με υψηλό και πυκνό υπόροφο (τύπος ΠΡΟ7)

- Πρόκειται για συστάδες με υψηλό και πυκνό υπόροφο όπου η απόσταση της βάσης της κόμης από τον υπόροφο είναι πολύ μικρή ή όπου υπάρχει ανάμειξη υπορόφου και κόμης των συστάδων.
- Ο τύπος αυτός υποστηρίζει σοβαρές πυρκαγιές μεγάλης έντασης που εξελίσσονται εύκολα σε πυρκαγιές κόμης.



Εικόνα 3-8 Απεικόνιση φυτικής – καύσιμης ύλης τύπου ΠΡΟ7
Πηγή: www.ecosystema.ru

3.4 Συστήματα παρακολούθησης και καταγραφής δασικών πυρκαγιών

Το Ευρωπαϊκό Σύστημα Πληροφόρησης για τις Δασικές Πυρκαγιές (European Forest Fire Information System, EFFIS) είναι ένα σύστημα που έχει αναπτυχθεί από το Κοινό Κέντρο Ερευνών (Joint Research Centre, JRC) και τη Γενική Διεύθυνση Περιβάλλοντος (Directorate General for Environment, DG ENV) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (European Commission, EC), το οποίο υποστηρίζει τις υπηρεσίες που είναι υπεύθυνες για την προστασία των δασών από πυρκαγιές τόσο στην ευρωπαϊκή ένωση όσο και σε γειτονικές χώρες. Συγκεκριμένα, παρέχει πληροφορίες υποδεικνύοντας τα σημεία των εστιών και οριοθετώντας τις καμένες εκτάσεις, υποστηρίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις προσπάθειες αξιολόγησης και καταγραφής των επιπτώσεων των εκάστοτε δασικών πυρκαγιών, καθώς επίσης παρακολουθώντας και προβλέποντας το κίνδυνο εμφάνισης πυρκαγιών στις διάφορες περιοχές. (<http://effis.jrc.ec.europa.eu>). Αναλυτικότερα, την κύρια περίοδο εμφάνισης πυρκαγιών (Ιούνιο-Σεπτέμβριο) το σύστημα ενημερώνει καθημερινά τις υπηρεσίες πολιτικής προστασίας των ευρωπαϊκών χωρών με χάρτες επικινδυνότητας εμφάνισης πυρκαγιών, βοηθώντας στον σωστό σχεδιασμό για την έγκαιρη αντιμετώπιση ανάλογων συνθηκών.

Οι πληροφορίες της τρέχουσας περιόδου πυρκαγιών για τις ευρωπαϊκές και τις μεσογειακές χώρες, διατίθενται και μέσω διαδικτύου στην ηλεκτρονική διεύθυνση <http://effis.jrc.ec.europa.eu/current-situation>, περιλαμβάνοντας χάρτες επικινδυνότητας εμφάνισης πυρκαγιών, καθημερινά ενημερωμένες δορυφορικές εικόνες και χάρτες των εστιών και των καμένων εκτάσεων.

Τέλος, το σύστημα λειτουργεί σαν βάση δεδομένων για τις πυρκαγιές που έχουν συμβεί στην Ευρώπη. Οι πληροφορίες παλαιότερων πυρκαγιών διατίθενται στην ηλεκτρονική διεύθυνση <http://effis-viewer.jrc.ec.europa.eu/wmi/viewer.html>.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο επίσης, λειτουργεί ένα ακόμα σύστημα παρακολούθησης και καταγραφής δασικών πυρκαγιών, μέσω του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ΕΟΔ-ESA) ο οποίος αποτελεί την πύλη της Ευρώπης στο διάστημα. Αποστολή του είναι η διαμόρφωση της ανάπτυξης των δυνατοτήτων της Ευρώπης σχετικά με το διάστημα και η εξασφάλιση συνεχιζόμενων επενδύσεων σε αυτό, ώστε να προκύπτουν οφέλη για τους πολίτες της Ευρώπης.

Οι δορυφόροι του ESA διαθέτουν όργανα τα οποία λειτουργούν σαν θερμομέτρα, το Along Track Scanning Radiometer (ATSR) στον ESA's ERS-2

δορυφόρο και το Advanced Along Track Scanning Radiometer (AATSR) στον ESA's Envisat δορυφόρο, και μετρούν την θερμική υπέρυθη ακτινοβολία για να λάβουν την θερμοκρασία που επικρατεί στην επιφάνεια της γης. Όταν οι θερμοκρασίες υπερβούν τους 312°K (38.85°C) τότε κατηγοριοποιούνται ως πυρκαγιές από το AATSR, το οποίο είναι ικανό να ανιχνεύσει εστίες πυρκαγιάς τόσο μικρές όσο είναι και οι φλόγες των αερίων (gas flares) στις βιομηχανικές περιοχές λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών.

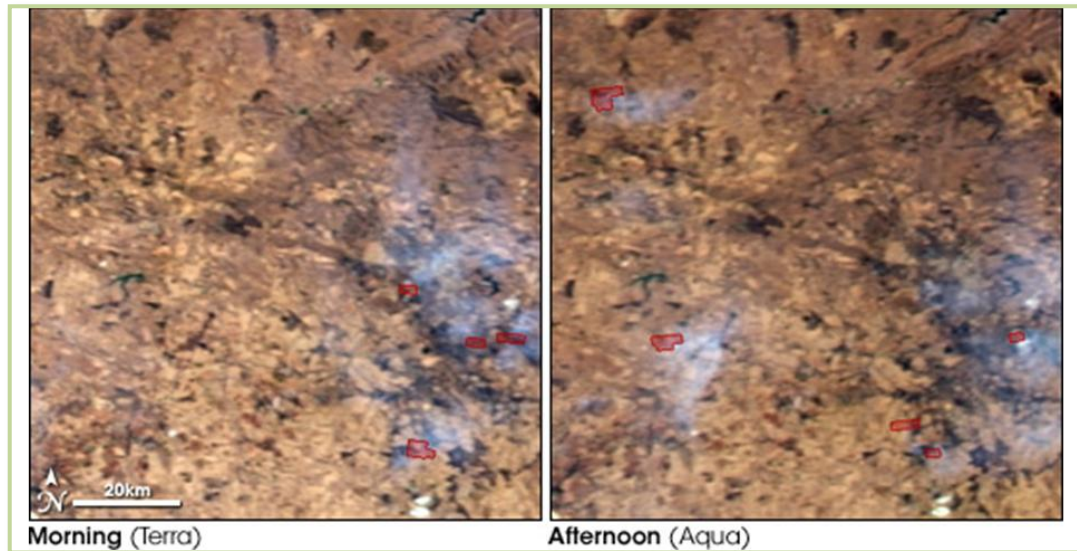
Ο συγκεκριμένος οργανισμός διαθέτει παγκόσμιους χάρτες πυρκαγιών μέσω του διαδικτυακού τύπου ESA's ATSR World Fire Atlas (WFA), σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, αφού παρέχει δεδομένα περίπου έξι ώρες μετά την απόκτησή τους. Εκτός από τους χάρτες παρέχονται επίσης ο χρόνος, η ημέρα, το γεωγραφικό μήκος και πλάτος των εστιών πυρκαγιάς. Τα προαναφερθέντα δεδομένα χρησιμοποιούνται στην πρόληψη και διαχείριση πυρκαγιών αλλά και σε άλλους επιστημονικούς τομείς, όπως είναι η χημεία της ατμόσφαιρας, η οικολογία, η μετεωρολογία κ.α. (<http://www.esa.int/esaCP/index.html>)

Στον ελληνικό χώρο, το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών και συγκεκριμένα το Ινστιτούτο Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης χρησιμοποιώντας δορυφορικές εικόνες MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) από τη βάση δεδομένων της NASA (δύο εικόνες ανά ημέρα) δημιουργεί αυτόματα αρχεία της μορφής 'kmz' (Google Earth) τα οποία απεικονίζουν ενεργές εστίες πυρκαγιών, οι οποίες σημειώνονται με κόκκινο χρώμα, σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Αναλυτικότερα, το MODIS είναι ένα όργανο τοποθετημένο επί των δορυφόρων Terra (EOS AM) και Aqua (EOS PM), όπου EOS – Earth Observing System. Ο δορυφόρος Terra κινείται από το Βορρά προς το Νότο και διασχίζει τον Ισημερινό το πρωί, ενώ ο Aqua κινείται από το Νότο προς το Βορρά και διασχίζει τον Ισημερινό το απόγευμα, παρακολουθώντας με αυτόν τον τρόπο όλη τη γη σε 1 με 2 ημέρες. Μία από τις δυνατότητες του MODIS είναι η ανίχνευση θερμικών ανωμαλιών ακόμα και μέσα από παχύ νέφος καπνού (Εικόνα 3-9,10). Οι εικόνες του MODIS που περιλαμβάνουν την πληροφορία αυτή, καταχωρούνται στο πρόγραμμα MODIS Rapid Response Project NASA/GSFC και κατόπιν αδειοδότησης χρησιμοποιούνται από την εκάστοτε ενδιαφερόμενη υπηρεσία.

(<http://www.space.noa.gr/nrealtime/fireproducts.htm>)

(<http://modis.gsfc.nasa.gov/index.php>)

Εκτός από την προσθήκη των εικόνων στο πρόγραμμα MODIS Rapid Response Project NASA/GSFC, δύο με τέσσερις ώρες μετά την συλλογή τους καταχωρούνται και στο Web Fire Mapper το οποίο έχει δημιουργηθεί από το πανεπιστήμιο του Maryland.



Εικόνα 3-9 NASA's Terra και Aqua δορυφόροι. Εντοπισμός εστιών φωτιάς μέσω του οργάνου MODIS



Εικόνα 3-10 Δορυφορική εικόνα από MODIS – οριοθέτηση της καμένης έκτασης με σκούρο κόκκινο χρώμα.

Πηγή: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/BAER/baer2.php> (Robert Simmon και Jesse Allen, NASA GSFC)

Κεφάλαιο 4

Προσομοιωμένα σενάρια πυρκαγιάς & Πραγματική πυρκαγιά 2009



4. Προσομοιωμένα σενάρια πυρκαγιάς & Πραγματική πυρκαγιά 2009

4.1 Σενάρια πυρκαγιάς στην περιοχή μελέτης

Για τη διερεύνηση των επιπτώσεων στην υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης, διαμορφώθηκαν σενάρια πυρκαγιάς στην υπό μελέτη περιοχή. Αναλυτικότερα, τα σενάρια προσομοίωσης πυρκαγιάς πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό G.FMIS με την παραδοχή ότι τα χαρακτηριστικά της φυτικής κάλυψης και κατ'επέκταση της καύσιμης ύλης ανταποκρίνονται στις συνθήκες πριν την πυρκαγιά του 2009 (δηλαδή δεν συμπεριλαμβάνεται η μείωση της φυτικής κάλυψης των καμένων εκτάσεων).

Επίσης, η διαμόρφωση των σεναρίων έγινε για συνθήκες ανέμου και υγρασίας που επικρατούν συνήθως στην υπό μελέτη περιοχή κατά του καλοκαιρινούς μήνες.

Τα σενάρια διακρίνονται ως εξής:

Πίνακας 4-1 Χαρακτηριστικά σεναρίων πυρκαγιάς

1^ο Σενάριο

Παράμετρος	Τιμές παραμέτρων		Περιγραφή
<u>Άνεμος</u>	Ταχύτητα (m/s)	Διεύθυνση ροής (deg)	B/A, Χαμηλός (άπνυα)
	3	30-40	
<u>Υγρασία</u>	Καύσιμη ύλη		Μέτρια
	Λεπτής (νεκρής)	Ζωντανής	
	7	85	

2^ο Σενάριο

Παράμετρος	Τιμές παραμέτρων		Περιγραφή
<u>Άνεμος</u>	Ταχύτητα (m/s)	Διεύθυνση ροής (deg)	B/A, Μέτριος
	6	30-40	
Καύσιμη ύλη			
<u>Υγρασία</u>	Λεπτής (νεκρής)	Ζωντανής	Μέτρια
	7	85	

3^ο Σενάριο

Παράμετρος	Τιμές παραμέτρων		Περιγραφή
<u>Άνεμος</u>	Ταχύτητα (m/s)	Διεύθυνση ροής (deg)	B/A, Υψηλός
	9	30-40	
Καύσιμη ύλη			
<u>Υγρασία</u>	Λεπτής (νεκρής)	Ζωντανής	Χαμηλή
	3-4	85	

Για τις ανάγκες των παραπάνω σεναρίων επιλέχθηκε κοινός χρόνος προσομοίωσης και χρονικού βήματος έξι ώρες και μία ώρα αντίστοιχα. Οι χρόνοι που επιλέχθηκαν δεν ορίστηκαν τυχαία. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα μοντέλα προσομοίωσης που έχουν επιχειρησιακό χαρακτήρα, όπως το G.FMIS το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, για να εξάγουν αξιόπιστα αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο, ο χρόνος προσομοίωσης δεν πρέπει να ξεπερνά τις δέκα ώρες.

Συνήθως οι χρήστες των συστημάτων αυτών, κάθε έξι ώρες επαναπροσδιορίζουν τις παραμέτρους του μοντέλου αξιολογώντας τις συνθήκες που επικρατούν στο μέτωπο της πυρκαγιάς την συγκεκριμένη χρονική στιγμή (π.χ. επίγειες ή εναέριες προσπάθειες κατάσβεσης, αλλαγή ταχύτητας ή/και κατεύθυνσης ανέμου, νέες εστίες πυρκαγιάς, κ.α). Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται η λειτουργικότητα του μοντέλου αφού δίνει τη δυνατότητα καθοδήγησης των ενεργειών κατάσβεσης, εξασφάλισης της ασφάλειας των πυροσβεστικών δυνάμεων και υπόδειξης οικισμών που απειλούνται προς εκκένωση.

Επιπλέον, και τα τρία σεναρία φέρουν τις ίδιες συντεταγμένες εστιών. Αναλυτικότερα, τοποθετήθηκαν τέσσερις σημειακές εστίες πυρκαγιάς στο βόρειο, ανατολικό, δυτικό και νότιο τμήμα της υπό μελέτη περιοχής (πιν. 4-2)

Πίνακας 4-2 Συντεταγμένες σημειακών εστιών των σεναρίων πυρκαγιάς

Τμήμα λεκάνης	Συντεταγμένες Εστιών	
	Xcoord	Ycoord
Βόρειο	493169	4211110
Ανατολικό	497609	4208070
Δυτικό	489889	4208470
Νότιο	493809	4204530

Για την προσομοίωση των σεναρίων στο σύστημα G.FMIS χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο του εδάφους και ο ψηφιακός χάρτης με τη δασική καύσιμη ύλη της περιοχής.

Η διαδικασία προσομοίωσης περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- ✚ εισαγωγή από τον χρήστη δεδομένων που αφορούν το σημείο ή τη γραμμή έναρξης της πυρκαγιάς (π.χ συντεταγμένες εστιών πυρκαγιάς)
- ✚ εισαγωγή στοιχείων σημειακών μετρήσεων ανέμου για την περιοχή (π.χ υψόμετρο σημείου, ταχύτητα ανέμου (m/s) και διεύθυνση ροής (deg))
- ✚ υπολογισμός χάρτη πεδίου ροής του ανέμου για την περιοχή με βάση τα σημειακά δεδομένα ανέμου
- ✚ εισαγωγή δεδομένων υγρασίας λεπτών και ζωντανών καυσίμων (%) – καθορίζουν την συμπεριφορά της πυρκαγιάς
- ✚ εισαγωγή χρόνου προσομοίωσης (min) και χρονικού βήματος (min) πυρκαγιάς – καθορίζουν την εξάπλωση της πυρκαγιάς
- ✚ υπολογίζεται η συμπεριφορά και η εξάπλωση της δασικής πυρκαγιάς
- ✚ εξαγωγή πληροφοριών για την ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς, τη θερμική ένταση του μετώπου, το ύψος της φλόγας, την έκταση που θα καεί σε συγκεκριμένο χρόνο, το μήκος του μετώπου ή τον χρόνο που θα χρειαστεί η πυρκαγιά για να φτάσει σε συγκεκριμένο σημείο

Κύρια παράμετρος υπολογισμού για τις ανάγκες της συγκεκριμένης μελέτης ήταν το εμβαδό της καμένης έκτασης. Εκτός όμως από την έκταση της πυρκαγιάς το σύστημα υπολογίζει και άλλες παραμέτρους.

Γενικά, οι βασικές παράμετροι μιας επιφανειακής πυρκαγιάς που συχνά υπολογίζονται είναι η ταχύτητα διάδοσης, η θερμική ένταση μετώπου, το μήκος της φλόγας, θερμική ένταση αντίδρασης, η έκταση και η περίμετρος της πυρκαγιάς μετά από 30 λεπτά από την εκδήλωσή της, καθώς και η μέγιστη δυνατή απόσταση μεταφοράς καυτρών από το μέτωπο της πυρκαγιάς. Η γνώση των παραπάνω παραμέτρων πριν, από και κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς συμβάλλει τόσο στην αντιμετώπιση των δυσκολιών ελέγχου της πυρκαγιάς (κατασκευή αντιπυρικής ζώνης,

αποστολή ή όχι συνεργειών στο μέτωπο, απαιτήσεις σε προσωπικό και εξοπλισμό, νέες εστίες) όσο και στην εκτίμηση των προκαλουμένων συνεπειών στο οικοσύστημα (Καλαμποκίδης, 2004).

Συγκεκριμένα το σύστημα G.FMIS υπολογίζει τρεις παραμέτρους:

- ⊕ την ταχύτητα διάδοσης (*Ros*)
- ⊕ το μήκος φλόγας (*Flame*) και
- ⊕ την ένταση πυρκαγιάς (*Flin*)

Ως ταχύτητα διάδοσης (*Rate of Spread*) ορίζεται η ταχύτητα με την οποία η πυρκαγιά διαδίδεται μέσω της επιφανειακής καύσιμης ύλης και μετριέται σε μέτρα ανά λεπτό (m/min). Η μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης (*ROSm_{ax}*) παρατηρείται μπροστά, στο μέτωπο της πυρκαγιάς, ενώ πλάγια, ή προς τα πίσω είναι η μικρότερη ταχύτητα (Pyne et al., 1996). Η ταχύτητα διάδοσης διαφέρει ανάλογα με την ένταση του ανέμου, τον τύπο της καύσιμης ύλης, την περιεχόμενη υγρασία και με την κλίση του εδάφους. Το μήκος της φλόγας (*Flame Length*) μίας επιφανειακής πυρκαγιάς, μετριέται κατά μήκος του άξονα της φλόγας στο μέτωπο της πυρκαγιάς και αποτελεί επίσης, ένα δείκτης της έντασης της φωτιάς. Η ένταση της φωτιάς αναφέρεται ως ο ρυθμός με τον οποίο εκλύεται θερμική ενέργεια και καταγράφεται σε μονάδες θερμότητας (cal) ή ισχύος (watt). Η θερμική ένταση του μετώπου (*Fireline Intensity*) που αναφέρεται και ως ένταση Byram, είναι το πιο κοινό και πιο χρήσιμο μέγεθος μέτρησης της έντασης μίας πυρκαγιάς και μετριέται σε kW/m. Εξαρτάται από τον τύπο της βλάστησης αλλά και από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή της πυρκαγιάς. Επίσης, εξαρτάται από την εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας και την ταχύτητα διάδοσης της φωτιάς και είναι ισοδύναμη με την θερμότητα που εκλύεται από μία μονάδα μήκους του μετώπου στη μονάδα του χρόνου (Chandler et. al, 1983).

4.2 Πυρκαγιά 2009

Η μεγάλη πυρκαγιά στην ανατολική Αττική που ξεκίνησε το βράδυ τις 21 Αυγούστου από την περιοχή του Γραμματικού, είχε διάρκεια τεσσάρων ημερών και έκαψε συνολικά 210.000 στρέμματα, κυρίως, πευκοδάσους. Η πυρκαγιά επεκτάθηκε σε ολόκληρη την βορειοανατολική Αττική, από την περιοχή του Γραμματικού και του Μαραθώνα, μέχρι το Πικέρμι και την Παλλήνη, κατακαίγοντας στο ενδιάμεσο, τμήμα της Πεντέλης στην περιοχή του Διονύσου (Εικόνα 4-1). Η πυρκαγιά αυτή είναι η μεγαλύτερη που έχει γνωρίσει ποτέ ο νομός Αττικής.



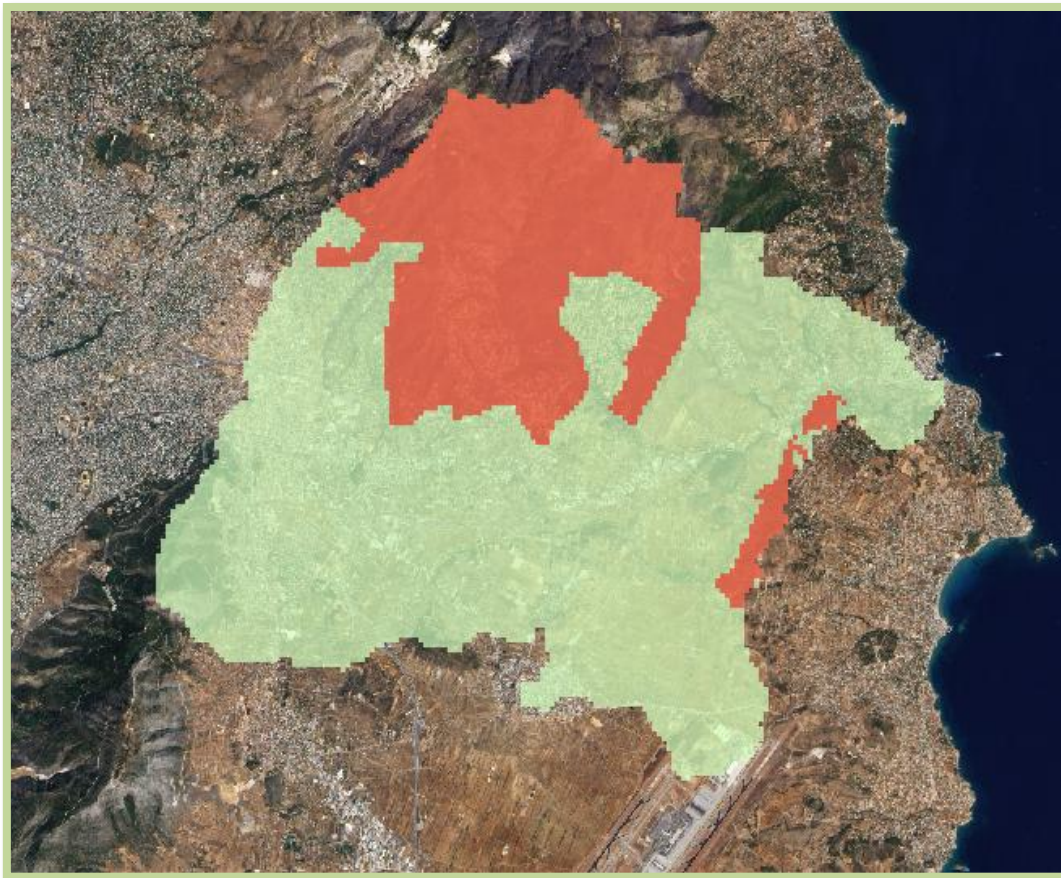
Εικόνα 4-1 Δορυφορική εικόνα της ανατολικής Αττικής μετά την πυρκαγιά του Αυγούστου του 2009

Πηγή: Εργαστήριο Γεωλογίας & ορυκτολογίας - Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών

4.2.1 Οριοθέτηση καμένης έκτασης

Σημαντικό ρόλο για τη διερεύνηση της επίδρασης των πυρκαγιών στην υδρολογική συμπεριφορά μιας λεκάνης απορροής έχει η οριοθέτηση των πυρόπληκτων περιοχών, οι οποίες βρίσκονται εντός των ορίων της υπό μελέτη λεκάνης. Στην παρούσα εργασία, η οριοθέτηση της καμένης έκτασης πραγματοποιήθηκε με ψηφιοποίηση της παραπάνω δορυφορικής εικόνας (Εικόνα 4-1) με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης Editor του ArcGis (Εικόνα 4-2). Η παραπάνω διαδικασία θέτει ως στόχο όχι μόνο την σχηματική απεικόνιση της καμένης έκτασης (περίμετρο) αλλά και σε συνδυασμό με άλλα αρχεία, π.χ χάρτη χρήσεων γης, την ακριβή πληροφόρηση του είδους της γης που κάηκε.

Με τη μέθοδο αυτή, δίνεται στο μελετητή η δυνατότητα εκτίμησης των συνθηκών που μεταβάλλονται μετά την επίδραση της πυρκαγιάς και κατ'επέκταση των παραμέτρων που αλλάζουν κατά την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής.

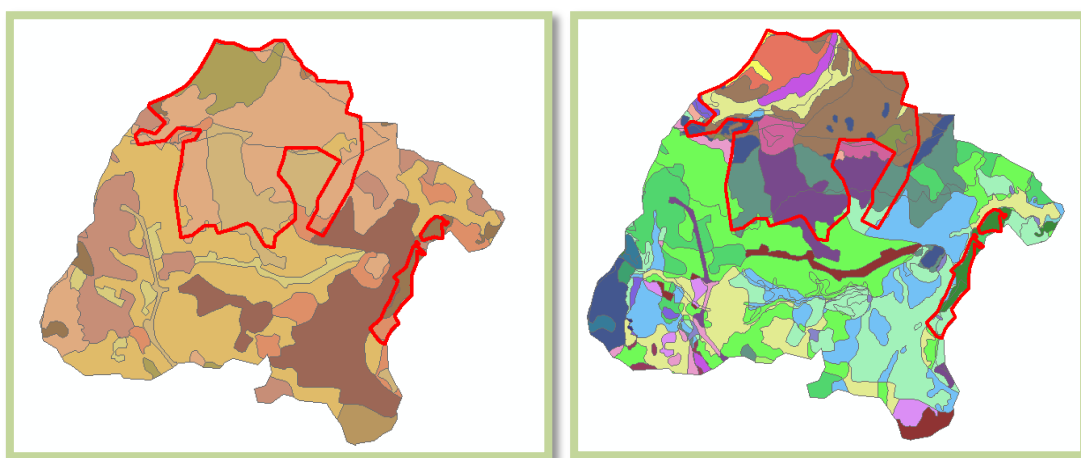


Εικόνα 4-2 Απεικόνιση καμένης (κόκκινο) και άκαυτης (ανοικτό πράσινο) έκτασης

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα η καμένη έκταση ανέρχεται σε περίπου* 35.000 στρέμματα, δηλαδή στο 28% της λεκάνης.

Όπως προαναφέρθηκε, ο συνδυασμός του χάρτη χρήσεων γης με την περίμετρο της καμένης έκτασης (Εικόνα 4-3) παρέχει πληροφορίες για το είδος της χρήσης γης που επλήγει από την πυρκαγιά.

Αντίστοιχα, ο συνδυασμός της περιμέτρου με τον χάρτη των τιμών καμπύλης απορροής (curve number)(Εικόνα 4-3), δίνει την δυνατότητα στον μελετητή να επέμβει και να διαφοροποιήσει τις τιμές, μεταβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο την αρχική (πριν την πυρκαγιά) υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης.

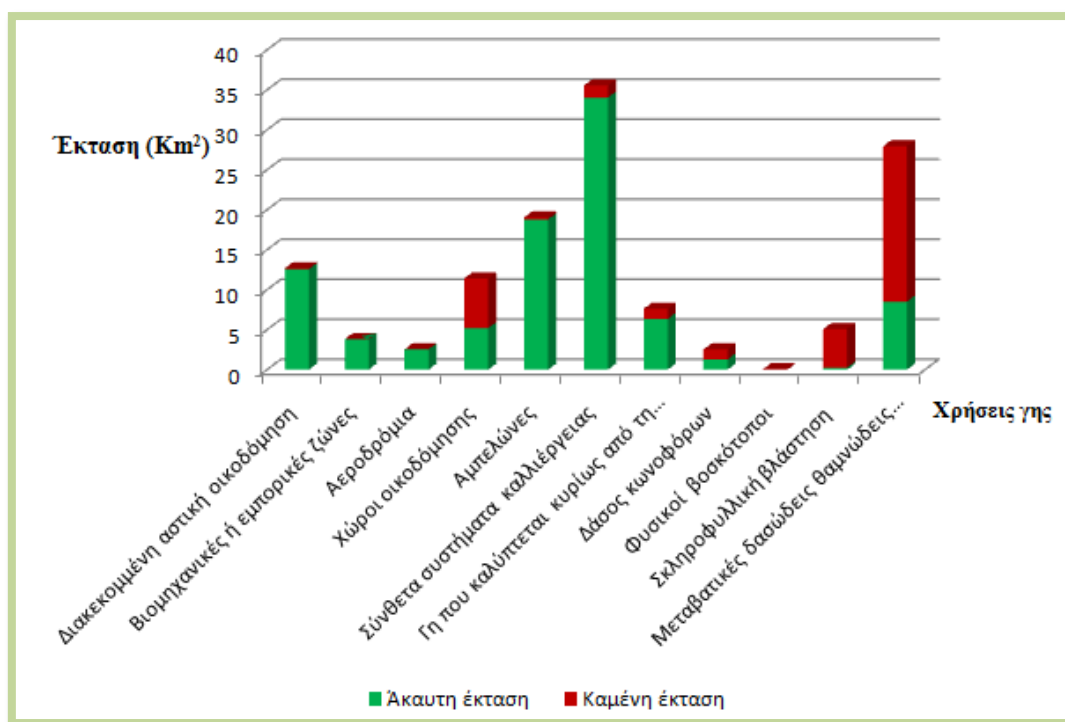


Εικόνα 4-3 Συνδυασμός καμένης έκτασης με χάρτη χρήσεων γης (αριστερά) και τιμών καμπύλης απορροής (δεξιά)

* Η διαδικασία της ψηφιοποίησης περιλαμβάνει την κρίση του εκάστοτε μελετητή. Παραλ'αυτά τα παραπάνω αποτελέσματα είναι σύμφωνα με την μελέτη του Υπουργείου ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε (Δελτίο Τύπου Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε/ 17-09-2009)

Πίνακας 4-3 Ποσοστό καμένης έκτασης ανά χρήση γης για την πυρκαγιά 2009

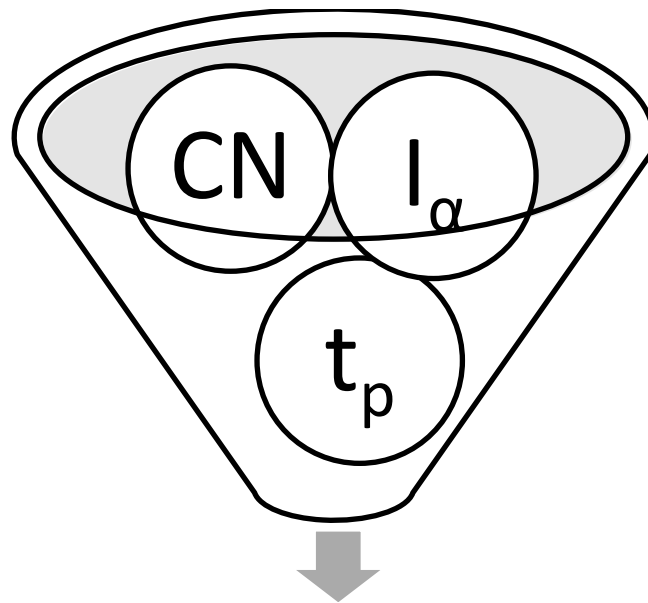
Κωδικός	Χρήση γης Corine	Ποσοστό καμένης έκτασης (%)	
		ανά χρήση	ανηγμένη σε όλη την λεκάνη
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0,7	0,1
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0,0	0,0
124	Αεροδρόμια	0,0	0,0
133	Χώροι οικοδόμησης	54,6	4,9
221	Αμπελώνες	1,5	0,2
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	4,2	1,2
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	16,5	1,0
312	Δάσος κωνοφόρων	48,2	1,0
321	Φυσικοί βοσκότοποι	100,0	0,1
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	93,8	3,8
324	Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	69,7	15,3



Διάγραμμα 4-1 Σχηματική απεικόνιση καμένης και άκαυτης έκτασης της λεκάνης ανά χρήση γης μετά την πυρκαγιά του 2009

Μετά την πυρκαγιά του 2009 όπως φαίνεται και από τον πίνακα 4-2 και διάγραμμα 4-1 μεγάλη καταστροφή παρατηρήθηκε στις δασικές εκτάσεις (δάσος κωνοφόρων, φυσικοί βοσκότοποι, σκληροφυλλική βλάστηση, μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις) με το συνολικό ποσοστό που επηρεάστηκε από την πυρκαγιά να ανέρχεται στο 20,2%. Αντίθετα, οι υπόλοιπες χρήσεις επηρεάστηκαν σε πολύ μικρότερο βαθμό. Αναλυτικότερα, οι αστικές περιοχές (διακεκομμένη αστική οικοδόμηση, χώροι οικοδόμησης) και οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις (αμπελώνες, σύνθετα συστήματα καλλιέργειας, γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης) επηρεάστηκαν σε ποσοστό 5,0% και 2,4% αντίστοιχα. Τέλος, καμία καταστροφή από την πυρκαγιά δεν παρατηρήθηκε στις βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες και στο αεροδρόμιο.

*Μεθοδολογία καθορισμού υδρολογικών
παραμέτρων μετά την πυρκαγιά*



5. Μεθοδολογία καθορισμού υδρολογικών παραμέτρων μετά την πυρκαγιά

5.1 Μέθοδος απωλειών βροχής: SCS Curve Number

Η μέθοδος του αριθμού καμπύλης (Soil Conservation Service Curve Number method, SCS-CN) χρησιμοποιείται ευρύτατα για την εκτίμηση της άμεσης απορροής για ένα γεγονός βροχόπτωσης. Η μέθοδος αυτή αρχικά αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Προστασίας των Εδαφών του Υπουργείου Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service) και περιγράφεται αναλυτικά στο σχετικό εγχειρίδιο National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology (NEH-4) (SCS 1956, 1964, 1971, 1985, 1993).

Η μέθοδος, λόγω κυρίως της απλότητάς της, σύντομα έγινε μια από τις πιο δημοφιλείς τεχνικές στη μελέτη της υδρολογίας μικρών υδρολογικών λεκανών (Mishra and Singh, 2006). Ο σημαντικότερος λόγος για την επιτυχία της είναι ότι λαμβάνει υπόψη τους κύριους παράγοντες που επιδρούν στο σχηματισμό άμεσης απορροής, συμπεριλαμβανομένων του τύπου του εδάφους, την κάλυψη και τη χρήση γης, των συνθηκών στην επιφάνεια του εδάφους και την προηγούμενη υγρασιακή κατάσταση, ενσωματώνοντάς τους σε μια μοναδική παράμετρο, τον αριθμό καμπύλης CN. Επιπρόσθετα, είναι η μόνη μεθοδολογία που χρησιμοποιεί εύκολα προσβάσιμα και καλά τεκμηριωμένα περιβαλλοντικά δεδομένα, ενώ επίσης είναι καθιερωμένη και ευρύτατα αποδεκτή στις Ηνωμένες Πολιτείες και σε πολλές άλλες χώρες μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα.

Οι σημαντικότερες αδυναμίες της μεθόδου SCS-CN είναι ότι δεν λαμβάνει υπόψη την ένταση και τη χρονική κατανομή της βροχόπτωσης, την επίδραση της χωρικής κλίμακας, είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στις μεταβολές της μοναδικής της παραμέτρου CN και δεν ενσωματώνει με σαφή τρόπο την επίδραση της προηγούμενης υγρασιακής κατάστασης (Hawkins, 1993, Ponce and Hawkins, 1996, Michel et al., 2005).

Παρότι η μέθοδος SCS-CN αρχικά αναπτύχθηκε στις Η.Π.Α. για τον υπολογισμό πλημμυρικών απορροών σε μικρές αγροτικές λεκάνες, σύντομα εξελίχθηκε πολύ πέρα από τον αρχικό της σκοπό και η χρήση της επεκτάθηκε για

διάφορες χρήσεις γης, όπως αστικές ή δασικές υδρολογικές λεκάνες (Rawls et al., 1981, Mishra and Singh, 1999).

Η μέθοδος SCS-CN βασίζεται στην εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου

$$P = I_a + F + Q \quad (5.1.1)$$

και στη βασική παραδοχή ότι ο λόγος της απορροής προς την ωφέλιμη βροχόπτωση είναι ίσος με το λόγο της πραγματικής κατακράτησης προς τη δυνητική κατακράτηση

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (5.1.2)$$

όπου P είναι το συνολικό ύψος βροχής, I_a είναι το ύψος της αρχικής κατακράτησης, F είναι η αθροιστική διήθηση αφαιρούμενης της I_a , Q είναι το ύψος της άμεσης απορροής και S είναι η δυνητική μέγιστη κατακράτηση. Από το συνδυασμό των εξισώσεων (5.1.1) και (5.1.2) προκύπτει η βασική μορφή της εξίσωσης της μεθόδου SCS-CN

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (5.1.3)$$

η οποία ισχύει για $P \geq I_a$, διαφορετικά $Q = 0$.

Βασιζόμενη σε μια δεύτερη παραδοχή, ότι δηλαδή η αρχική κατακράτηση είναι κλάσμα της δυνητικής μέγιστης κατακράτησης

$$I_a = \lambda S \quad (5.1.4)$$

η εξίσωση (3) γίνεται

$$Q = \frac{(P - \lambda S)^2}{P + (1 - \lambda)S} \quad (5.1.5)$$

Στην εξίσωση (5.1.5) το ποσοστό της αρχικής κατακράτησης συνήθως ορίζεται σε μια συγκεκριμένη τιμή ($\lambda = 0.2$) έτσι ώστε η δυνητική μέγιστη κατακράτηση S να παραμείνει η μόνη παράμετρος της μεθόδου. Επιπρόσθετα, η δυνητική μέγιστη κατακράτηση S εκφράζεται υπό τη μορφή της αδιάστατης παραμέτρου του αριθμού καμπύλης απορροής (curve number - CN) μέσω της σχέσης

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (5.1.6)$$

όταν το S εκφράζεται σε mm και παίρνει τιμές από 0, όταν $S \rightarrow \infty$, μέχρι 100, όταν $S = 0$.

Ο αριθμός καμπύλης CN, είναι αδιάστατος και οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ 0 και 100. Αναλυτικότερα, για αδιαπέρατες και υδάτινες επιφάνειες, η τιμή του CN είναι 100, ενώ για φυσικές επιφάνειες η τιμή του CN είναι μικρότερη από 100. Η εν λόγω παράμετρος, επηρεάζεται από τις συνθήκες εδάφους, τη χρήση γης στη λεκάνη απορροής καθώς και τις προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Οι συνθήκες της εδαφικής υγρασίας, εξαρτώνται από τη χρονική απόσταση της υπό μελέτη καταιγίδας από προηγούμενες καταιγίδες.

Η SCS εξετάζει τα διάφορα εδάφη σύμφωνα με την αρχική κατάσταση υγρασίας τους και τα κατατάσσει σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες, ενώ ως προς την υδρολογική τους συμπεριφορά τα κατατάσσει σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους (Τσακίρης, 1995).

Έτσι:

- ✚ Με βάση το συνολικό ύψος βροχής των προηγούμενων 5 ημερών διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες που χαρακτηρίζουν την αρχική κατάσταση υγρασίας του εδάφους (SCS (1956, 1964, 1971, 1985, 1993)) (πιν.5-1).

Πίνακας 5-1 Κατηγορίες με βάση την υγρασία του εδάφους

Κατηγορία	Συνολικό ύψος βροχής των 5 προηγούμενων ημερών (mm)	
	Χειμερινή περίοδος	Περίοδος βλάστησης
I	< 13	<35
II	13 - 28	35 - 53
III	> 28	> 53

☒ Κατηγορίες εδαφών από υδρολογική άποψη:

Κατηγορία A:

Εδάφη με υψηλή βασική διηθητικότητα και υψηλή διαπερατότητα. Συνήθως αμμώδη ή χαλικώδη εδάφη.

Κατηγορία B:

Εδάφη με μέτρια βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα που αποτελούνται από μέσης μέχρι ελαφριάς σύστασης εδάφη.

Κατηγορία C:

Εδάφη με μικρή βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Περιλαμβάνουν εδάφη μέσης μέχρι βαριάς σύστασης.

Κατηγορία D:

Εδάφη με πολύ μικρή βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Περιλαμβάνουν κυρίως αργιλώδη εδάφη, εδάφη με υψηλή στάθμη υπόγειου νερού ή με αδιαπέρατο στρώμα.

Για τις συνθήκες υγρασίας τύπου II, η SCS δίνει αναλυτικούς πίνακες με τιμές του CN για κάθε ομάδα εδαφών και για διάφορες χρήσεις γης.

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

$$CN_I = \frac{0.42 CN_{II}}{1 - 0.0058 CN_{II}} \quad (5.1.7)$$

$$CN_{III} = \frac{2.3 CN_{II}}{1 + 0.013 CN_{II}} \quad (5.1.8)$$

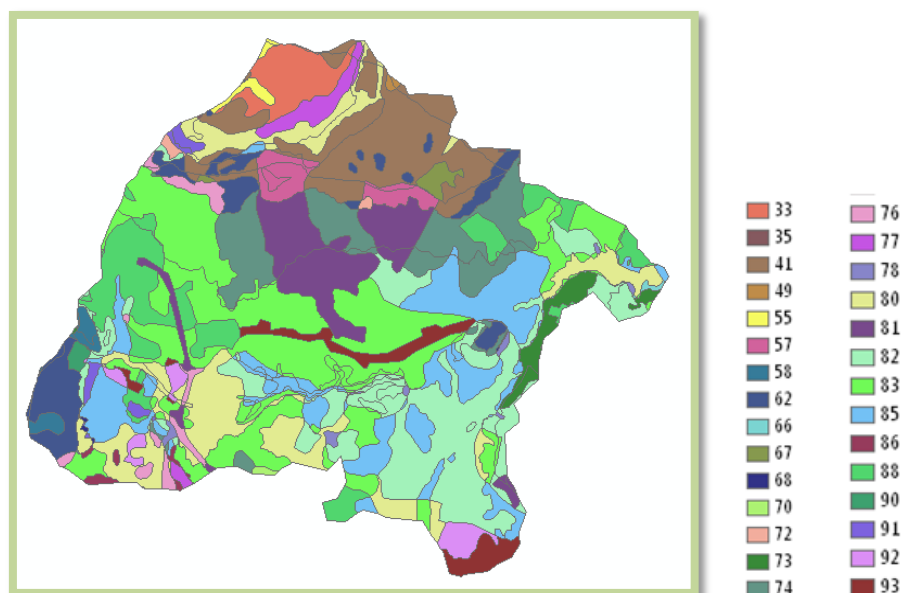
Οι τιμές του αριθμού καμπύλης CN, όπως προαναφέρθηκε, μπορούν να επιλεγθούν, με βάση τον τύπο εδάφους, την κάλυψη και τη διαχείριση τη γης, από πίνακες. Παρόλα αυτά, η εκτίμηση του αριθμού καμπύλης CN με τη χρήση πραγματικών δεδομένων βροχής - απορροής που προέρχονται από την ίδια ή γειτονική λεκάνη με αντίστοιχα χαρακτηριστικά είναι προτιμότερη.

Στην παρούσα πτυχιακή ο αριθμός καμπύλης CN επιλέχθηκε με βάση τη χρήση γης (Corine 2000) (Εικόνα 2-6) και τον τύπο του εδάφους (πίν. 5-2),

αναπαριστώντας τις συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή μελέτης πριν την εμφάνιση της πυρκαγιάς. Οι τιμές κυμαίνονται από 33 για περιοχές υψηλής διαπερατότητας μέχρι 93 για περιοχές σχεδόν αδιαπέρατες. Αναλυτικότερα, οι τιμές του CN για όλη την περιοχή μελέτης παρατίθενται στη παρακάτω εικόνα 5-1.

Πίνακας 5-2 Τιμές curve number (CN) ανάλογα της χρήσης γης Corine και Ομάδα υδροπερατότητας εδάφους (Κασσελά Α.)

Κωδικός	Χρήση γης Corine	Ομάδα υδροπερατότητας εδάφους			
		A	B	C	D
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	72	82	88	91
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	85	90	93	94
124	Αεροδρόμια	85	90	93	94
133	Χώροι οικοδόμησης	57	72	81	86
221	Αμπελώνες	67	78	85	89
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	67	76	83	86
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	62	74	82	85
312	Δάσος κωνοφόρων	35	58	73	80
321	Φυσικοί βοσκότοποι	49	69	79	84
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	33	55	70	77
324	Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	41	62	74	80



Εικόνα 5-1 Κάνναβος με τιμές curve number (CN) της περιοχής μελέτης πριν την πυρκαγιά

5.2 Καθορισμός τιμών CN μετά την πυρκαγιά

Στη διεθνή βιβλιογραφία γίνεται αναφορά σε δύο τρόπους καθορισμού των τιμών του αριθμού καμπύλης μετά την επίδραση της πυρκαγιάς. Πρώτον, στην επιλογή των τιμών βασισόμενη στην εμπειρία των επιστημόνων, χωρίς την αξιολόγηση δεδομένων που παρατηρούνται μετά από πυρκαγιά (BAER, 2000) και δεύτερον στον ακριβή υπολογισμό τους (Canfield et al, 2005, Springer και Hawkins, 2005). Για την πρώτη προσέγγιση, η διαδικασία που ακολουθείται συνήθως περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- ✚ Εντοπισμό περιοχής που επλήγη από πυρκαγιά μέσω δορυφορικής εικόνας (Εικόνα 3-10)
- ✚ Δημιουργία χάρτη έντασης πυρκαγιάς από αρχικά δεδομένα που καταγράφονται στο δορυφόρο (Εικόνα 5-2)
- ✚ Επαναπροσδιορισμός του χάρτη έντασης πυρκαγιάς μετά από έλεγχο των συνθηκών που επικρατούν μετά την πυρκαγιά στην περιοχή (Εικόνα 5-3)
- ✚ Προσδιορισμός εμπειρικών τιμών CN ανάλογα με την κατηγορία έντασης πυρκαγιάς

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της πρώτης προσέγγισης είναι η μελέτη του McLin (2001), όπου ερευνά τον κίνδυνο πλημμύρας στην περιοχή Pajarito Plateau στο Μεξικό, μετά την πυρκαγιά Cerro Grande, η οποία κατέκαψε 17.352 ha το Μάιο του 2000. Στην μελέτη αυτή ο McLin και οι συνεργάτες του, υιοθέτησαν τις τιμές CN που είχε αποδώσει η ομάδα BAER (Burned Area Emergency Rehabilitation) ανάλογα την ένταση της πυρκαγιάς στην εκάστοτε περιοχή (BAER, 2000). Συγκεκριμένα, για “low-severity” ορίστηκε η τιμή 75 (τροποποιήθηκε από την αρχική εκτίμηση της BAER που ήταν 65) ενώ για “moderate severity” και “high severity” 85 και 90 αντίστοιχα. Στην συνέχεια υπολογίστηκε μία τιμή CN λαμβάνοντας υπόψη τα ποσοστά της καμένης έκτασης ανάλογα την κατηγορία έντασης πυρκαγιάς, όπως αυτά καθορίστηκαν από την ομάδα BAER, (low -57% της συνολικής περιοχής, moderate -8%, high -34%) αποδίδοντας με αυτόν τον τρόπο βάρη στην κάθε τιμή του CN.

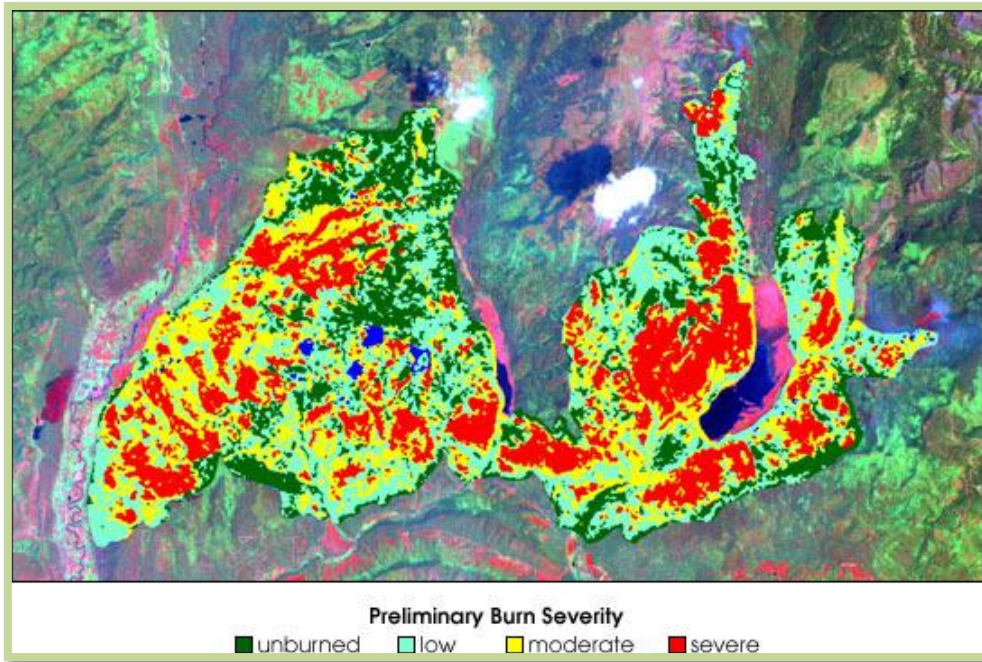
Για την πλήρη κατανόηση των προαναφερθέντων κρίνεται απαραίτητη μια σύντομη αναφορά στην έννοια της έντασης πυρκαγιάς ή “fire severity” όπως αναφέρεται στην διεθνή βιβλιογραφία.

Η “fire severity” είναι μία παράμετρος που κατηγοριοποιεί τις πυρόπληκτες περιοχές βάσει χαρακτηριστικών όπως η καταστροφή της δενδρώδους και θαμνώδους βλάστησης, η δημιουργία υδροφοβικού στρώματος, το χρώμα και το βάθος της στάχτης κ.α. Με τα προαναφερθέντα κριτήρια σχηματίζονται τέσσερις κατηγορίες (πίν. 5-3) :

Πίνακας 5-3 Κατηγορίες σφοδρότητας πυρκαγιάς

Διεθνής ορολογία	Ελληνική απόδοση
Low severity	Χαμηλής έντασης
Moderate severity	Μέτριας έντασης
High (severe) severity	Υψηλής έντασης
Unburned areas	Άκαυτες εκτάσεις

Ο διαχωρισμός των καμένων περιοχών στις παραπάνω κατηγορίες, δίνει την δυνατότητα στους επιστήμονες να εκτιμήσουν με περισσότερη ακρίβεια τις επιπτώσεις των πυρκαγιών, τόσο στο περιβάλλον της περιοχής όσο και στην υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης απορροής, με στόχο την κατάρτιση σχεδίων και την ανάληψη διαχειριστικών μέτρων για το μετριασμό των επιπτώσεων.



Εικόνα 5-2 Αρχικός χάρτης έντασης πυρκαγιάς.

Πηγή: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/BAER/baer2.php> (Monte Williams, USDAFS)



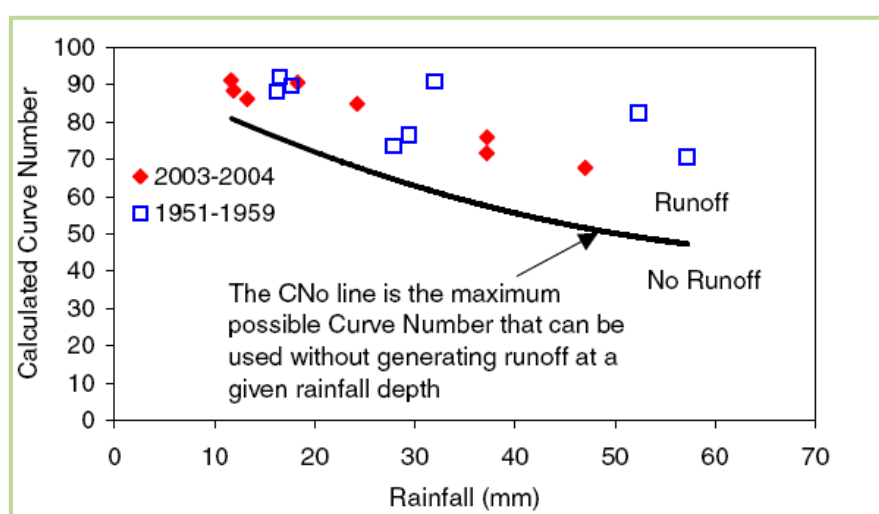
Εικόνα 5-3 Αεροφωτογραφία πυρόπληκτης περιοχής- Διαφοροποίηση μεταξύ των κατηγοριών έντασης πυρκαγιάς (οι περιοχές με πράσινα δέντρα υποδηλώνουν χαμηλή ένταση, ενώ οι περιοχές με καφέ και μαύρα δέντρα, μέτρια και υψηλή έντασης αντίστοιχα).

Πηγή: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/BAER/baer2.php> (Annette Parsons, USDAFS)

Αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει τις επιπτώσεις των πυρκαγιών στις φυσικές (Robichaud et al., 1993, Robichaud and Waldrop, 1994, Robichaud, 1996, Relayo, 2006), και τις υδραυλικές (Robichaud, 2000) ιδιότητες του εδάφους ανάλογα με την κατηγορία έντασης της πυρκαγιάς. Τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνών έδειξαν ότι όσο αυξάνεται η ένταση της πυρκαγιάς τόσο δυσμενέστερες είναι οι επιπτώσεις στις ιδιότητες του εδάφους και κατ'επέκταση στην εμφάνιση πλημμυρικών επεισοδίων. Χαρακτηριστικό όμως παράδειγμα για την σπουδαιότητα κατηγοριοποίησης των περιοχών ανάλογα με την ένταση πυρκαγιάς, είναι το αποτέλεσμα έρευνας των Kutiel and Inbar (1993) όπου αναφέρουν μηδενική αύξηση επιφανειακής απορροής και διάβρωσης σε περιοχή που χαρακτηρίστηκε ως χαμηλής έντασης.

Όσον αφορά τη δεύτερη προσέγγιση, οι τιμές του CN μπορούν να υπολογιστούν και άμεσα, από την χρήση δεδομένων βροχόπτωσης και απορροής (Hawkins, 1993). Την συγκεκριμένη μέθοδο του Hawkins υιοθέτησαν ο Canfield και οι συνεργάτες του, και υπολόγισαν τις τιμές του CN λαμβάνοντας υπόψη μετρήσεις βροχόπτωσης - απορροής για γεγονότα κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μουσώνων στην περιοχή Marchall Gulch την περίοδο 1951-1959 (πριν την πυρκαγιά) και 2003-2004 (μετά την πυρκαγιά) (Εικόνα 5-4). Από την παρακάτω εικόνα γίνεται αντιληπτό ότι μετά την πυρκαγιά δεν παρατηρήθηκε αύξηση του αριθμού καμπύλης.

Το αποτέλεσμα αυτό είναι σύμφωνο και με άλλες αντίστοιχες μελέτες (Hawkins, 1993, Springer και Hawkins, 2005)



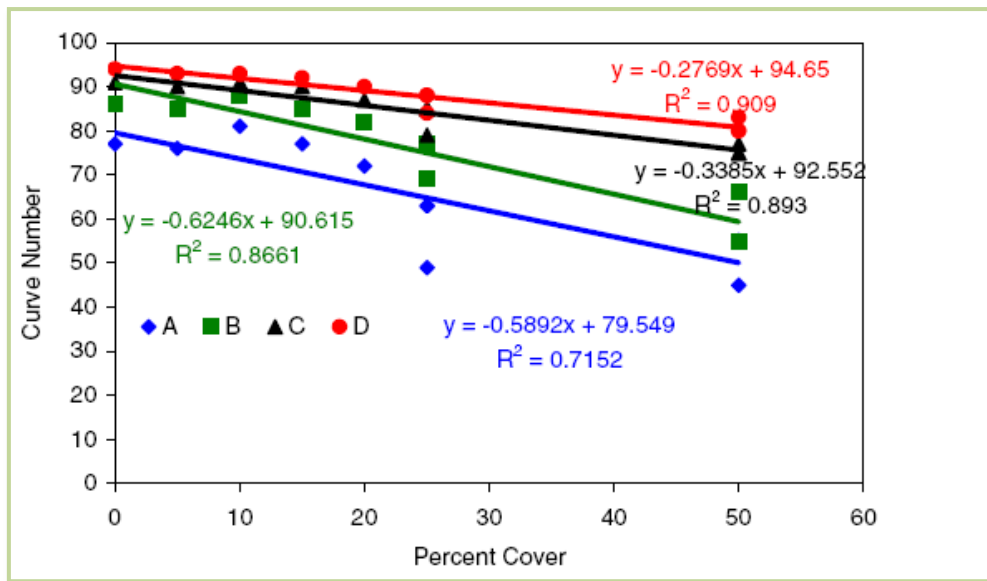
Εικόνα 5-4 Υπολογισμός τιμών αριθμού καμπύλης πριν και μετά την πυρκαγιά στην περιοχή Marchall Gulch. (Canfield et. al, 2005)

Εκτός από τις παραπάνω προσεγγίσεις, για τον καθορισμό των τιμών του αριθμού καμπύλης αναπτύχθηκε και μία άλλη μέθοδος (Goodrich, 2005). Κατά την μέθοδο αυτή αναπτύχθηκε μία σχέση μεταξύ του αριθμού καμπύλης και του ποσοστού κάλυψης. Αναλυτικότερα, συνδυάστηκαν οι τιμές CN για κάθε ομάδα υδροπερατότητας εδάφους (A, B, C, D) ανάλογα τις χρήσεις γης (USDA, 1986), με το ποσοστό κάλυψης της κάθε χρήσης (The National Land Cover Dataset- NLCD), παράγοντας μία «σχυρή» σχέση μεταξύ ποσοστού κάλυψης και CN. Η σχέση αυτή διαμορφώθηκε για φυσικές (εξαιρούνται καλλιεργήσιμες εκτάσεις) και για αστικές χρήσεις γης (Διάγραμμα 5-1). Σκοπός της μεθόδου είναι να τροποποιεί τις τιμές του CN μετά την πυρκαγιά, ανάλογα με το ποσοστό της κάλυψης που καταστράφηκε, για κάθε ομάδα υδροπερατότητας εδάφους ξεχωριστά (πίν.5-4).

Τέλος, στην συγκεκριμένη μελέτη οι τιμές του CN μετά την πυρκαγιά τροποποιήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη και το ποσοστό της έκτασης που κάηκε ανάλογα με την κατηγορία έντασης πυρκαγιάς που έχει χαρακτηριστεί.

Πίνακας 5-4 Τιμές CN για κάθε ομάδα υδροπερατότητας εδάφους (A, B, C, D) και οι χρήσεις γης καθώς επίσης και το ποσοστό της κάθε χρήσης (Goodrich, 2005 - μετά από επεξεργασία)

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



Διάγραμμα 5-1 Σχέσεις τιμών CN και ποσοστού κάλυψης για κάθε ομάδα υδροπερατότητας εδάφους (Goodrich, 2005)

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία λόγω της έλλειψης μελετών για την κατηγοριοποίηση των καμένων εκτάσεων ανάλογα με την ένταση πυρκαγιάς (fire severity) σε χαμηλής, μέτριας και υψηλής, αλλά και συνεκτιμώντας ότι στην περιοχή μελέτης επικρατεί η μεσογειακή βλάστηση, οπου όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1.4, λόγω των χαρακτηριστικών της είναι επιρρεπής σε πυρκαγιές, και συνήθως όταν υποστεί την επίδραση της πυρκαγιάς καταστρέφεται ολοσχερώς (Εικόνα 5-5,6). Με αφορμή τα παραπάνω, θα θεωρηθεί ότι το ποσοστό των εκτάσεων της λεκάνης, το οποίο επλήγη από την επίδραση πυρκαγιάς και συγχρόνως χαρακτηρίζεται ως δασικό (δάσος κωνοφόρων, φυσικοί βοσκότοποι, σκληροφυλλική βλάστηση, μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις), κάηκε ολοσχερώς, οπότε μετά την πυρκαγιά το ποσοστό κάλυψης ανέρχεται στο 0%. Σύμφωνα λοιπόν με τον παραπάνω πίνακα (πίν.5-4), για τις συγκεκριμένες εκτάσεις οι τιμές CN μετά την πυρκαγιά θα διαμορφωθούν σε 77, 86, 91, 94 για τις ομάδες υδροπερατότητας εδάφους A, B, C και D αντίστοιχα.

Όσον αφορά τον καθορισμό των τιμών CN μετά την πυρκαγιά για τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις σπουδαίο ρόλο παίζει η διαχειριστική πρακτική που ακολουθείται στις εκτάσεις αυτές. Για παράδειγμα, οι εκτάσεις αμπελώνων που καλλιεργούνται υπό ορθές καλλιεργητικές πρακτικές (καθορισμός χωραφιού από θαμνώδης και πώδης βλάστηση, ορθή άρδευση, κ.α) κατά του καλοκαιρινούς μήνες,

που κατά κύριο λόγο συμβαίνουν και οι πυρκαγιές, έχουν αναπτυχθεί πλήρως και συμπεριφέρονται ως καλλιέργειες. Σε αντίθεση, υπάρχουν εκτάσεις που χαρακτηρίζονται καλλιεργήσιμες, από το χάρτη χρήσεων γης (Corine 2000), αλλά λόγω ότι δεν εφαρμόζονται σε αυτές σωστές καλλιεργητικές πρακτικές ή ότι έχουν εγκαταλειφθεί πλήρως, κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς παύουν να συμπεριφέρονται ως καλλιέργειες και συμπεριφέρονται ως θαμνώδεις (ή λιβαδικές) εκτάσεις. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό, ότι για τις δύο προαναφερθέντες κατηγορίες θα διαμορφώνονται διαφορετικές τιμές CN μετά την πυρκαγιά. Στην πρώτη κατηγορία, οι τιμές θα τροποποιηθούν σύμφωνα με τις τιμές που ισχύουν για τις χέρσες εκτάσεις (πίν 5-4), δηλαδή 76, 85, 90, 93 για τις ομάδες υδροπερατότητας εδάφους A, B, C και D αντίστοιχα. Ενώ στην δεύτερη κατηγορία, οι τιμές του CN μετά την πυρκαγιά θα είναι ίδιες με αυτές των καμένων δασικών εκτάσεων. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, λόγω έλλειψης στοιχείων για την πραγματική κατάσταση των καλλιεργήσιμων εκτάσεων, γίνεται η παραδοχή ότι ως καλλιεργήσιμες εκτάσεις συμπεριφέρονται οι αμπελώνες και τα σύνθετα συστήματα καλλιέργειας, ενώ η γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης, κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς, συμπεριφέρεται ως λιβαδική (ή δασική) έκταση.

Τέλος, οι τιμές του αριθμού καμπύλης για τις αστικές χρήσεις (διακεκομμένη αστική οικοδόμηση, χώροι οικοδόμησης) θα παραμείνουν ίδιες με τις τιμές πριν την πυρκαγιά λόγω ότι δεν μεταβάλλεται η χρήση γης τους μετά το πέρας της πυρκαγιάς.

Σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές καταρτίστηκε ο πίνακας 5-5.

Πίνακας 5-5 Τιμές CN για συνθήκες πριν και μετά την επίδραση πυρκαγιάς ανάλογα με τη χρήση γης και την ομάδα υδροπερατότητας του εδάφους της υπό μελέτη περιοχής

Χρήσεις γης	Ομάδα υδροπερατότητας εδάφους	CN πριν την πυρκαγιά	CN μετά την πυρκαγιά
Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	A	72	72
	B	82	82
	C	88	88
	D	91	91
Χώροι οικοδόμησης	A	57	57
	B	72	72
	C	81	81
	D	86	86
Αμπελώνες	B	85	85
	BC	82	88
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	A	67	76
	B	76	85
	BC	80	88
	C	83	90
Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	A	62	77
	BC	80	89
	C	83	91
	D	85	94
Δάσος κωνοφόρων	A	35	77
	BC	66	89
	C	73	91
	D	80	94
Φυσικοί βοσκότοποι	A	49	77
Σκληροφυλλική βλάστηση	A	33	77
	B	55	86
	D	77	94
Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	A	41	77
	B	62	86
	C	74	91
	D	80	94



(α)



(β)

Εικόνα 5-5 α,β. Ολοκληρωτική καταστροφή μεσογειακής βλάστησης στην περιοχή μελέτης - πυρκαγιά 2009

Πηγή: Προσωπικό αρχείο Σούλη Κ.



(α)



(β)

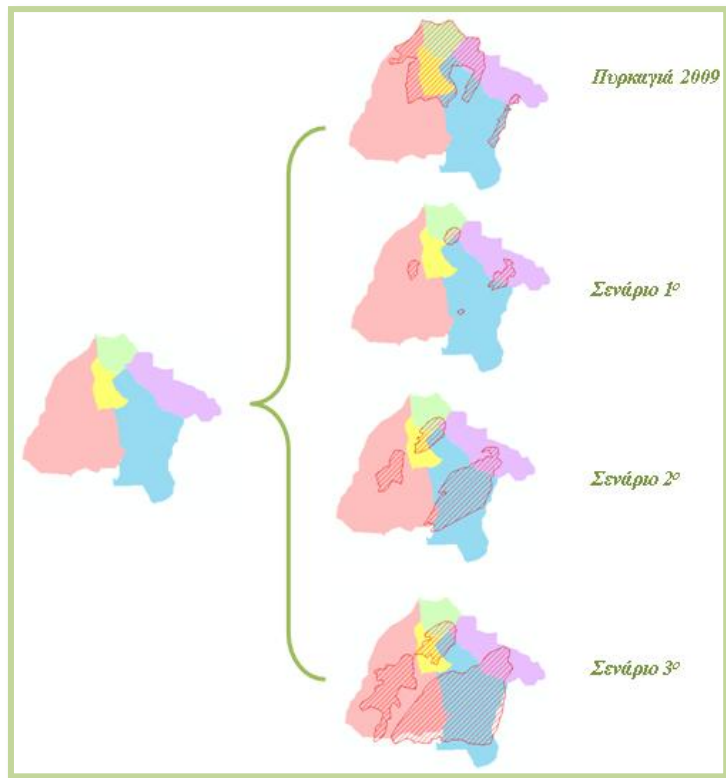
Εικόνα 5-6 α,β. Ολοκληρωτική καταστροφή μεσογειακής βλάστησης- εκτός περιοχής μελέτης α) Μεσσηνία β) Πάρνηθα

5.3 Μεθοδολογία επαναπροσδιορισμού υδρολογικών παραμέτρων

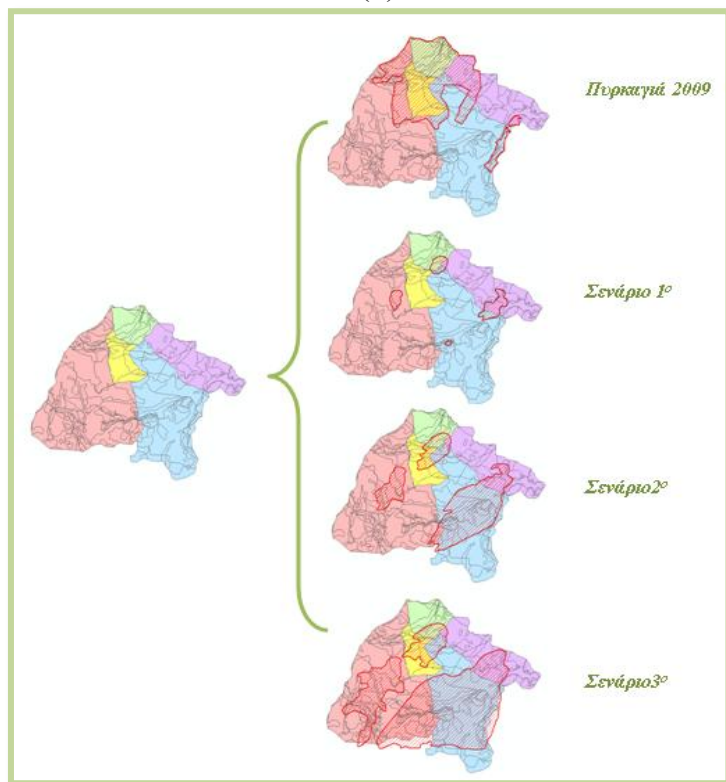
5.3.1 Επαναπροσδιορισμός Αριθμού καμπύλης (CN) μετά την πυρκαγιά

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι ο υπολογισμός πέντε νέων αριθμών καμπύλης, για κάθε υπολεκάνη, οι οποίοι θα αντικατροπτίζουν τις συνθήκες μετά την πυρκαγιά. Οι τιμές CN που θα προκύψουν θα διαφοροποιούνται από τις προηγούμενες τιμές ανάλογα με το βαθμό επίδρασης των πυρκαγιών – πραγματική πυρκαγιά το 2009, αλλά και των τριών σεναρίων - στην εκάστοτε υπολεκάνη. Η δυσκολία της παραπάνω διαδικασίας έγκειται στη μεγάλη διαφοροποίηση των εκτάσεων που επηρεάζονται από τις υπό μελέτη πυρκαγιές παρουσιάζοντας ανομοιομορφία καμένης και άκαυτης έκτασης τόσο σε επίπεδο υπολεκάνης (Εικόνα 5-1α) όσο και σε επίπεδο πολυγώνου (χρήση γης-ομάδα υδροπερατότητας) (Εικόνα 5-2β). Για την αντιμετώπιση της παραπάνω δυσκολίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcGis, διευκολύνοντας τη διαδικασία εντοπισμού των καμένων εκτάσεων και την αναγωγή τους σε ποσοστά σε σχέση με την συνολική έκταση της υπολεκάνης. Επιπλέον έχοντας δημιουργήσει τον κάρναβο αριθμού καμπύλης (CN) πριν την πυρκαγιά (Εικόνα 5-1) το ArcGis δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να παρέμβει με άμεσο τρόπο, αλλάζοντας τις τιμές CN των συγκεκριμένων πολυγώνων που επηρεάστηκαν από την πυρκαγιά.

Αναλυτικότερα, η ακριβής μεθοδολογία που ακολουθηθήκε περιλαμβάνει δύο στάδια και περιγράφεται ως εξής:



(α)



(β)

Εικόνα 5-7 Διαφοροποίηση πυρόπληκτων εκτάσεων σε επίπεδο α) υπολεκανών
β) πολυγώνων από τις υπό μελέτη πυρκαγιές

❏ Επεξεργασία δεδομένων στο ArcGis

Κύριος στόχος της επεξεργασίας των δεδομένων στο λογισμικό ArcGis είναι ο υπολογισμός των εμβαδών των πολυγώνων που περιέχονται σε κάθε υπολεκάνη, των καμένων πολυγώνων για κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά και των υπολεκανών συνολικά. Η διαδικασία υπολογισμού περιλαμβάνει τις εξής διεργασίες :

- ❏ Δημιουργία βοηθητικού grid mask για κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά (όπου όλα τα κύτταρα εντός της υπολεκάνης έχουν την τιμή 0, ενώ τα υπόλοιπα την τιμή no data).
- ❏ Μετατροπή της μάσκας της κάθε υπολεκάνης από μορφή καννάβου (grid) σε διανυσματική μορφή (vector-shape file).
- ❏ Εξαγωγή αρχείων διανυσματικής μορφής, τα οποία περιέχουν τα πολύγωνα χρήσεων γης και ομάδων υδροπερατότητας καθώς και την πληροφορία του αριθμού καμπύλης πριν την πυρκαγιά σε επίπεδο πολυγώνου, για κάθε υπολεκάνη.
- ❏ Υπολογισμός εμβαδών των πολυγώνων που περιέχονται εντός των ορίων των πέντε υπολεκανών.
- ❏ Αφαίρεση των παραπάνω διανυσματικών αρχείων με τα διανυσματικά αρχεία των υπό μελέτη πυρκαγιών (πυρκαγιά 2009, σενάριο 1^ο, σενάριο 2^ο, σενάριο 3^ο).
- ❏ Υπολογισμός εμβαδών των καμένων πολυγώνων.
- ❏ Υπολογισμός εμβαδού κάθε υπολεκάνης (η συγκεκριμένη διεργασία μπορεί να εκτελεστεί και στην αρχή της διαδικασίας).

❏ Επεξεργασία δεδομένων στο Excel

Κύριος στόχος της επεξεργασίας των δεδομένων στο Excel είναι ο υπολογισμός των ποσοστών της καμένης έκτασης ως προς στη συνολική έκταση της υπολεκάνης και ο υπολογισμός ενός σταθμισμένου αριθμού καμπύλης για κάθε υπολεκάνη. Οι τιμές των CN, στα πολύγωνα που έχουν επηρεαστεί από την πυρκαγιά, διαφοροποιούνται βάσει της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην ενότητα 5-2.

Η διαδικασία υπολογισμού περιλαμβάνει τις εξής διεργασίες:

- ⊕ Υπολογισμός ποσοστού λ , όπου το λ είναι ίσο με το ποσοστό της καμένης έκτασης του πολυγώνου ως προς στη συνολική έκταση της υπολεκάνης
- ⊕ Αλλαγή των τιμών CN στα καμένα πολύγωνα
- ⊕ Υπολογισμός σταθμισμένης τιμής CN των καμένων εκτάσεων για κάθε υπολεκάνη σύμφωνα με τον τύπο του σταθμισμένου μέσου όρου,

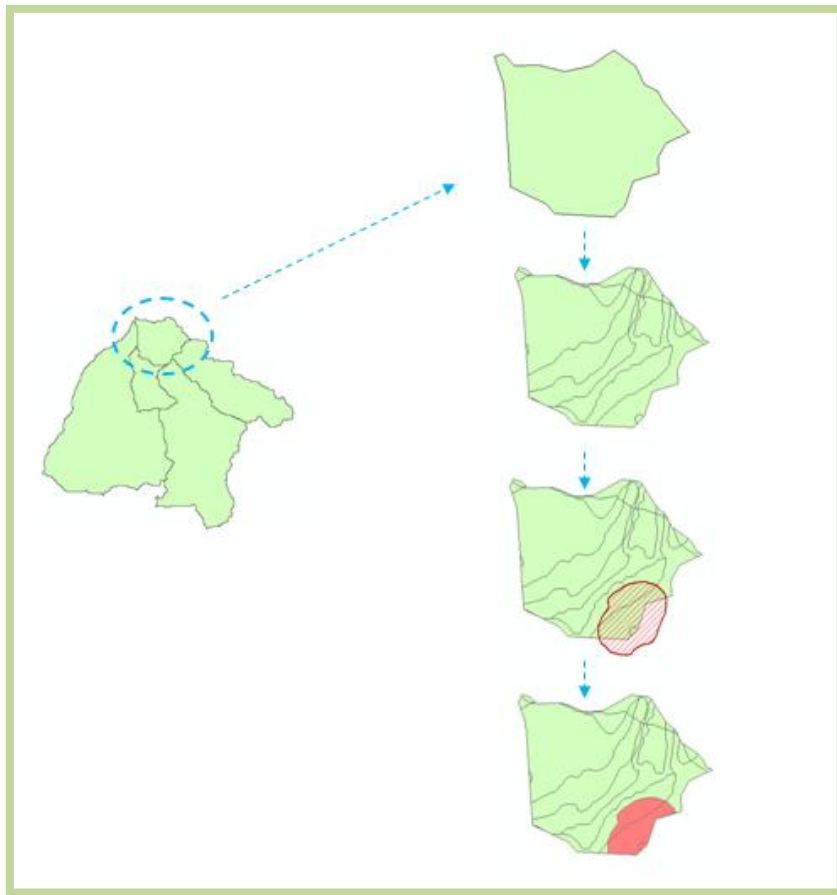
$$\overline{CN} = \frac{\sum_{i=0}^n (\lambda_i CN_i)}{\sum_{i=0}^n (\lambda_i)} = \frac{\lambda_1 CN_1 + \dots + \lambda_n CN_n}{\lambda_1 + \dots + \lambda_n} \quad (5.3.1.1)$$

όπου λ_i ονομάζεται ο συντελεστής βαρύτητας του i στοιχείου CNi

- ⊕ Υπολογισμός σταθμισμένης τιμής CN της κάθε υπολεκάνης με βάση τον τύπο,

$$\begin{aligned} \overline{CN}_{\text{subb}} = & \text{ποσοστό καμένης έκτασης} \times \overline{CN} \text{ (καμένων εκτάσεων)} \\ & + \\ & \text{ποσοστό άκαυτης} \times \text{CN (πριν την πυρκαγιά)} \end{aligned} \quad (5.3.1.2)$$

Για την καλύτερη κατανόηση των προαναφερθέντων διεργασιών παρατίθεται παράδειγμα για την βόρεια υπολεκάνη της περιοχής μελέτης και μόνο για το 1^ο σενάριο πυρκαγιάς. Συγκεκριμένα, παρατίθενται σχηματική απεικόνιση των διεργασιών και πίνακες των αποτελεσμάτων αυτών. Η συγκεκριμένη διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις υπόλοιπες υπολεκάνες και για όλες τις υπό μελέτη πυρκαγιές ξεχωριστά.



Εικόνα 5-8 Σχηματική απεικόνιση διεργασιών στο ArcGis

Πίνακας 5-6 Αποτελέσματα των διεργασιών στο ArcGis

Κωδικός	Χρήσεις γης	Ομάδα υδροπερατότητας	Cn πριν την πυρκαγιά	Εμβαδό πολυγώνου στη λεκάνη (m ²)	Εμβαδό πολυγώνου στην υπολεκάνη (m ²)	Εμβαδό καμένου πολυγώνου στην υπολεκάνη (m ²)	Εμβαδό υπολεκάνης (m ²)
324	Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	B	62	38051	16561	16561	7971227
324	Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	A	41	1090196	861756	312321	
324	Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	A	41	6147116	914109	513082	

Πίνακας 5-7 Αποτελέσματα διεργασιών στο Excel

Καμένη έκταση/ Έκταση υπολεκάνης (λ.)	Σταθμισμένο CN				
	CN μετά την πυρκαγιά	λ*CN μετά	Σύνολο (λ*CN μετά)	Σύνολο λ	CN καμένων εκτάσεων
0,002	86	0,179	8,152	0,106	77,177
0,039	77	3,017			
0,064	77	4,956			

Πίνακας 5-8 Τελική τιμή CN υπολεκάνης

Ποσοστό καμένης έκτασης	CN καμένων εκτάσεων	Ποσοστό άκαυτης έκτασης	CN άκαυτων εκτάσεων	Τελική τιμή CN
0,11	77,18	0,89	35,00	40,00

5.3.2 Επαναπροσδιορισμός αρχικής κατακράτησης (I_a)

Η αρχική κατακράτηση (I_a), όπως προαναφέρθηκε και στην υποενότητα 5.1 ορίζεται ως κλάσμα της δυνητικής μέγιστης κατακράτησης (S) σύμφωνα με τον τύπο (5.1.4). Από πρόσφατη έρευνα (Baltas et al., 2007) σε τμήμα της περιοχής μελέτης, και συγκεκριμένα στην πειραματική λεκάνη (X-basin) του εργαστηρίου Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων (ΕΜΠ), η οποία αποτελεί μέρος της υπό μελέτη περιοχής εκτιμήθηκε ότι η τιμή του κλάσματος αρχικής κατακράτησης - δυνητικής μέγιστης κατακράτησης (I_a/S) διαφοροποιείται από την τιμή 0,2 που ορίζει η μέθοδος απωλειών της SCS. Η διαφοροποίηση αποδόθηκε στην ανομοιόμορφη χωρική κατανομή των χρήσεων γης της πειραματικής λεκάνης.

Από τη βαθμονόμηση του μοντέλου, στο πλαίσιο της πτυχιακής εργασίας της φοιτήτριας Κασσελά,(2011) προέκυψαν τιμές για το κλάσμα (I_a/S) (πίν 5-9), οι οποίες είναι αποδεκτές σύμφωνα με την προαναφερθείσα μελέτη.

Πίνακας 5-9 Τιμές κλάσματος (I_a/S) και αρχικής κατακράτησης για την κάθε υπολεκάνη (Κασσελά Α.)

Υπολεκάνες	Αρχική Κατακράτηση (mm)	Κλάσμα (I_a/S)
1	5	0,03
2	17,4	0,037
3	3	0,01
4	5	0,02
5	3,2	0,05

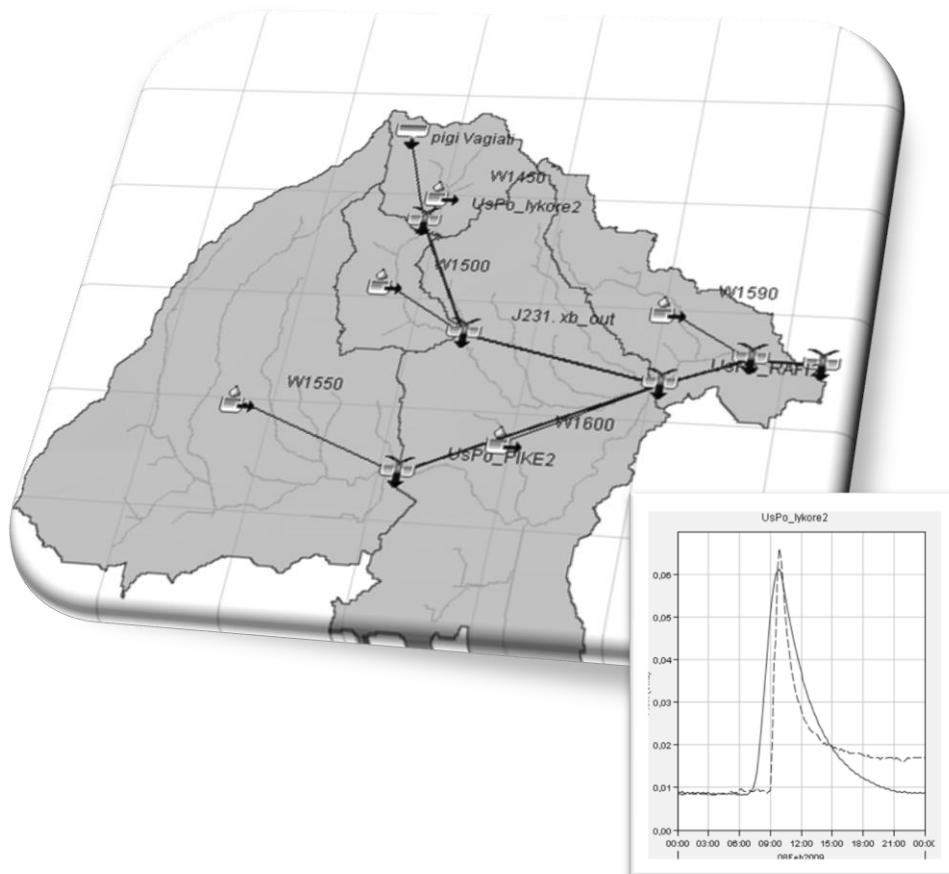
Για την ανάγκη υπολογισμού των τιμών της αρχικής κατακράτησης μετά την επίδραση των υπό μελέτη πυρκαγιών, υπολογίστηκε η νέα τιμή της δυνητικής μέγιστης κατακράτησης, σύμφωνα με τον τύπο (5.1.6) εισάγοντας στον αριθμό CN τις τελικές τιμές του αριθμού καμπύλης για μετά την πυρκαγιά, για κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά, και πολλαπλασιάστηκε με τις εκτιμημένες τιμές του κλάσματος (I_a/S).

5.3.3 Επαναπροσδιορισμός χρόνου υστέρησης

Για τον προσδιορισμό του χρόνου υστέρησης μετά την επίδραση πυρκαγιάς, αρχικά διερευνήθηκε ο υπολογισμός του με τη μέθοδο του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος της SCS – UH –. Οι υπολογισμένες τιμές με την παραπάνω μέθοδο, υπερεκτιμούσαν σε μεγάλο βαθμό το χρόνο υστέρησης που είχε υπολογιστεί, για κάθε υπολεκάνη, με τη μέθοδο συνθετικού υδρογραφήματος του Snyder, μέθοδος που είχε επιλεγεί για την κατάρτιση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS για την υπό μελέτη περιοχή (βλ. ενότητα 6.2.3). Συνεκτιμώντας την αστοχία της παραπάνω διερεύνησης αλλά και την ακαταλληλότητα της μεθόδου του Snyder να αντιπροσωπεύσει συνθήκες μετά την επίδραση πυρκαγιάς, λόγω των εμπειρικών συντελεστών που διαθέτει, για τον επαναπροσδιορισμό του χρόνου υστέρησης πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα.

Κεφάλαιο 6

Υδρολογική Προσομοίωση της λεκάνης απορροής



6. Υδρολογική Προσομοίωση της λεκάνης απορροής

6.1 Υδρολογικό Μοντέλο

Στο πλαίσιο της εργασίας για την ανάλυση της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης σε συνθήκες πριν και μετά από την επίδραση πυρκαγιάς χρησιμοποιήθηκε το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System) το οποίο σχεδιάστηκε από το σώμα μηχανικών του Αμερικανικού στρατού – USACE (United States Army Corps of Engineers). Το HEC-HMS προσομοιώνει τις διαδικασίες βροχής – απορροής των λεκανών με δένδροειδή μορφή.

Εφαρμόζεται τόσο σε φυσικές λεκάνες όσο και σε αστικές, για την επίλυση πολλών προβλημάτων. Παραδείγματος χάριν, για τον υπολογισμό των υδατικών αποθεμάτων σε λεκάνες μεγάλων ποταμών και των πλημμυρικών τους παροχών καθώς επίσης και για την εκτίμηση των απορροών σε μικρές, αστικές ή μη, λεκάνες. Τα υδρογραφήματα που παράγει το πρόγραμμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε απευθείας είτε σε συνδυασμό με άλλα λογισμικά, όπως το HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System), ή ArcView's Global Imaging System, για μελέτες διαθεσιμότητας υδατικών πόρων, αποχέτευσης αστικών περιοχών, πρόβλεψης απορροών, επίδρασης αστικοποίησης, σχεδίασης ταμιευτήρων, αποκατάστασης ζημιών από πλημμύρες, θέσπισης κανονισμών και λειτουργίας συστημάτων για τις περιοχές που πλήττονται από πλημμύρες.

(<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>)

Αρκετές μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει το μοντέλο HEC-HMS σε κοινές εφαρμογές όπως η προσομοίωση πλημμυρικών αιχμών και όγκων, για μεμονωμένα υδρολογικά γεγονότα (Pistocchi and Mazzoli, 2002, Markar et al, 2004, Neary et al., 2004, Knebl et al., 2005) ενώ ελάχιστες έχουν εφαρμόσει το μοντέλο για την εκτίμηση της υδρολογικής απόκρισης λεκανών οι οποίες έχουν πληγεί από πυρκαγιές. (McLin et al., 2001, Cydzik and Hogue., 2009). Πιο συγκεκριμένα, οι McLin et al., (2001) εφάρμοσαν τα μοντέλα HEC-HMS και HEC-RAS για να οριοθετήσουν τις περιοχές πλημμυρικής κατάκλυσης μετά την πυρκαγιά Cerro Grande στο Βόρειο Μεξικό. Η βαθμονόμηση του μοντέλου HEC-HMS πραγματοποιήθηκε με την χρήση διαφόρων τιμών απορροής και στην συνέχεια εφαρμόστηκαν γεγονότα καταιγίδας για

να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις της πυρκαγιάς στις περιοχές που θεωρούνται ευάλωτες σε πλημμύρες. Στόχος της μελέτης ήταν η διερεύνηση των επιπτώσεων των πυρκαγιών στην πλημμυρική απορροή της υπό μελέτη λεκάνης, την περίοδο αμέσως μετά την πυρκαγιά.

Από την άλλη πλευρά, οι Cydzik και Hogue (2009) στόχευσαν την έρευνά τους στην εκτίμηση του χρόνου ανάκαμψης της υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης σε επίπεδα πριν την πυρκαγιά, καθώς επίσης και στην εκτίμηση αξιοπιστίας του μοντέλου HEC–HMS όσον αφορά την εφαρμογή του σε παρόμοιες συνθήκες.

Με αφορμή την παραπάνω έρευνα, κατά την οποία διαπιστώνεται η καταλληλότητα του μοντέλου HEC–HMS για την προσομοίωση της υδρολογικής απόκρισης πυρόπληκτων λεκανών αλλά και την κατάρτιση του συγκεκριμένου μοντέλου για την περιοχή μελέτης σε συνθήκες πριν την εμφάνιση της πυρκαγιάς του 2009, από την φοιτήτρια Κασσελά Α. στο πλαίσιο της πτυχιακής εργασίας, επιλέχθηκε το υδρολογικό μοντέλο HEC–HMS στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

6.2 Υδρολογική Προσομοίωση λεκάνης πριν την πυρκαγιά

Παρότι το κεφάλαιο αυτό ξεφεύγει από την δικαιοδοσία της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, για την πληρέστερη αποτύπωση των διεργασιών του μοντέλου, όσον αφορά την εκτίμηση της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης απορροής σε συγκεκριμένα επεισόδια βροχόπτωσης πριν την επίδραση της πυρκαγιάς, κρίθηκε απαραίτητη η περιγραφή των βημάτων κατάρτισης του μοντέλου HEC–HMS.

6.2.1 Γεωμορφολογική και Υδρολογική Ανάλυση Λεκάνης

Η ανάλυση των γεωμορφολογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης πραγματοποιείται μέσω της εργαλειοθήκης ArcHydro και της επέκτασης HEC-GeoHMS του ArcGis.

Το HEC-GeoHMS είναι μία επέκταση του ArcMap, η οποία αναπτύχθηκε ως ένα γεω-χωρικό (geo-spatial) εργαλείο υδρολογίας, για υδρολόγους μηχανικούς με περιορισμένη εμπειρία σε συστήματα γεωγραφικής πληροφορίας. Το πρόγραμμα επιτρέπει στο χρήστη να οπτικοποιεί τη χωρική πληροφορία, να καταγράφει

χαρακτηριστικά της λεκάνης, να οριοθετεί υπολεκάνες και ρέματα, να παράγει αρχεία εισόδου σε υδρολογικά μοντέλα κλπ.(HEC-GeoHMS manual) Αναλυτικότερα, το HEC-GeoHMS χρησιμοποιεί ως αρχεία εισόδου το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM), το υδρογραφικό δίκτυο -το οποίο έχει προέλθει από την επεξεργασία του μοντέλου εδάφους μέσω της εργαλειοθήκης ArcHydro- ψηφιακούς χάρτες με τους τύπους εδαφών και χρήσεων γης και δημιουργεί αρχείο χάρτη (background map file) όπου οπτικοποιούνται οι υπολεκάνες απορροής και τα υδατορεύματα της περιοχής μελέτης, και αρχείο μοντέλου της λεκάνης απορροής (basin model file) όπου περιέχει τα υδρολογικά και γεωμορφολογικά στοιχεία της λεκάνης, τα οποία στην συνέχεια θα χρησιμοποιηθούν ως αρχεία εισόδου στο μοντέλο HEC-HMS. Επίσης το HEC-GeoHMS δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργήσει αρχείο μετεωρολογικού μοντέλου και αρχείο παραμέτρων σε κατανεμημένη μορφή αν και οι διεργασίες αυτές μπορούν να εκτελεστούν και απευθείας από το περιβάλλον του HEC-HMS.

Συμπερασματικά, οι διεργασίες που επιτελούνται είναι οι εξής:

- Προεπεξεργασία του μοντέλου εδάφους
- Δημιουργία και επεξεργασία λεκάνης απορροής
- Εξαγωγή τοπογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης
- Επιλογή προτύπων υπολογισμού υδρολογικών παραμέτρων
- Δημιουργία αρχείων εισόδου HEC-HMS

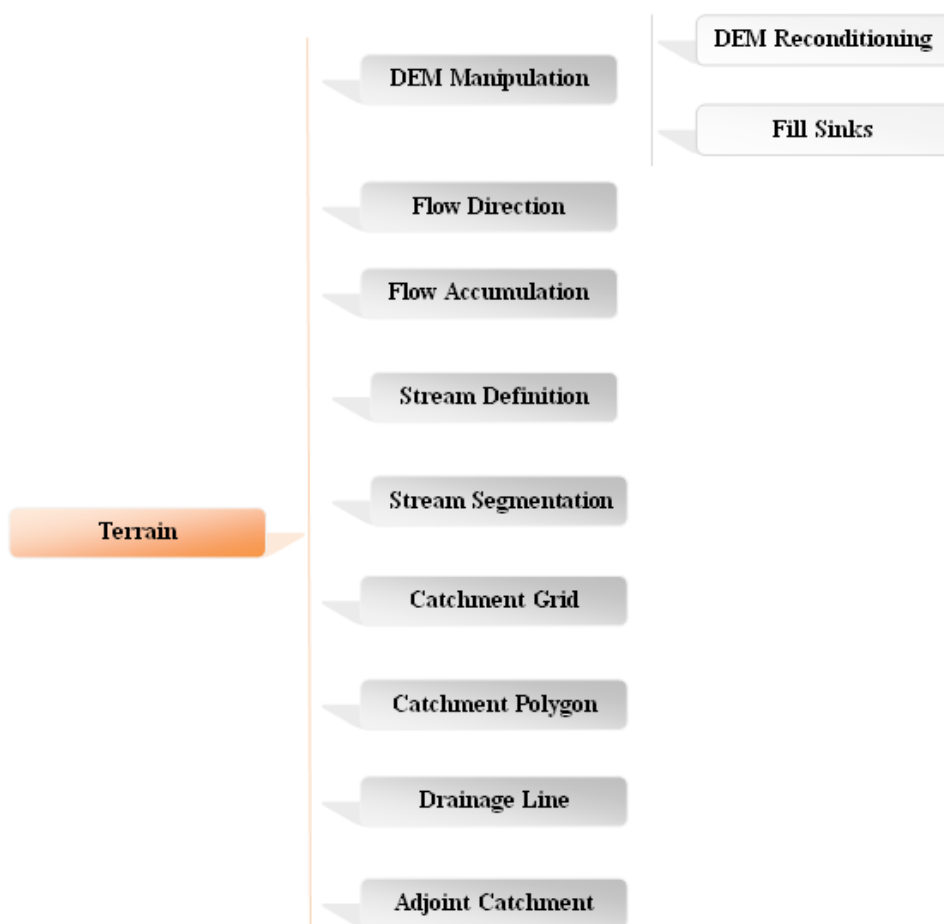
Προεπεξεργασία του μοντέλου εδάφους (Terrain Preprocessing)

Το πακέτο εντολών του Terrain Preprocessing, το οποίο συμπεριλαμβάνεται στην εργαλειοθήκη ArcHydro του ArcGis, καθιστά εφικτή την επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, εξάγοντας χρήσιμα συμπεράσματα για τα γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά του. Σημαντικό αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι κατάρτιση του υδρογραφικού δικτύου και ο σχηματισμός υπολεκανών. Στο διάγραμμα 6-1 δίνεται σχηματικά η διαδικασία προεπεξεργασίας του μοντέλου μέσω του πακέτου εντολών Terrain Preprocessing ενώ η λειτουργία της κάθε εντολής περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

• DEM Reconditioning (Επιδιόρθωση ψηφιακού μοντέλου εδάφους)

Η εντολή αυτή ανακατατάσσει τα κελιά του καννάβου του ψηφιακού μοντέλου εδάφους κατά μήκος των ρεμάτων με σκοπό να διορθώσει λανθασμένα ή

ελλειπή υψόμετρα. Η λειτουργία αυτή είναι απαραίτητη, καθώς στο αρχικό μοντέλο εδάφους πιθανότατα υπάρχουν ελλειπή δεδομένα αποτύπωσης της υψομετρίας κατά μήκος των ρεμάτων κάτι το οποίο μπορεί να διορθωθεί με την αξιοποίηση του ψηφιοποιημένου υδρογραφικού δικτύου (Merwade 2008). Η μέθοδος που χρησιμοποιείται ονομάζεται AGREE και αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Τέξας. (<http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/GISHYDRO/ferdi/research/agree/agree.html>)



Διάγραμμα 6-1 Διαδικασία προεπεξεργασίας μοντέλου εδάφους μέσω του πακέτου εντολών Terrain Preprocessing

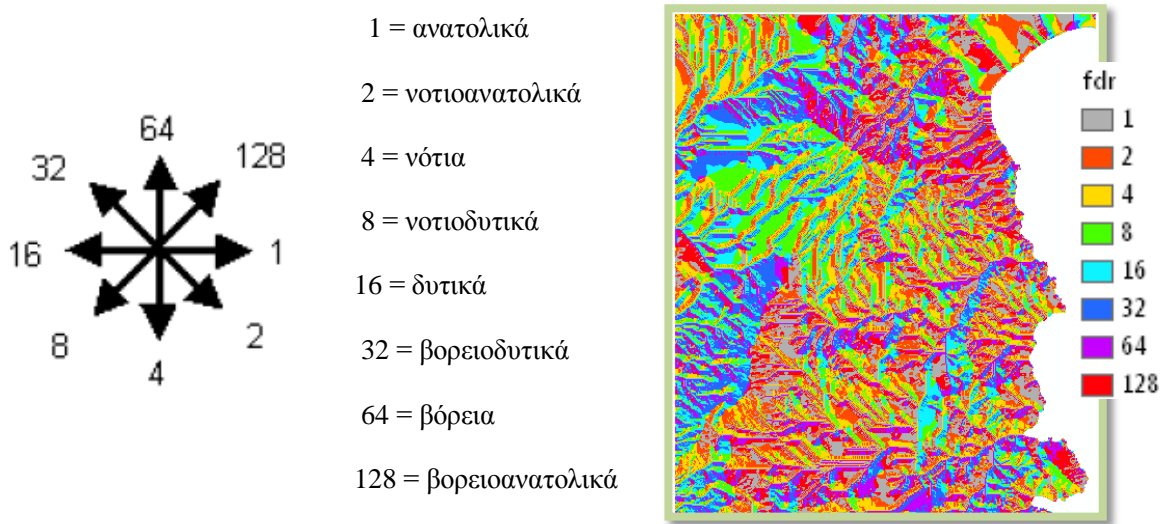
☒ Fill Sinks (Γέμισμα Βυθισμάτων)

Λόγω έλλειψης δεδομένων υψομέτρου στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) δημιουργούνται ψευδή τμήματα (κενά - βυθίσματα) τα οποία πρέπει να διορθωθούν έτσι ώστε να μην υπάρχουν σημεία στο DEM που να εγκλωβίζεται το νερό,

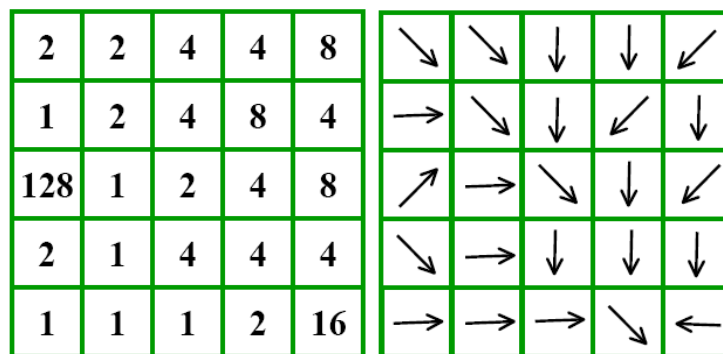
παρακωλύοντας την ροή του. Στην πράξη μέσω της εντολής το πρόγραμμα εντοπίζει τα κύτταρα που είναι χαμηλότερα και από τα οκτώ γειτονικά

❏ Flow Direction (Διεύθυνση ροής)

Εφαρμόζεται στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) και υπολογίζει για κάθε κύτταρο την κατεύθυνση ροής του νερού (Εικόνα 6-2). Στον κάρναβο που προκύπτει οι τιμές υποδηλώνουν μία από τις οκτώ διευθύνσεις (Εικόνα 6-1)



Εικόνα 6-1 Τιμή κεντρικού κυττάρου ανάλογα με την διεύθυνση ροής (HEC-GeoHMS manual) – εικόνα από την παρούσα εργασία.

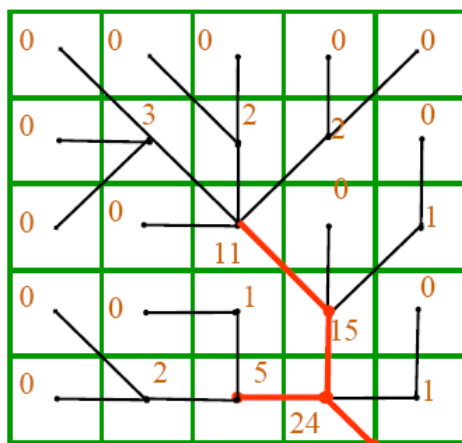


Εικόνα 6-2 Κάρναβος διευθύνσεων απορροής (Στάμου και Σκοπελίτη 2009)

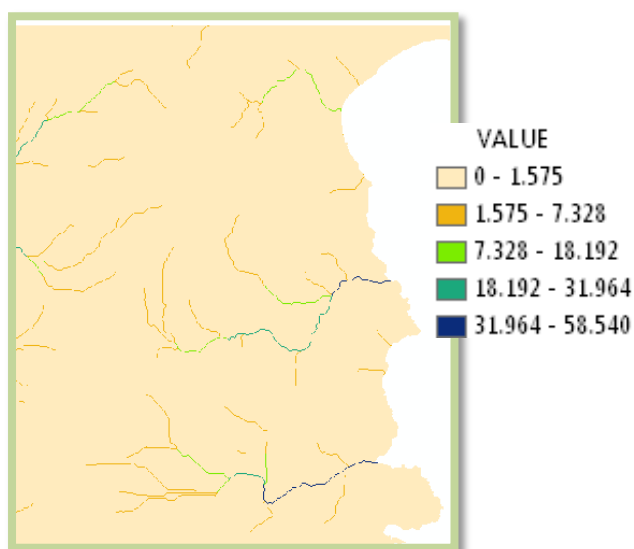
❏ Flow Accumulation (Συγκέντρωση ροής)

Εφαρμόζεται στον κάρναβο διεύθυνσης ροής και υπολογίζει σε κάθε κύτταρο τον αριθμό των κυττάρων που απορρέουν σε αυτόν (Σημειώσεις-Μαμάσης 2008). Το

βήμα αυτό καθορίζει τον αριθμό των ανάντη κελιών, που αποστραγγίζονται σε ένα συγκεκριμένο κελί (Εικόνα 6-3,4). Το εμβαδόν της ανάντη περιοχής αποστράγγισης μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας την τιμή της συσσώρευσης της ροής στο κατάντη κελί με το εμβαδόν του κελιού.



Εικόνα 6-3 Κάνναβος συγκέντρωσης ροής (Στάμου και Σκοπελίτη 2009)

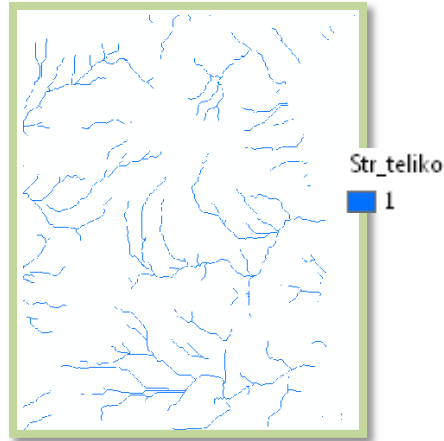


Εικόνα 6-4 Εικόνα συγκέντρωσης ροής από την παρούσα εργασία

☒ Stream definition (Καθορισμός ρεμάτων)

Εφαρμόζεται στον κάνναβο συγκέντρωσης ροής, δημιουργώντας το υδρογραφικό δίκτυο ή δίκτυο ροής ανάλογα με το κατώτερο κατώφλι, το οποίο ορίζει

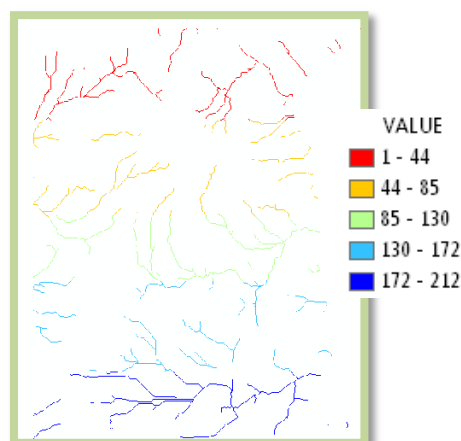
ο χρήστης, ώστε να χαρακτηριστεί μια περιοχή του καννάβου ως ρέμα (Εικόνα 6-5). Το πρόγραμμα θέτει ως κατώτερο κατώφλι το 1% της μεγαλύτερης συγκέντρωσης ροής, το οποίο πολλαπλασιαζόμενο με το εμβαδόν του κελιού ορίζει το κατώφλι του εμβαδού για να δημιουργηθεί ένα ρέμα.



Εικόνα 6-5 Υδρογραφικό δίκτυο από την παρούσα εργασία

✚ Stream Segmentation (Κατάτμηση ρεμάτων)

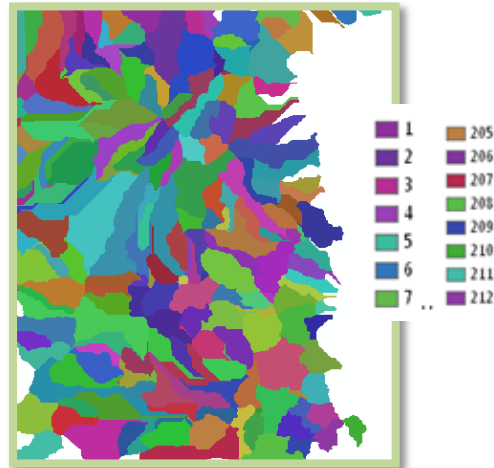
Εφαρμόζεται στον κάνναβο διεύθυνσης ροής και υδρογραφικού δικτύου, διαιρώντας το υδατόρεμα σε μικρότερα τμήματα με βάση την κατηγοριοποίηση του υδρογραφικού δικτύου (π.χ με τη μέθοδο Strahler). Αναλυτικότερα, κάθε τμήμα του δικτύου έχει ένα μοναδικό κωδικό ταυτότητας (unique ID) και όλα τα κελιά που ανήκουν σε ένα ορισμένο τμήμα φέρουν τον ίδιο κωδικό με το τμήμα αυτό (Εικόνα 6-6).



Εικόνα 6-6 Κατάτμηση ρεμάτων από την παρούσα εργασία

❏ Catchment Grid Delineation (Σκιαγράφηση υπολεκανών)

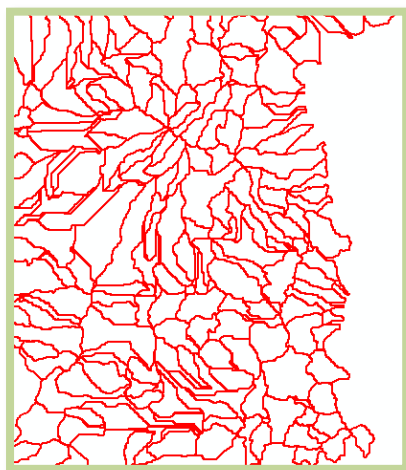
Εφαρμόζεται στον κάνναβο διεύθυνσης ροής και κατάτμησης ρεμάτων, δημιουργώντας μία υπολεκάνη για κάθε τμήμα του υδρογραφικού δικτύου. Αναλυτικότερα, ο κάνναβος που δημιουργείται περιέχει μία τιμή (Grid code) για κάθε κελί προσδιορίζοντας τη υπολεκάνη απορροής που ανήκει (Εικόνα 6-7).



Εικόνα 6-7 Σκιαγράφηση υπολεκανών από την παρούσα εργασία

❏ Catchment Polygon Processing (Δημιουργία Πολυγώνων υπολεκανών απορροής)

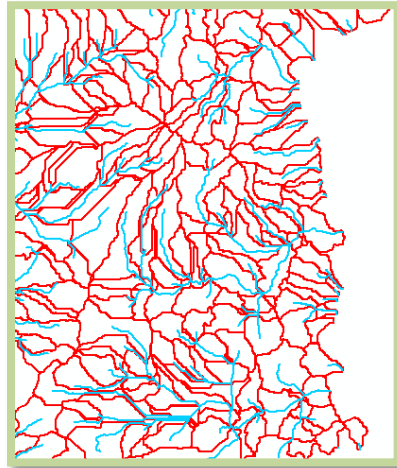
Εφαρμόζεται στον κάνναβο των υπολεκανών και μετατρέπει την αναπαράσταση των υπολεκανών από μορφή grid σε διανυσματική μορφή (vector) (Εικόνα 6-8). (HEC-GeoHMS manual)



Εικόνα 6-8 Πολυγώνια υπολεκανών απορροής από την παρούσα εργασία

❏ Drainage Line Processing (Δημιουργία αποστραγγιστικού δικτύου)

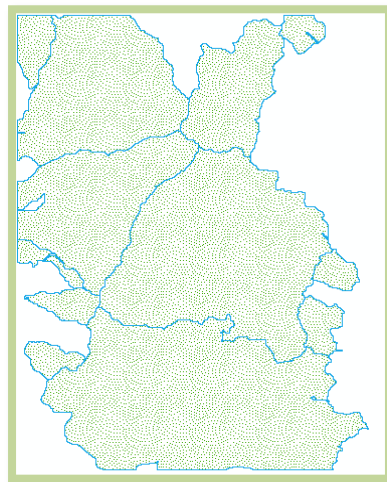
Εφαρμόζεται στον κάρναβο διεύθυνσης ροής και κατάτμησης ρεμάτων μετατρέποντας ουσιαστικά το υδρογραφικό δίκτυο από μορφή grid σε διανυσματική μορφή (vector)(Εικόνα 6-9). (HEC-GeoHMS manual)



Εικόνα 6-9 Αποστραγγιστικό δίκτυο από την παρούσα εργασία

❏ Adjoint Catchment Processing (Δημιουργία συνδέσεων υπολεκανών απορροής)

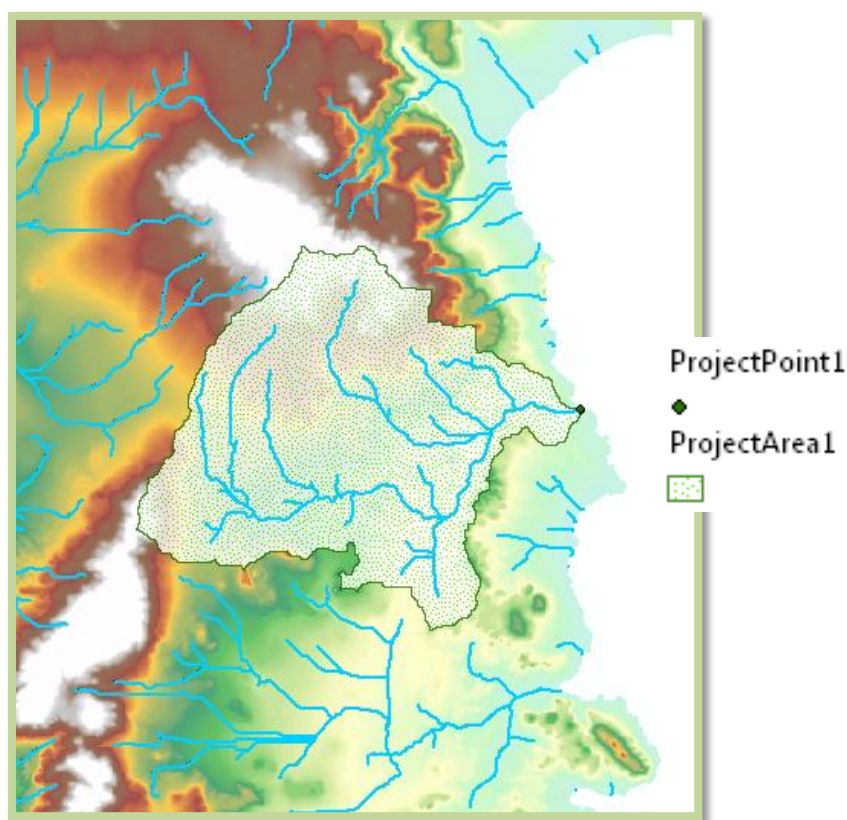
Εφαρμόζεται στο υδρογραφικό δίκτυο και στα πολύγωνα απορροής τα οποία είναι σε διανυσματική μορφή, αθροίζοντας όλες τις ανάντη υπολεκάνες σε κάθε συμβολή του δικτύου ροής (Εικόνα 6-10). Αυτό είναι ένα αναγκαίο βήμα, το οποίο πραγματοποιείται για να βελτιώσει την υπολογιστική ισχύ του προγράμματος και δεν έχει κάποια υδρολογική σημασία (HEC-GeoHMS manual)



Εικόνα 6-10 Σύνδεση υπολεκανών απορροής από την παρούσα εργασία

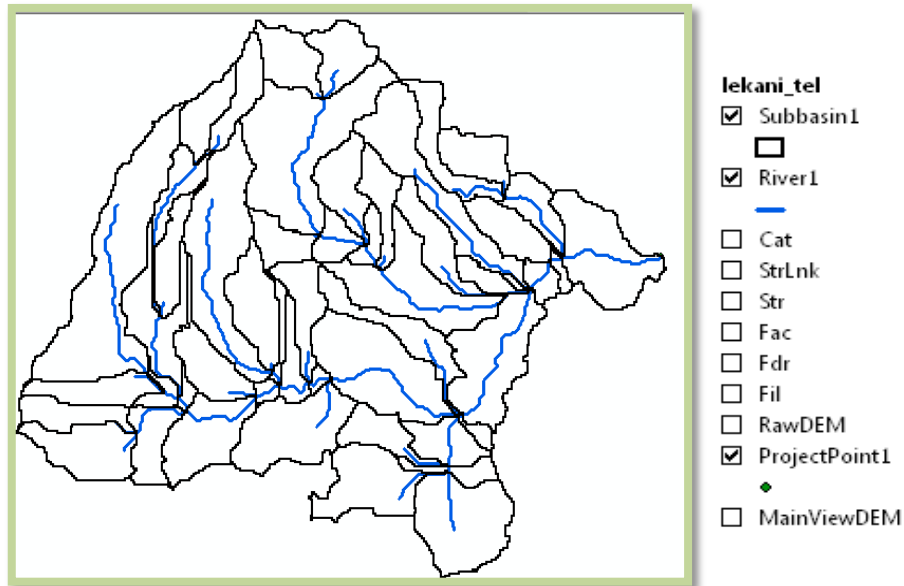
Δημιουργία και επεξεργασία λεκάνης απορροής

Το HMS Project setup το οποίο βρίσκεται στην εργαλειοθήκη HEC-GeoHMS Main View 9 είναι υπεύθυνο να αποσπά τις απαραίτητες πληροφορίες από τη χωρική βάση δεδομένων για τη δημιουργία των αρχείων εισόδου το HEC-HMS project (HEC-GeoHMS manual). Επίσης δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει την υπό μελέτη περιοχή, εφόσον αυτή είναι μικρότερη από την περιοχή που μέχρι τώρα επεξεργαζόταν. Η διαδικασία για να οριστεί η περιοχή μελέτης (project) περιλαμβάνει τη δημιουργία δύο επιπλέον αρχείων, του Project Point και Project Area (Διάγραμμα 6-2). Το Project Point ορίζεται σε κάποιο σημείο του αποστραγγιστικού δικτύου (Drainage Line), αρχείο το οποίο δημιουργήθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Στην συγκεκριμένη εργασία ως Project Point ορίστηκε το σημείο εξόδου της λεκάνης στη Ραφήνα. Στην συνέχεια μέσω του προγράμματος ανιχνεύεται η λεκάνη απορροής που στραγγίζει σε αυτό το σημείο και δημιουργεί με αυτό τον τρόπο το Project Area (Εικόνα 6-11).

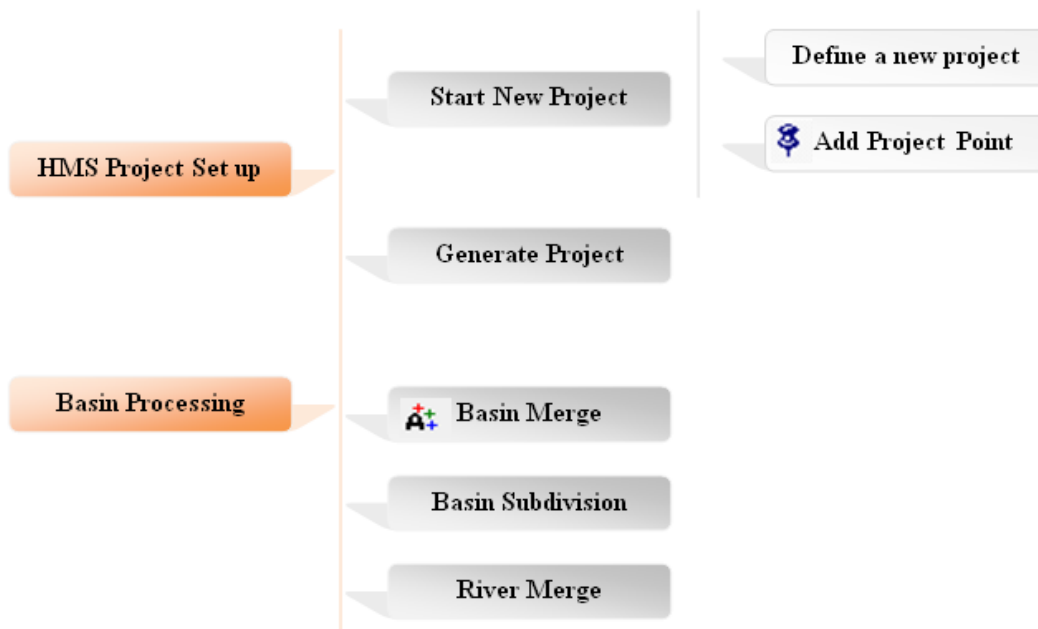


Εικόνα 6-11 Δημιουργία λεκάνης απορροής

Τέλος στο περιβάλλον του ArcMap έχει δημιουργηθεί πλέον ένας νέος χάρτης με μια σειρά επιπέδων, όπου απεικονίζει μόνο την περιοχή μελέτης, όπως φαίνεται στην εικόνα 6-2.

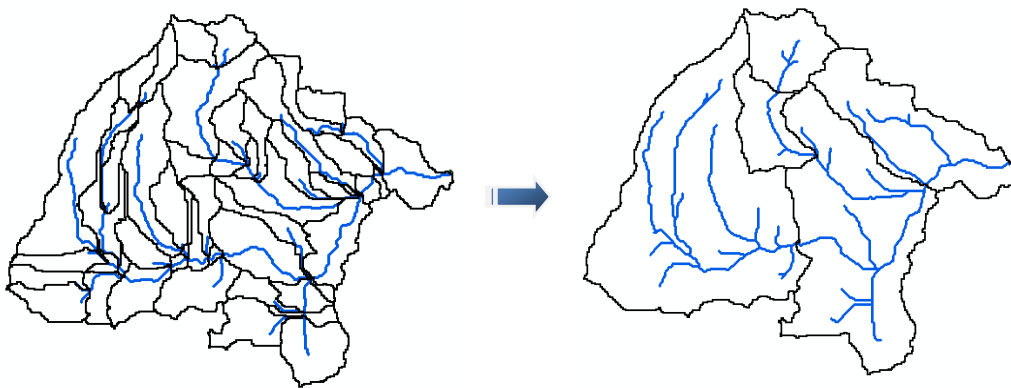


Εικόνα 6-12 Τελικός χάρτης μετά την δημιουργία της λεκάνης απορροής



Διάγραμμα 6-2 Διαδικασία δημιουργίας και επεξεργασίας της περιοχή μελέτης μέσω της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS Main View 9 και HEC-GeoHMS Project View 9 αντίστοιχα

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της δημιουργίας της περιοχής μελέτης, το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας τόσο των υπολεκανών όσο και των ρεμάτων. Συγκεκριμένα, η επεξεργασία γίνεται μέσω του πακέτου εντολών του Basin Processing της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS Project View 9 (Διάγραμμα 6-2). Στα πλαίσια της ενότητας αυτής χρησιμοποιήθηκαν τρεις εντολές του Basin Processing: το Basin Merge, River Merge, Basin Subdivision.



Εικόνα 6-13 Περιοχή μελέτης πριν και μετά την επεξεργασία

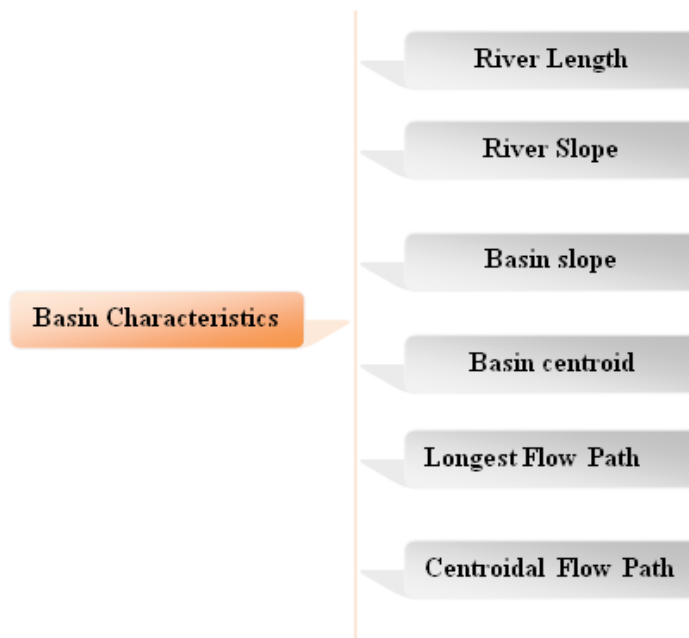
6.2.2 Εξαγωγή τοπογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης

Η εξαγωγή τοπογραφικών δεδομένων της λεκάνης επιτυγχάνεται μέσω του πακέτου εντολών Basin Characteristics της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS Project View 9 (Διάγραμμα 6-3), όπου υπολογίζει διάφορα τοπογραφικά χαρακτηριστικά των ρευμάτων και της λεκάνης απορροής. Αναλυτικότερα, υπολογίζεται το μήκος του ποταμού, η μέση κλίση του, το κέντρο βάρους της κάθε υπολεκάνης απορροής (με τα αντίστοιχα υψόμετρα), το μέγιστο μήκος υδάτινης διαδρομής μιας λεκάνης μέχρι την έξοδο της και το μήκος της υδάτινης διαδρομής από το κέντρο βάρους της λεκάνης μέχρι την έξοδό της (πίν.6-1).

Πίνακας 6-1 Αποτελέσματα τοπογραφικών υπολογισμών με τη χρήση του πακέτου εντολών Basin Characteristics

Subbasins ID	Subbasin Centroid ¹ (m)	Longest Flow Path ² (km)	Centroidal Flow Path ³ (km)	Subbasin Area ⁴ (km ²)
1	200,4	16,0	7,5	53,6
2	257,4	5,7	2,4	7,1
3	132,4	11,1	6,1	19,5
4	96,4	10,2	5,9	39,0
5	420,0	4,2	1,8	8,0

1. Κέντρο βάρους της κάθε υπολεκάνης απορροής με τα αντίστοιχα υψόμετρα σε m
2. Μέγιστο μήκος υδάτινης διαδρομής της κάθε υπολεκάνης απορροής σε km
3. Μήκος υδάτινης διαδρομής (από την προβολή του κέντρου βάρους της υπολεκάνης στην μέγιστη υδάτινη διαδρομή) μέχρι την έξοδο σε km
4. Εμβαδό της κάθε υπολεκάνης απορροής σε km²

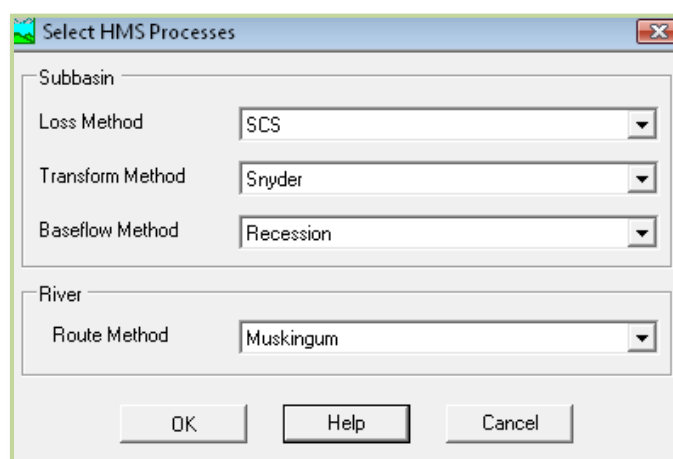


Διάγραμμα 6-3 Διαδικασία εξαγωγής τοπογραφικών χαρακτηριστικών μέσω της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS Project View 9.

6.2.3 Επιλογή προτύπων υπολογισμού υδρολογικών παραμέτρων

Αφού ολοκληρωθούν όλες οι παραπάνω διεργασίες, ακολουθεί η επιλογή των μεθόδων υπολογισμού των υδρολογικών παραμέτρων για την εκτέλεση της υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης. Η επιλογή των μεθόδων εκτελείται μέσω της εντολής `Select HMS processes` η οποία βρίσκεται στο πακέτο εντολών `Hydrologic Parameters` της εργαλειοθήκης `HEC-GeoHMS Project View 9`. Ο χρήστης ορίζει τα πρότυπα τριών διεργασιών σε επίπεδο λεκάνης (απώλειες βροχής, μετασχηματισμός άμεσης απορροής, βασικής ροής) και μίας σε επίπεδο ρέματος (διόδευσης πλημμυρογραφήματος).

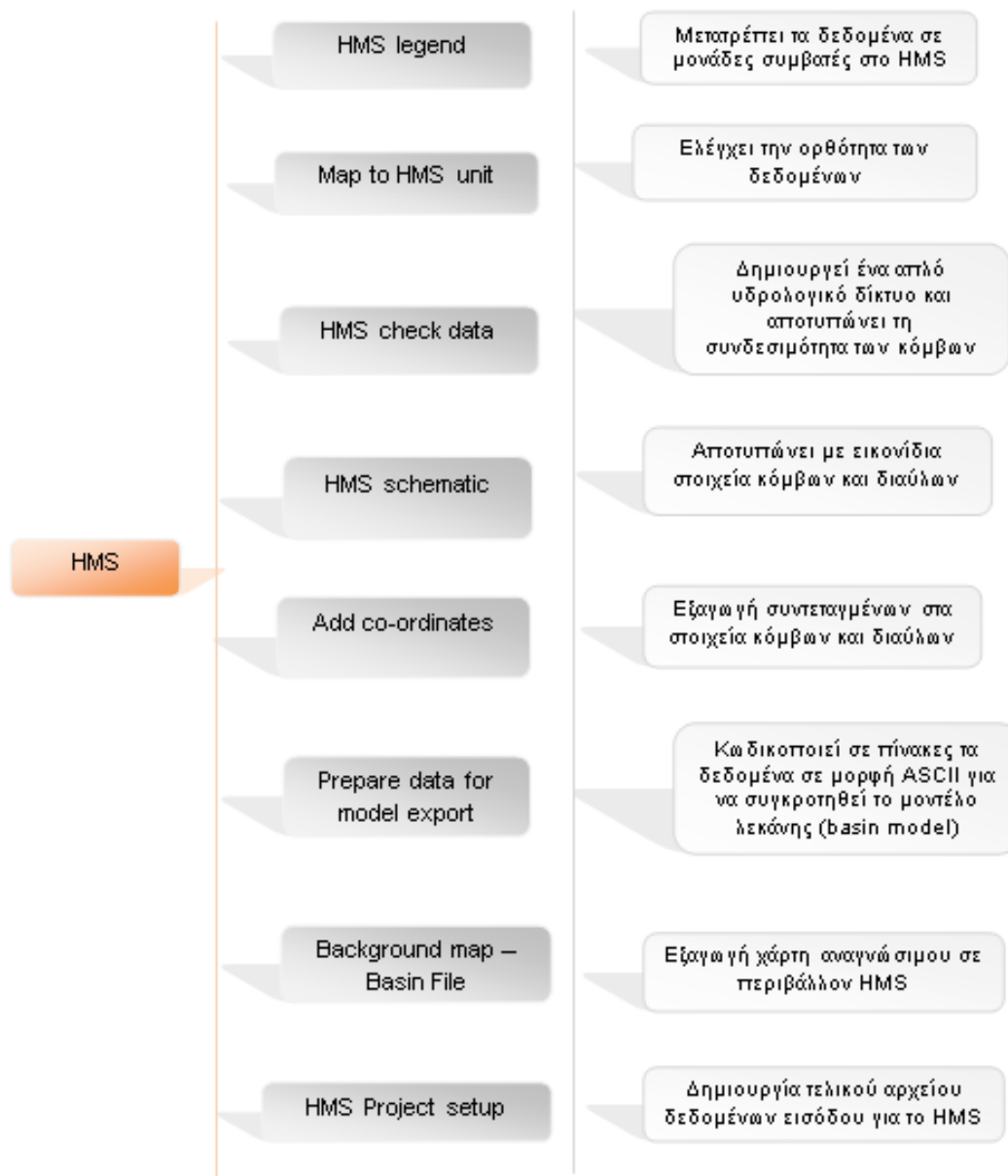
Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης έχει καταρτιστεί με τις μεθόδους που αποτυπώνονται στην παρακάτω εικόνα 6-14.



Εικόνα 6-14 Παράθυρο της εντολής `Select HMS processes` – Επιλογή μεθόδων υπολογισμού υδρολογικών παραμέτρων

6.2.4 Δημιουργία αρχείων εισόδου HEC-HMS

Η τελευταία διαδικασία που ακολουθείται από το χρήστη πριν την εισαγωγή του στο κύριο μοντέλο HEC-HMS, είναι η δημιουργία αρχείων εισόδου για το μοντέλο. Η δημιουργία αυτών των αρχείων επιτυγχάνεται μέσω του πακέτου εντολών HMS της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS Project View 9. (Διάγραμμα 6-4)



Διάγραμμα 6-4 Διαδικασία δημιουργίας αρχείων εισόδου HEC-HMS μέσω της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS Project View 9.

6.2.5 Μετεωρολογικό μοντέλο - Αρχείο Προσομοίωσης

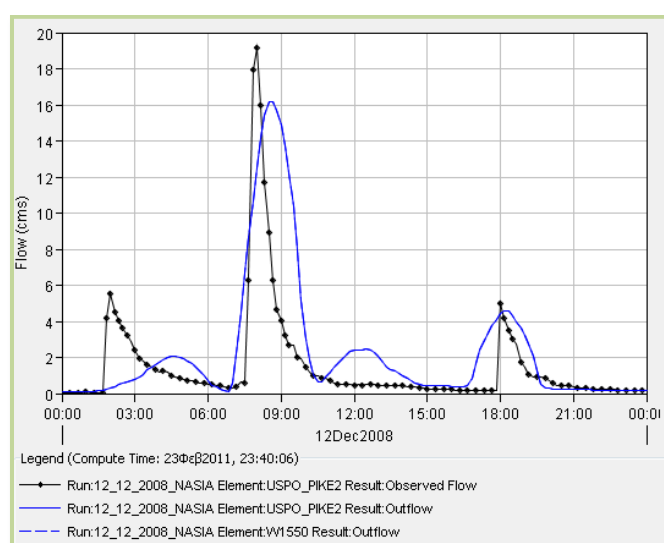
Η κατάρτιση του μετεωρολογικού μοντέλου αφορά στην εισαγωγή των στοιχείων της μετεωρολογικής πληροφορίας, που ενσωματώνει τις απαραίτητες οριακές συνθήκες για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Η μετεωρολογική αυτή πληροφορία εισάγεται είτε μέσω παρατηρημένων βροχογραφήματων είτε μέσω καθορισμού υποθετικών επεισοδίων βροχής με συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς

Στην τελευταία φάση πριν την εκτέλεση των υπολογισμών, το HEC-HMS ζητά από το χρήστη να δημιουργήσει ένα αρχείο προσομοίωσης, στο οποίο καθορίζεται η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης καθώς και τα δεδομένα εισόδου, που δημιουργήθηκαν σε προηγούμενα βήματα. Η ενεργοποίηση της εντολής γίνεται μέσω του μενού component → control specifications manager.

6.2.6 Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης πριν την πυρκαγιά

Έχοντας πλέον δημιουργήσει το σύνολο των δεδομένων εισόδου το πρόγραμμα εκτελεί τους υπολογισμούς μέσω της εντολής compute run. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι υδρογραφήματα της λεκάνης, διαγράμματα και πίνακες βροχόπτωσης, απωλειών, άμεσης απορροής κλπ.

Ενδεικτικά παρατίθεται το αποτέλεσμα σύγκρισης ενός προσομοιωμένου και ενός παρατηρημένου υδρογραφήματος από τη λεκάνη, απόδειξη της σωστής βαθμονόμησης του μοντέλου (Διάγραμμα 6-5).



Διάγραμμα 6-5 Σύγκριση προσομοιωμένο με παρατηρημένο υδρογράφημα (Κασσελά, Α. 2011)

6.3 Υδρολογική προσομοίωση λεκάνης μετά την πυρκαγιά

Σύμφωνα με το Beven (2000) ένας από τους λόγους δημιουργίας και κατ'επέκταση χρήσης των υδρολογικών μοντέλων είναι η πρόβλεψη των επιπτώσεων λόγω της αλλαγής των χρήσεων γης, και ειδικότερα μετά την επίδραση πυρκαγιάς, που θεωρείται ένας από τους πιο δραστικούς παράγοντες αλλαγής των χρήσεων γης.

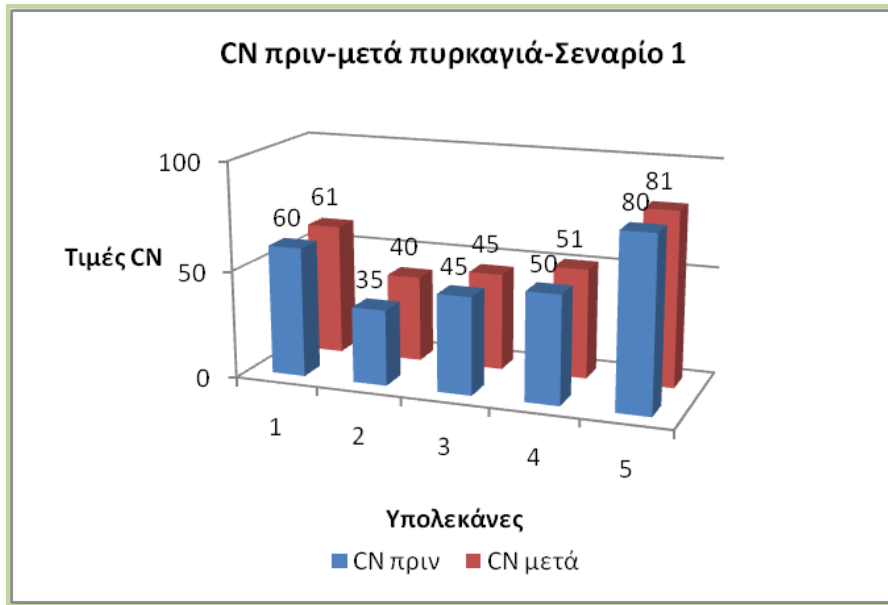
Αφού λοιπόν ολοκληρωθεί η διαδικασία προσομοίωσης της υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης πριν την πυρκαγιά, ακολουθεί ο επαναπροσδιορισμός των παραμέτρων που αντιπροσωπεύουν τις προηγούμενες συνθήκες στη λεκάνη, έτσι ώστε να προσομοιωθεί καλύτερα η υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης μετά την επίδραση της πυρκαγιάς.

Σύμφωνα με την παραπάνω μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, για κάθε υπολεκάνη και παράλληλα για κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά, υπολογίστηκε ένας νέος αριθμός καμπύλης (CN) και αρχικής κατακράτησης (I_a), ο οποίος όπως προαναφέρθηκε αντιπροσωπεύει τις νέες συνθήκες που επικρατούν στην εκάστοτε υπολεκάνη μετά την επίδραση της πυρκαγιάς.

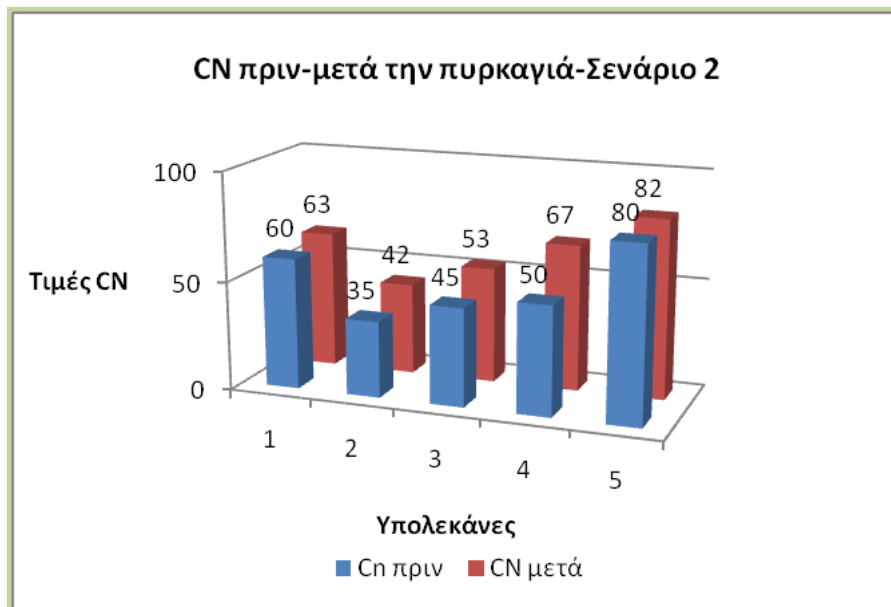
Οι τελικές τιμές των υδρολογικών παραμέτρων που εισάγονται στο μοντέλο HEC-HMS παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα:

Πίνακας 6-2 Τιμές CN μετά την επίδραση των πυρκαγιών

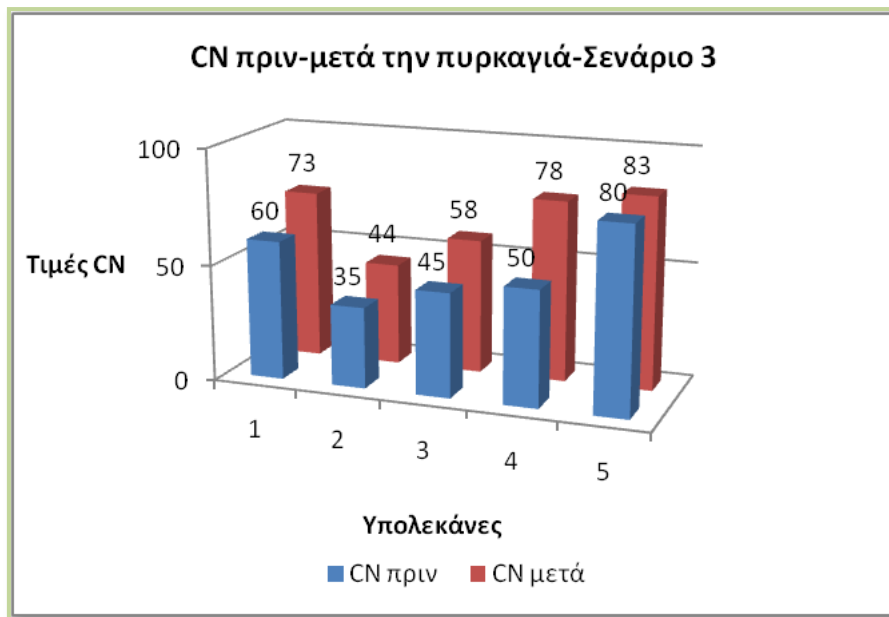
Υπολεκάνες	CN πριν	CN μετά							
		Σενάριο 1ο	Μεταβολή %	Σενάριο 2ο	Μεταβολή %	Σενάριο 3ο	Μεταβολή %	Πυρκαγιά 2009	Μεταβολή %
1	60	61	1,67	63	5,00	73	21,67	64	6,67
2	35	40	14,29	42	20,00	44	25,71	83	137,14
3	45	45	0,00	53	17,78	58	28,89	78	73,33
4	50	51	2,00	67	34,00	78	56,00	56	12,00
5	80	81	1,25	82	2,50	83	3,75	80	0,00



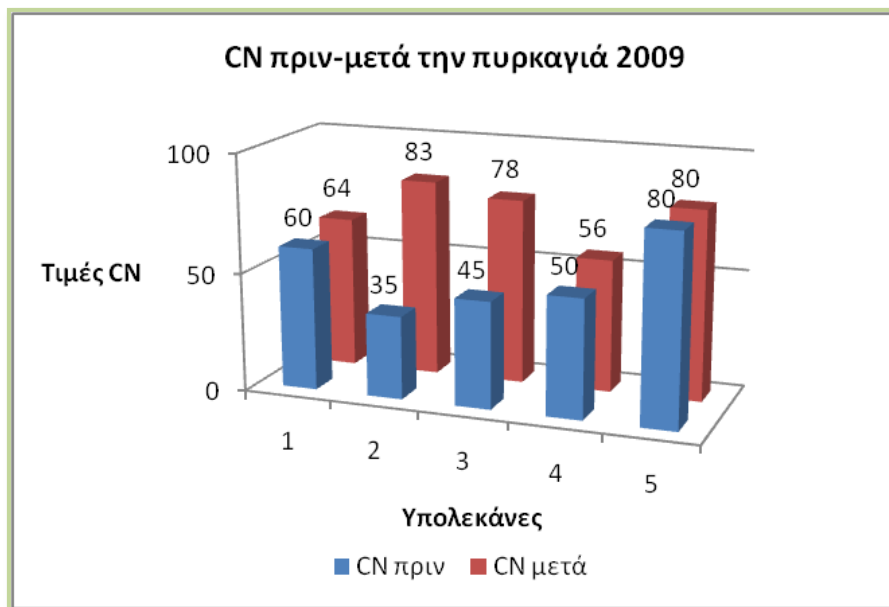
(α)



(β)



(γ)



(δ)

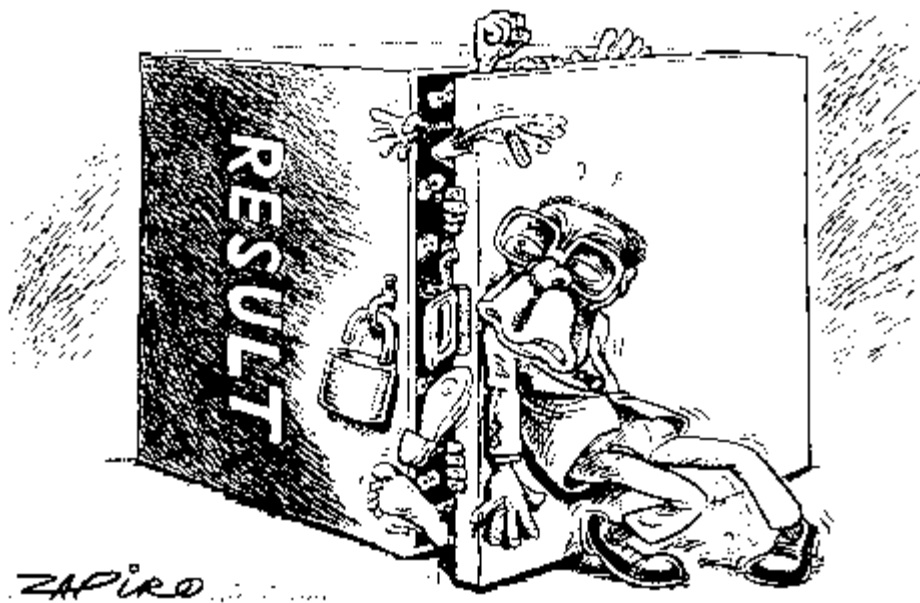
Διάγραμμα 6-6 α,β,γ,δ. Σχηματική απεικόνιση διαφοροποίησης τιμών CN πριν και μετά τις υπό μελέτη πυρκαγιές για κάθε υπολεκάνη

Πίνακας 6-3 Τιμές δυνητικής, αρχικής κατακράτησης και αριθμού καμπύλης μετά την επίδραση των υπό μελέτη πυρκαγιών

Μετά την πυρκαγιά			
Υπολεκάνες	CN	Δυνητική Κατακράτηση (mm)	Αρχική Κατακράτηση (mm)
Σενάριο 1^ο			
1	61	162,39	4,87
2	40	381,00	14,10
3	45	310,44	3,10
4	51	244,04	4,88
5	81	59,58	2,98
Σενάριο 2^ο			
1	63	149,17	4,48
2	42	350,76	12,98
3	53	225,25	2,25
4	67	125,10	2,50
5	82	55,76	2,79
Σενάριο 3^ο			
1	73	93,95	2,82
2	44	323,27	11,96
3	58	183,93	1,84
4	78	71,64	1,43
5	83	52,02	2,60
Πυρκαγιά 2009			
1	64	142,88	4,29
2	83	52,02	1,92
3	78	71,64	0,72
4	56	199,57	3,99
5	80	63,50	3,18

Κεφάλαιο 7

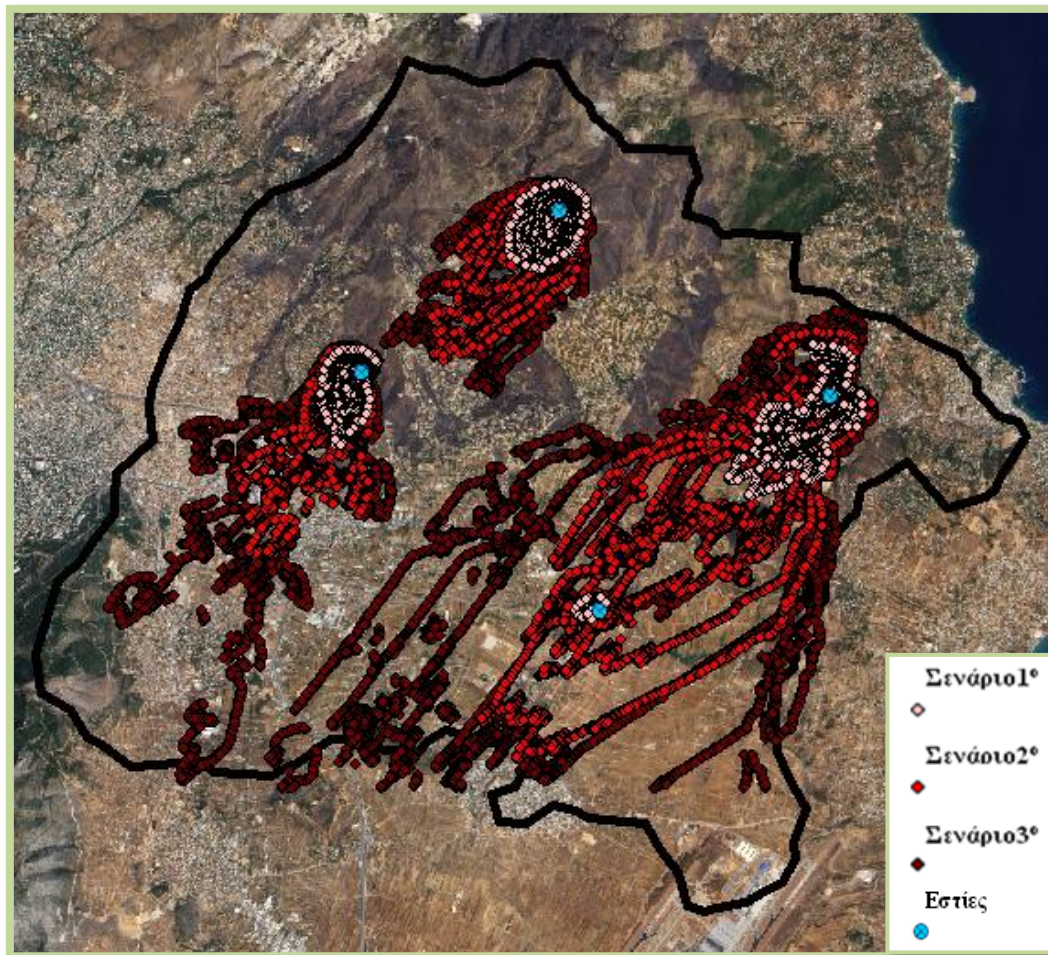
Αποτελέσματα



7. Αποτελέσματα

7.1 Αποτελέσματα μοντέλου διαχείρισης δασικών πυρκαγιών (G-FMIS)

Από τη διαδικασία προσομοίωσης των σεναρίων πυρκαγιάς με τη χρήση του λογισμικού G-FMIS διαμορφώθηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα (Εικόνα 7-1):



Εικόνα 7-1 Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίων πυρκαγιάς

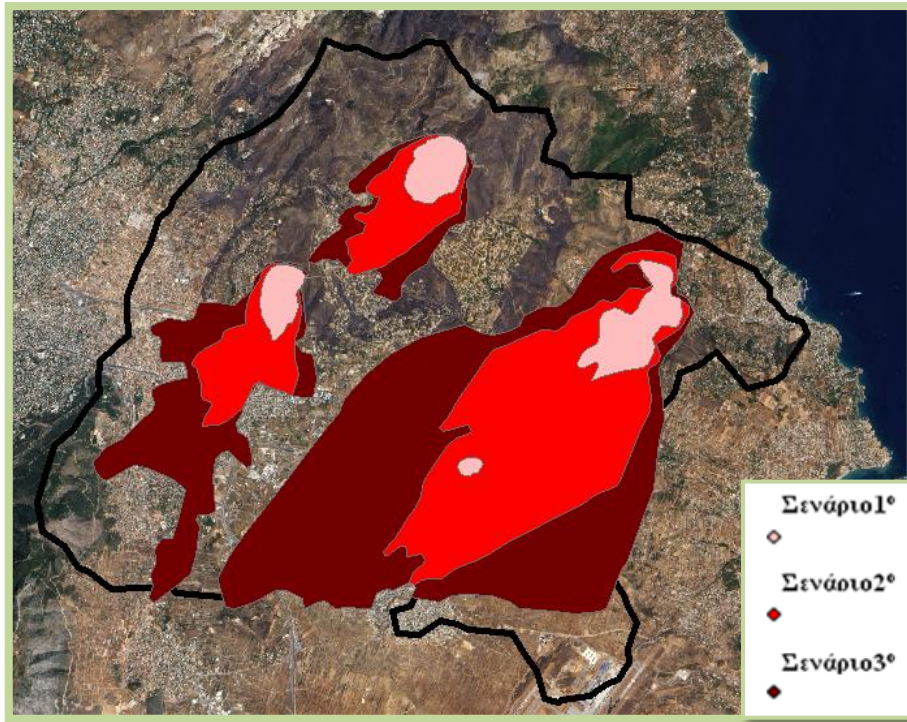
Στην εικόνα 7-1 παρατηρείται γενικά αύξηση της καμένης έκτασης καθώς μεταβάλλονται οι τιμές των παραμέτρων από το πρώτο έως το τρίτο σενάριο. Συγκεκριμένα, συγκρίνοντας το πρώτο με το δεύτερο σενάριο, όπου η υγρασία παραμένει σταθερή αλλά μεταβάλλεται η τιμή του ανέμου, από χαμηλά σε μέτρια επίπεδα, παρατηρείται μεγάλη διαφορά στην καμένη έκταση, σε τέτοιο βαθμό όπου παρουσιάζεται ενοποίηση του ανατολικού και νότιου μετώπου. Επίσης όσον αφορά την καμένη έκταση, παρατηρείται διαφορά και μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου σεναρίου, με το τελευταίο να καίει τη μεγαλύτερη έκταση. Στην συγκεκριμένη

περίπτωση οι τιμές των παραμέτρων διαφοροποιούνται τόσο ως προς τον άνεμο όσο και ως προς την υγρασία. Όπως φαίνεται και από τον πίνακα 4-1 η υγρασία μειώνεται από μέτρια σε χαμηλή ενώ ταυτόχρονα ο άνεμος αυξάνεται από μέτριος σε υψηλός.

Συγκρίνοντας επίσης το πρώτο με το τελευταίο σενάριο παρουσιάζεται η μεγαλύτερη διαφορά, σε σχέση με τις δύο παραπάνω συγκρίσεις, ως προς την έκταση που επηρεάστηκε από την πυρκαγιά. Συμπερασματικά, η καμένη έκταση αυξάνεται όταν αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου και μειώνεται η υγρασία της καύσιμης ύλης, με τον πρώτο παράγοντα να επηρεάζει περισσότερο το τελικό αποτέλεσμα.

Επιπλέον από την εικόνα 7-1 παρατηρείται η ανομοιομορφη εξάπλωση της πυρκαγιάς στα διάφορα τμήματα της λεκάνης. Αναλυτικότερα, στο νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης η πυρκαγιά για τον ίδιο χρόνο προσομοίωσης επεκτάθηκε σε μεγαλύτερη έκταση σε σχέση με το βορειοδυτικό τμήματα της. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται κυρίως στην διαφορετικότητα της καύσιμης ύλης. Στο συγκεκριμένο τμήμα επικρατούν γεωργικές χρήσεις γης (αμπελώνες, σύνθετα συστήματα καλλιέργειας, κ.α) οι οποίες σε μεγάλο ποσοστό είναι αναξιοποίητες εκτάσεις που έχουν μετατραπεί σε λιβαδικές με αγρωστώδη/ποώδη βλάστηση (τύπος καύσιμης ύλης ΠΡΟ1). Χαρακτηριστικό του τύπου αυτού είναι η ταχύτερη εξάπλωση της πυρκαγιάς. Ακόμα σημαντικό ρόλο παίζει και η απουσία οικιστικής ζώνης σε αυτό το τμήμα της λεκάνης, η ύπαρξη της οποίας εμποδίζει κατά ένα μεγάλο ποσοστό την εξάπλωση της πυρκαγιάς.

Τέλος, στο αποτέλεσμα των προσομοιώσεων διακρίνεται αναντιστοιχία στο σχήμα των καμένων εκτάσεων (Εικόνα 7-2). Γενεσιουργός αιτία του αποτελέσματος αυτού, είναι ότι οι εξισώσεις που διαθέτει το μοντέλο ισχύουν για εκτάσεις δασώδεις, θαμνώδεις και λιβαδικές. Το μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει την εξάπλωση πυρκαγιάς σε αστικές χρήσεις γης. Για τον παραπάνω λόγο παρατηρείται μεγαλύτερη αναντιστοιχία στο σχήμα εξάπλωσης της πυρκαγιάς στο δυτικό τμήμα της λεκάνης όπου σύμφωνα με το χάρτη χρήσης γης επικρατούν οι αστικές χρήσεις.



Εικόνα 7-2 Οριοθέτηση καμένων εκτάσεων με ψηφιοποίηση στο ArcGIS

Όσον αφορά την εκτίμηση του εμβαδού της καμένης έκτασης των αντίστοιχων σεναρίων πυρκαγιάς πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Arcgis. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (7-1)

Πίνακας 7-1 Ποσοστό καμένης έκτασης για κάθε σενάριο πυρκαγιάς

Σενάρια πυρκαγιάς	Ποσοστό καμένης έκτασης (%)
1	4
2	23
3	49

7.2 Αποτελέσματα υδρολογικής απόκρισης μετά την επίδραση πυρκαγιάς

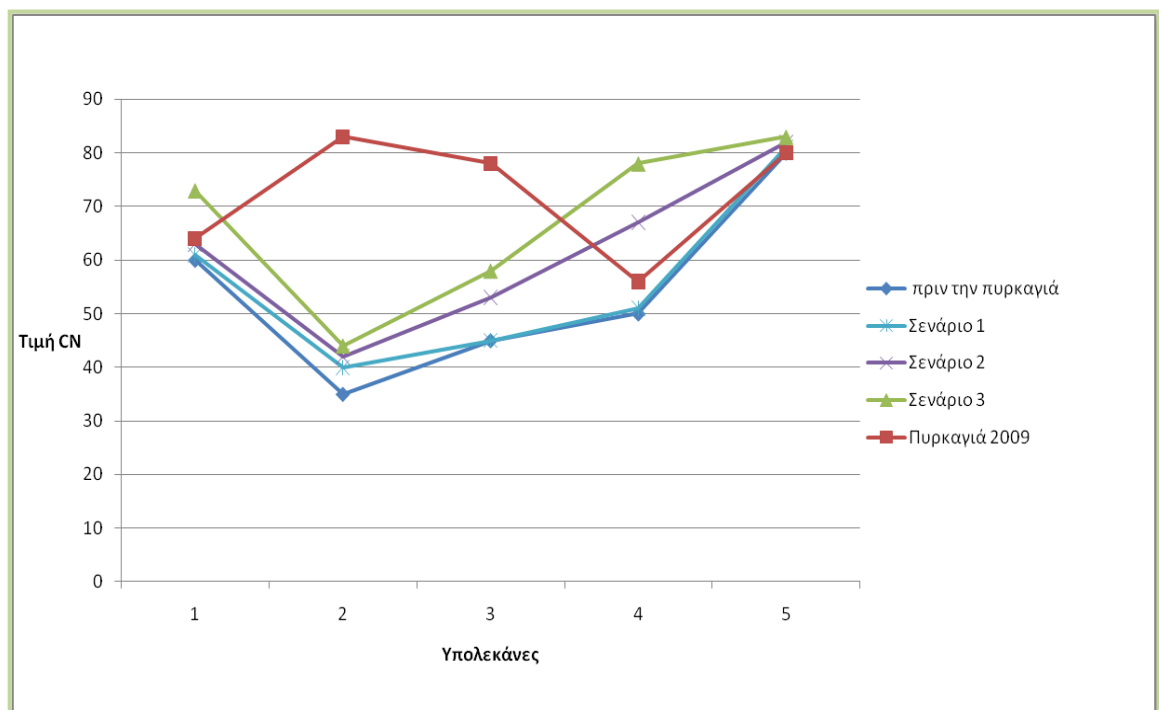
7.2.1 Αποτελέσματα μεθοδολογίας επαναπροσδιορισμού αριθμού καμπύλης (CN) και αρχικής κατακράτησης (Ia)

Όσον αφορά την παράμετρο του αριθμού καμπύλης (CN), από τα αποτελέσματα που παρατίθενται στο διάγραμμα (7-1) υποδηλώνουν την συσχέτιση της μεταβολής των τιμών CN ανάλογα με την έκταση που επηρεάστηκε από την

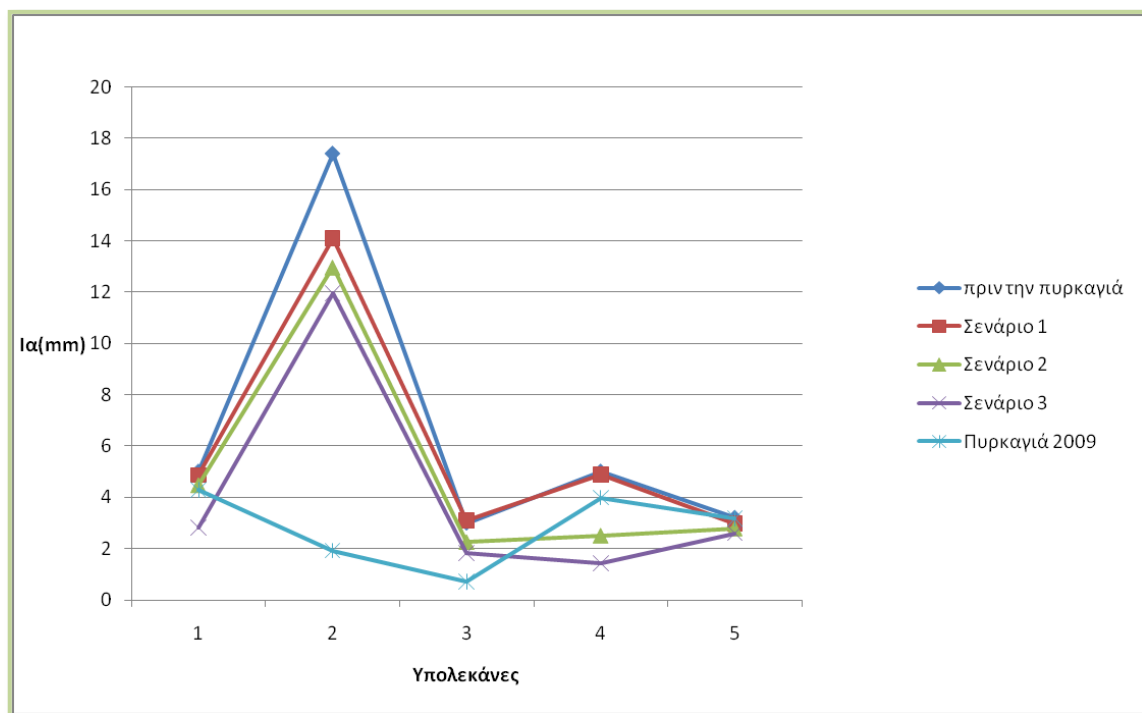
πυρκαγιά. Συγκεκριμένα, η δυτική υπολεκάνη, η οποία αριθμείται με τον αριθμό 5, εφόσον επηρεάστηκε σε πολύ μικρό βαθμό από τις υπό μελέτη πυρκαγιές παρουσιάζει μηδαμινή αύξηση στην τιμή του CN. Επίσης λόγω της πολύ μικρής έκτασης που επηρεάζει η πυρκαγιά του 1^ο σεναρίου, παρατηρείτε ελάχιστη διαφοροποίηση στις τιμές του CN, για όλες τις υπολεκάνες (Διάγραμμα 7-1). Αντίθετα οι υπολεκάνες 2 και 3, οι οποίες ουσιαστικά αποτελούν την πειραματική λεκάνη (X-basin), παρουσιάζουν την μεγαλύτερη μεταβολή στην τιμή CN για την πυρκαγιά του 2009, με ποσοστιαία μεταβολή 137% και 73% αντίστοιχα. Αξιοσημείωτες μεταβολές του αριθμού καμπύλης παρουσιάζει και η υπολεκάνη 4 στο 2^ο και 3^ο σενάριο πυρκαγιάς.

Αντίστοιχα αποτελέσματα σημειώθηκαν και στον υπολογισμό της αρχικής κατακράτησης με την διαφορά ότι στις υπολεκάνες που υπολογίζεται μεγάλη αύξηση του αριθμού καμπύλης, οι τιμές της αρχικής κατακράτησης μειώνονται σημαντικά. Αιτία της μείωσης αυτής είναι η αντιστρόφως ανάλογη σχέση της αρχικής κατακράτησης με τον αριθμό καμπύλης (Διάγραμμα 7-2).

Τα συνολικά αποτελέσματα της προαναφερθείσας μεθοδολογίας, καταγράφονται εποπτικά παρακάτω:



Διάγραμμα 7-1 Συνολική απεικόνιση διαφοροποίησης τιμών CN πριν και μετά τις υπό μελέτη πυρκαγιές για κάθε υπολεκάνη



Διάγραμμα 7-2 Διαφοροποίηση τιμών αρχικής κατακράτησης σε κάθε υπολεκάνη και για κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά

7.2.2 Αποτελέσματα επαναπροσδιορισμού χρόνου υστέρησης (t_p)

Ο παράγοντας του χρόνου υστέρησης για τους λόγους που σημειώθηκαν στην ενότητα 5.3.3 προσδιορίστηκε σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές σε αντίστοιχες μελέτες. Από τη βιβλιογραφική έρευνα που ακολούθησε διαπιστώθηκε η σπανιότητα αντίστοιχων αποτελεσμάτων ως προς τον συγκεκριμένο υδρολογικό παράγοντα. Παρολ'αυτά αναφέρεται μείωση του χρόνου υστέρησης κατά 40% (κατά μέσο όρο) σε δύο ανεξάρτητες πηγές. (Elliot et al., 2004, Cydzik and Hogue, 2009).

Η παραπάνω τιμή αντιστοιχήθηκε στο μεγαλύτερο ποσοστό καμένης έκτασης (δηλ, στις υπολεκάνες 2 και 3 για την πυρκαγιά του 2009 - 100%). Για τις υπόλοιπες υπό μελέτη πυρκαγιές και για κάθε υπολεκάνη υπολογίστηκε μια νέα τιμή μείωσης του χρόνου υστέρησης ανάλογα την έκταση της υπολεκάνης που επηρεάστηκε από την εκάστοτε πυρκαγιά.

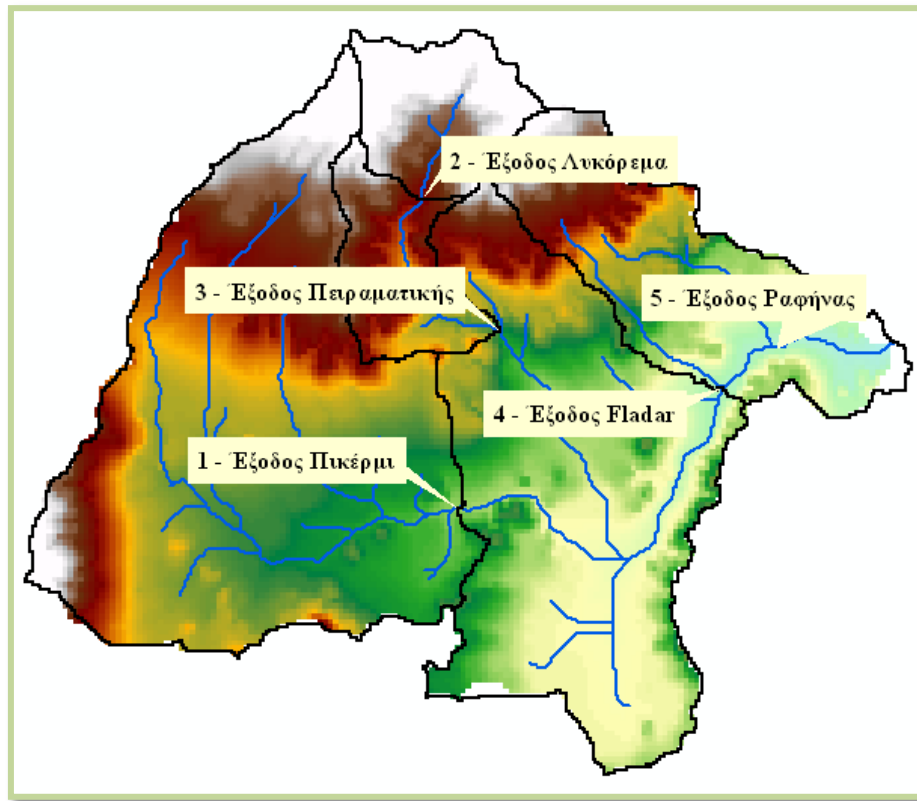
Τα αποτελέσματα της παραπάνω διεργασίας παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (7-2)

Πίνακας 7-2 Τιμές χρόνου υστέρησης (tr) πριν και μετά τις υπό μελέτη πυρκαγιές

Υπολεκάνες	tr πριν την πυρκαγιά	Μείωση (%)	tr Σενάριο 1
1	1,47	0,77	1,46
2	2,4	4,23	2,30
3	0,7	0,22	0,70
4	3,8	1,17	3,76
5	4,83	4,35	4,62
Υπολεκάνες	tr πριν την πυρκαγιά	Μείωση (%)	tr Σενάριο 2
1	1,47	3,94	1,41
2	2,4	6,54	2,24
3	0,7	8,60	0,64
4	3,8	17,87	3,12
5	4,83	6,88	4,50
Υπολεκάνες	tr πριν την πυρκαγιά	Μείωση (%)	tr Σενάριο 3
1	1,47	18,04	1,20
2	2,4	8,12	2,21
3	0,7	15,53	0,59
4	3,8	29,22	2,69
5	4,83	11,15	4,29
Υπολεκάνες	tr πριν την πυρκαγιά	Μείωση (%)	tr πυρκαγιά 2009
1	1,47	6,26	1,38
2	2,4	40,00	1,44
3	0,7	40,00	0,42
4	3,8	6,45	3,55
5	4,83	12,43	4,23

7.2.2 Αποτελέσματα μοντέλου υδρολογικής προσομοίωσης (HEC-HMS)

Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων παρατίθεται η παρακάτω εικόνα (7-3), κατά την οποία υποδεικνύονται οι θέσεις παρατηρήσεις των υδρογραφημάτων και αρίθμησης των υπολεκανών.



Εικόνα 7-3 Αρίθμηση υπολεκανών και ονοματολογία εξόδων για την κάλυψη αναγκών της παρούσας εργασίας

Μετά τη διαμόρφωση των τιμών του αριθμού καμπύλης (CN) και της αρχικής κατακράτησης (I_a), σύμφωνα με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε παραπάνω, ακολούθησε η εισαγωγή τους στο υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS. Έτσι λοιπόν για κάθε υπολεκάνη εισήχθησαν οι τιμές των δύο παραμέτρων όπως καταγράφονται στον πίνακα (6-3).

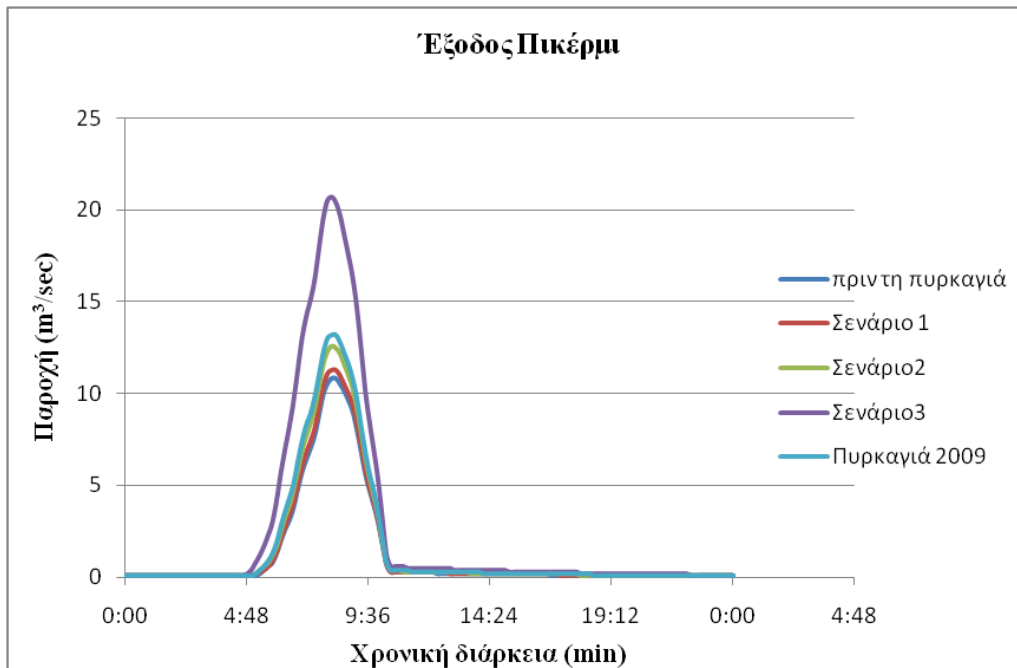
Αρχικά πραγματοποιήθηκαν υδρολογικές προσομοιώσεις για τα επεισόδια βροχόπτωσης 17/11/2008, 12/12/2008, 8/2/2009 (πίν.7-3), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην βαθμονόμηση του μοντέλου. Επίσης οι υδρολογικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για όλες τις υπό μελέτη πυρκαγιές (Σενάριο 1^ο, Σενάριο 2^ο, Σενάριο 3^ο, Πυρκαγιά 2009) ώστε να μελετηθεί ο βαθμός επίδρασης της

εκάστοτε πυρκαγιάς και κατ'επέκταση της καμένης έκτασης στην υδρολογική απόκριση της λεκάνης.

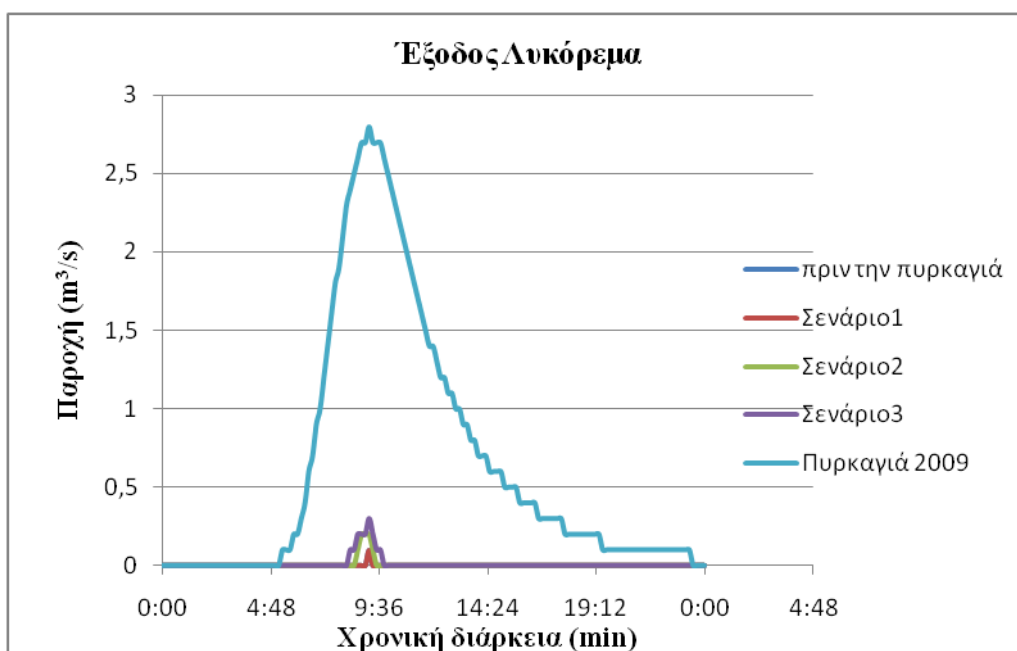
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε κάθε θέση εξόδου των πέντε υπολεκανών (Διάγραμμα 7-3).

📅 Επεισόδιο 8/2/2009

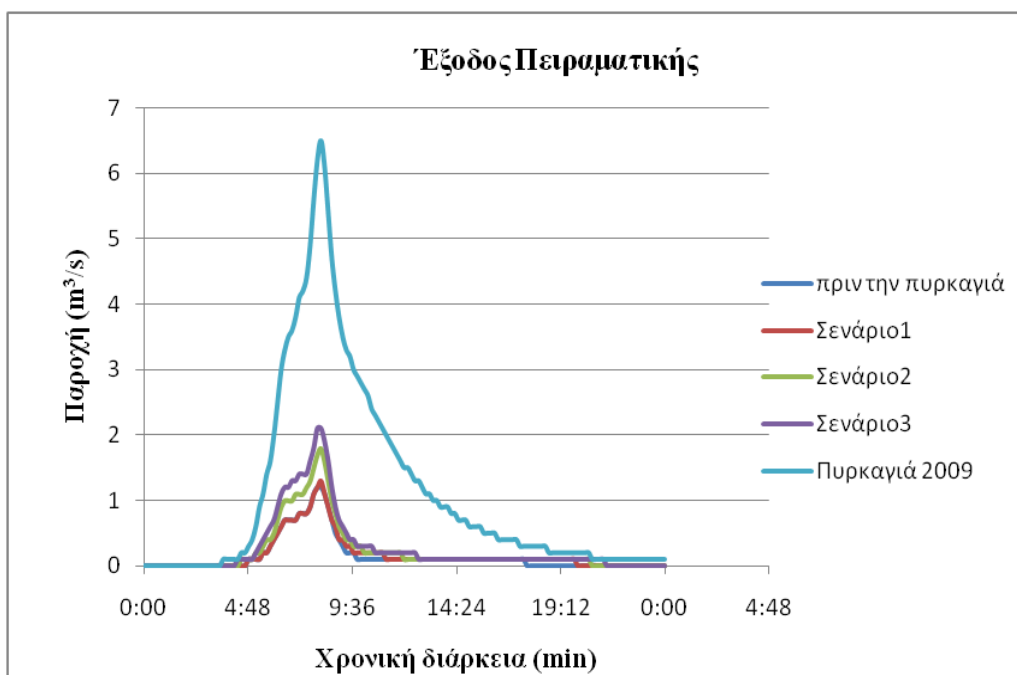
• Έξοδος υπολεκάνης 1: Πικέρμι



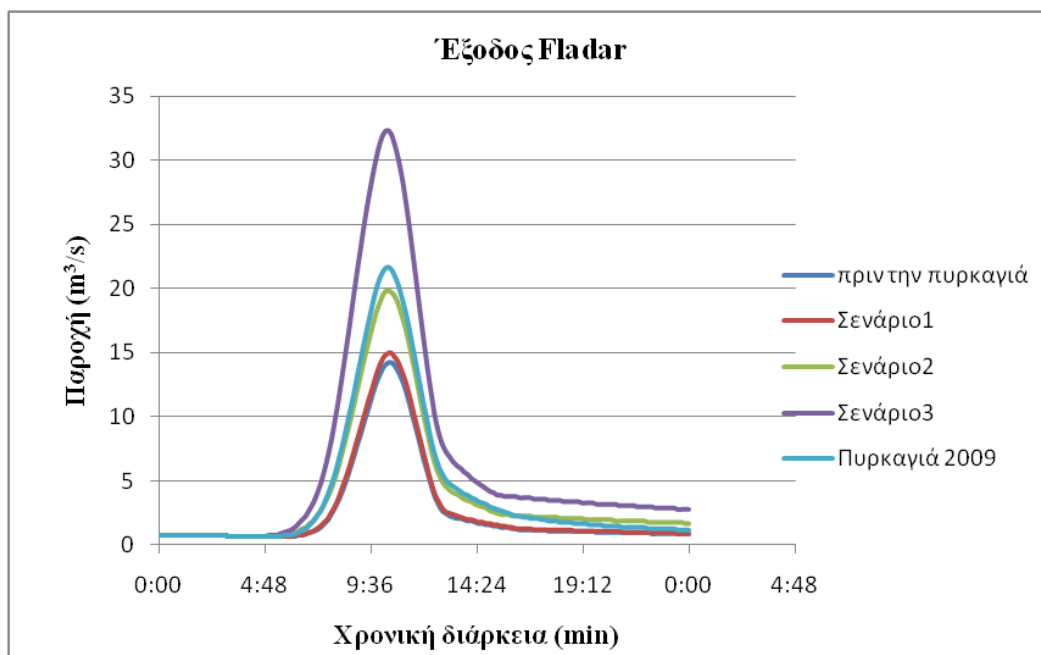
• Έξοδος υπολεκάνης 2: Λυκόρεμα



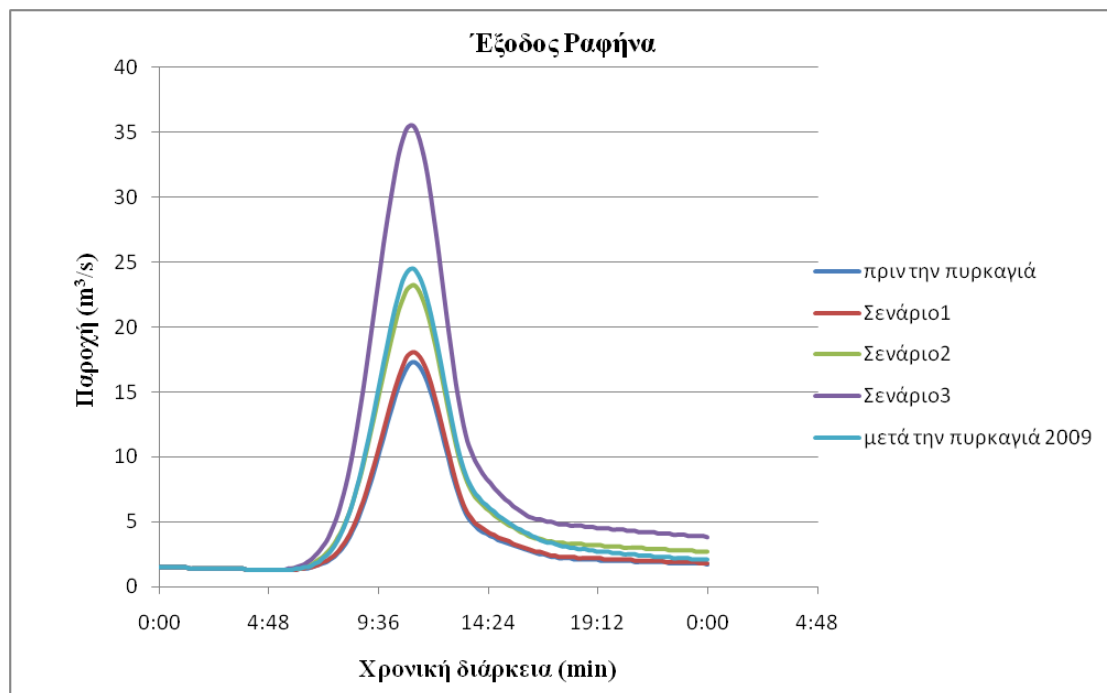
- Έξοδος υπολεκάνης 3: Πειραματική λεκάνη (X-basin)



- Έξοδος υπολεκάνης 4: Έξοδος πριν τον οικισμό της Ραφήνας (θέση Fladar)



- Έξοδος υπολεκάνης 5: Έξοδος Ραφήνα



Διάγραμμα 7-3 Υδρογραφήματα πριν και μετά τις υπό μελέτη πυρκαγιές (8/2/2009) (επαναπροσδιορισμός CN, I_a)

Από τα παραπάνω υδρογραφήματα διαπιστώνεται ο μεγάλος βαθμός επηρεασμού της καμένης έκτασης στην υδρολογική συμπεριφορά τόσο σε επίπεδο υπολεκανών όσο και σε ολόκληρη τη λεκάνη. Συγκεκριμένα, διαπιστώνεται ότι όσο αυξάνεται το εμβαδό της καμένης έκτασης τόσο αυξάνεται και η παροχή αιχμής. Αναλυτικότερα, στις θέσεις Πικερμίου και έξω από τον οικισμό της Ραφήνας (θέση fladar) παρατηρείται μεγαλύτερη παροχή αιχμής στο 3^ο σενάριο πυρκαγιάς, εφόσον επηρέασε μεγαλύτερη έκταση στις αντίστοιχες υπολεκάνες. Αντίθετα στις θέσεις του Λυκορέματος και στην έξοδο της πειραματικής λεκάνης, η πραγματική πυρκαγιά του 2009 επηρέασε μεγαλύτερη έκταση από το 3^ο σενάριο πυρκαγιάς με αποτέλεσμα η παροχή αιχμής για την πυρκαγιά του 2009 στις συγκεκριμένες θέσεις να υπερέχει και του 3^ο σεναρίου. Επιπλέον, εξετάζοντας τα αποτελέσματα σε ολόκληρη την λεκάνη όπως ήταν αναμενόμενο η παροχή αιχμής του 3^ο σεναρίου υπερβαίνει τις παροχές αιχμής των υπολοίπων. Αξίζει να σημειωθεί επίσης, ότι το υδρογράφημα του 1^ο σεναρίου ταυτίζεται με το υδρογράφημα πριν την πυρκαγιά, αφού το συγκεκριμένο σενάριο επηρέασε στο ελάχιστο την έκταση της λεκάνης απορροής.

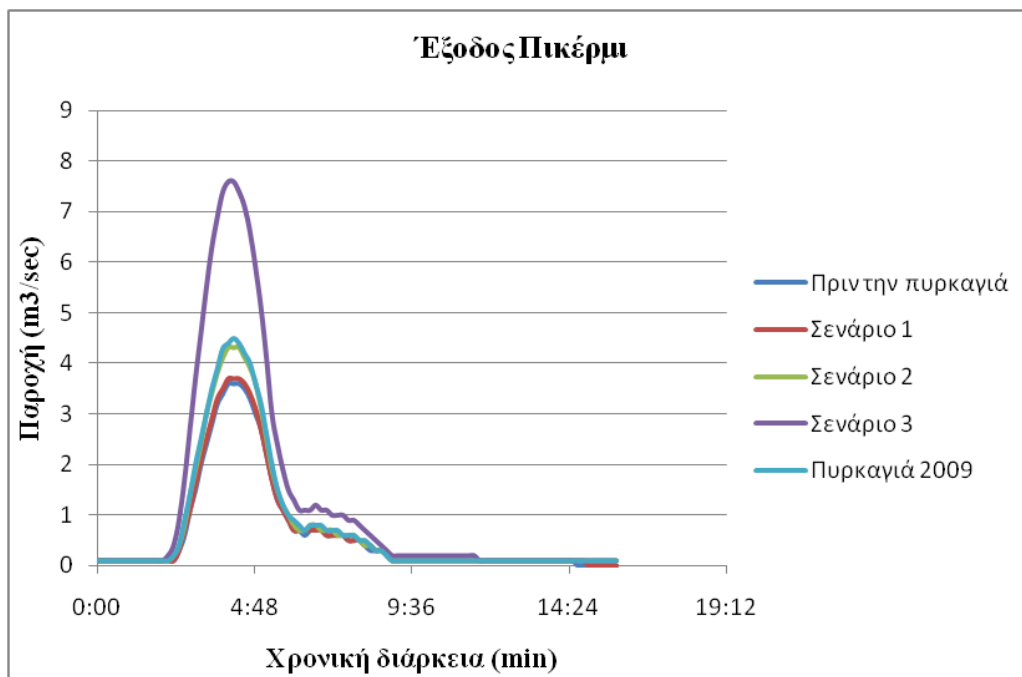
Όμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και στα επεισόδια βροχόπτωσης στις 17/11/2008 και στις 12/12/2008.

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για επεισόδια βροχόπτωσης τα οποία δεν συμπεριλήφθηκαν στη διαδικασία της βαθμονόμησης του μοντέλου. Τα επεισόδια αυτά σημειώθηκαν στις 6/12/2009, 11/12/2009 και 17/10/2010 (πίν 7-3).

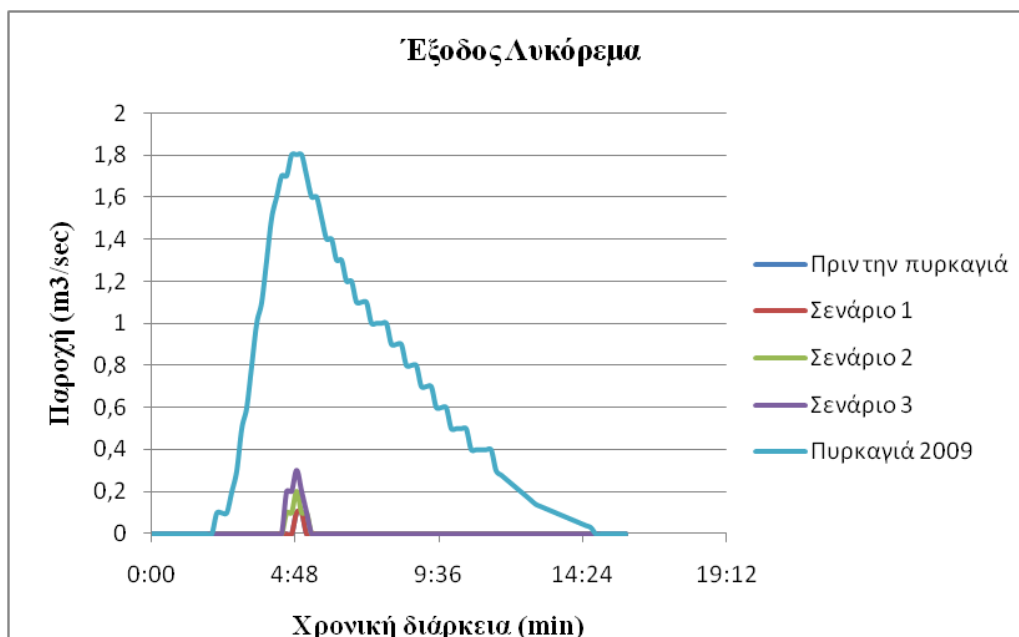
Ενδεικτικά παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το επεισόδιο 6/12/2009 σε κάθε θέση εξόδου των πέντε υπολεκανών (Διάγραμμα 7-4).

Επεισόδιο 6/12/2009

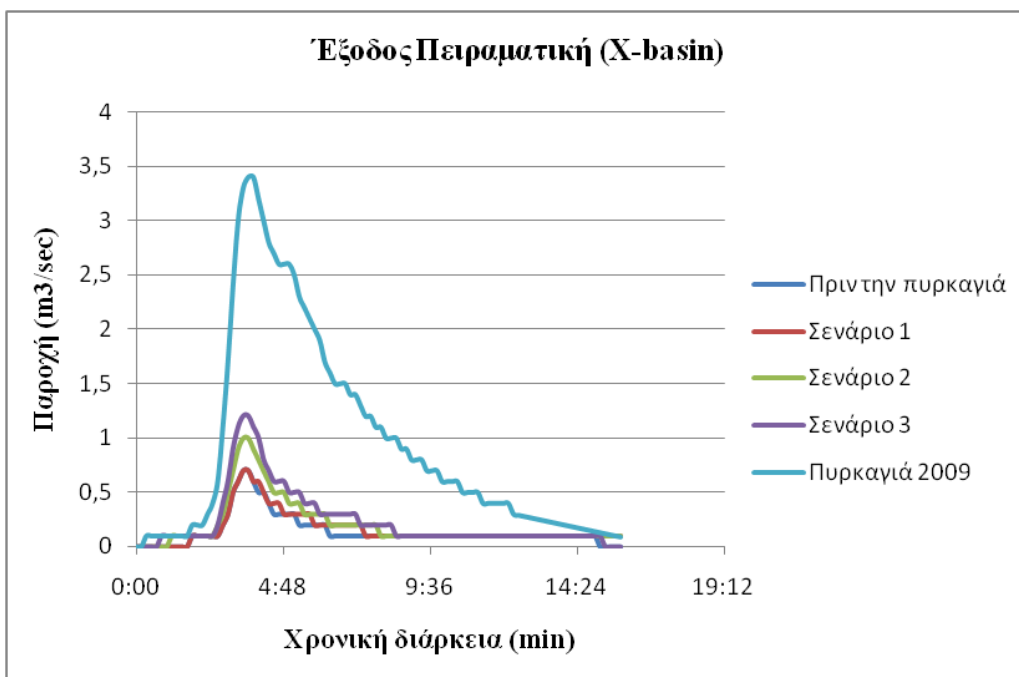
- Έξοδος υπολεκάνης 1: Πικέρμι



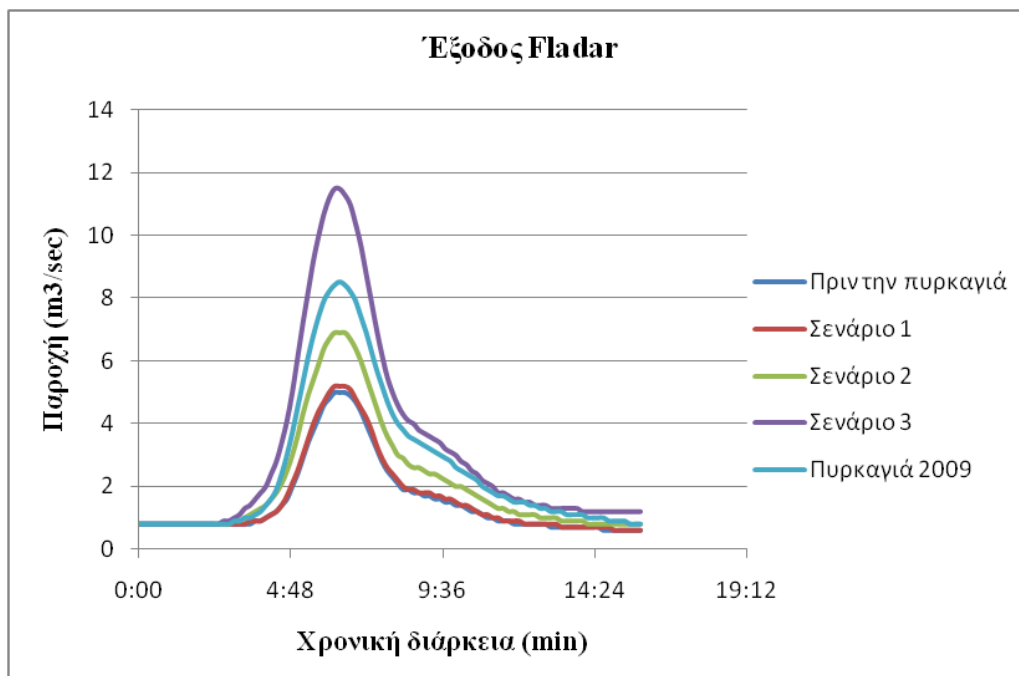
- Έξοδος υπολεκάνης 2: Λυκόρεμα



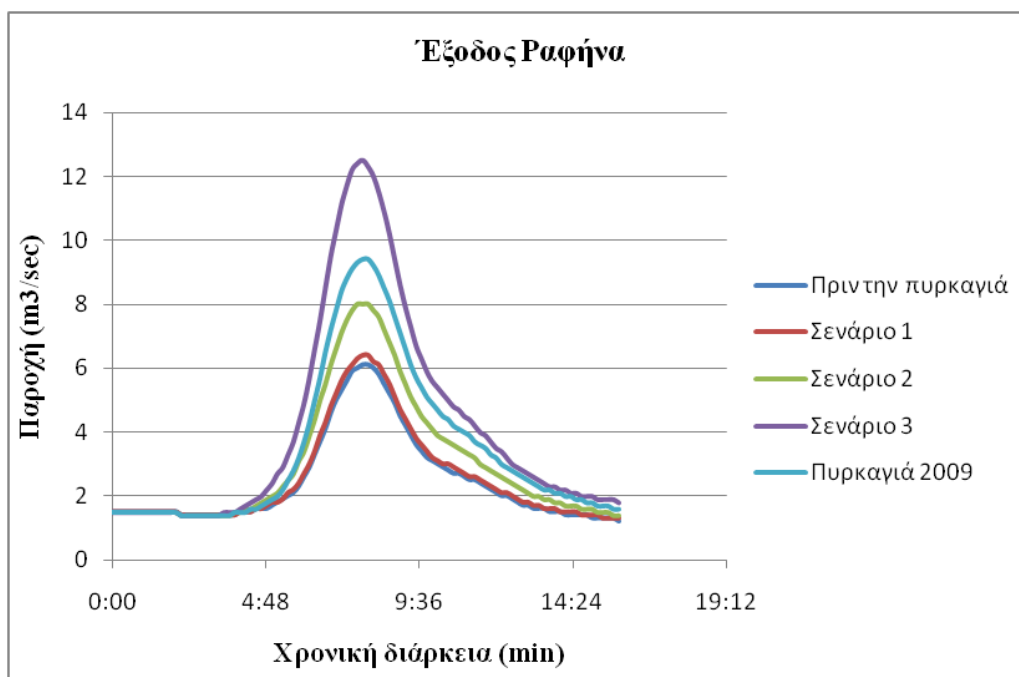
- Έξοδος υπολεκάνης 3: Πειραματική λεκάνη (X-basin)



- Έξοδος υπολεκάνης 4: Έξοδος πριν τον οικισμό της Ραφήνας (θέση Fladar)



- Έξοδος υπολεκάνης 5: Έξοδος Ραφήνα



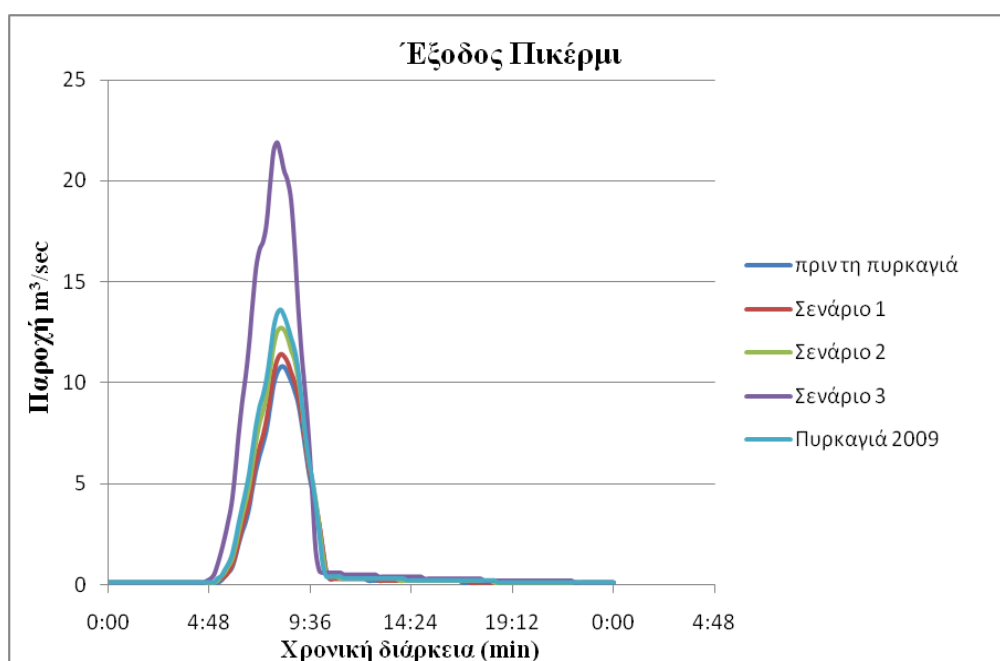
Διάγραμμα 7-4 Υδρογραφήματα πριν και μετά τις υπό μελέτη πυρκαγιές (6/12/2009) (επαναπροσδιορισμός CN, I_a)

Τα αποτελέσματα των διεργασιών για τα επεισόδια 6/12/2009, 11/12/2009 και 17/10/2010 ταυτίστηκαν με τα αποτελέσματα των επεισοδίων της βαθμονόμησης ως προς το βαθμό επηρεασμού της καμένης έκτασης στην παροχή αιχμής σε κάθε θέση παρατήρησης.

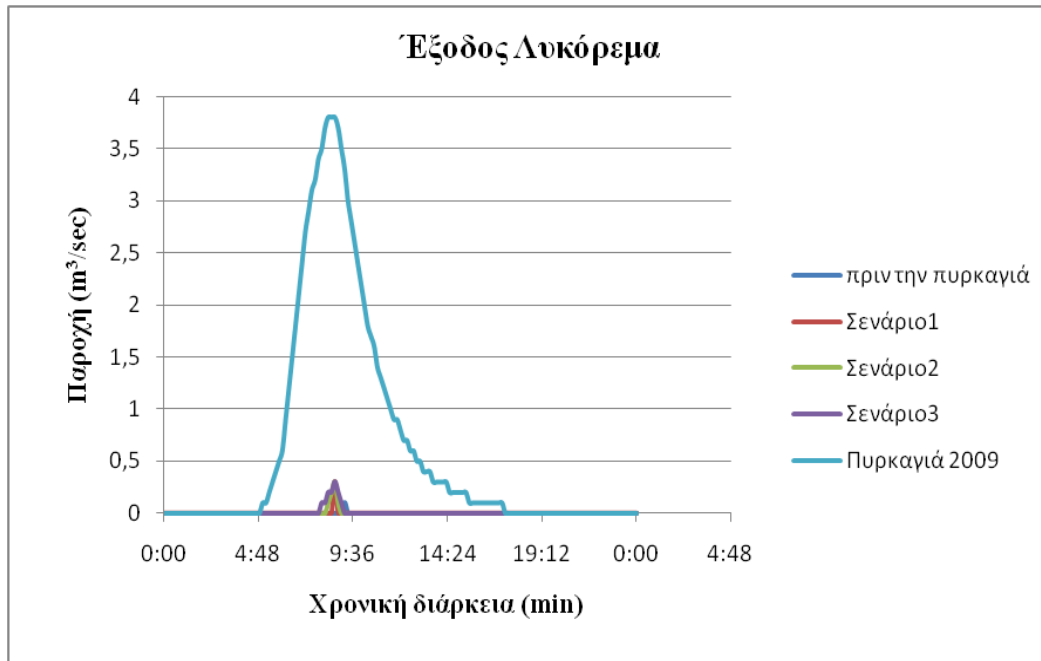
Η παραπάνω διεργασία πραγματοποιήθηκε και με την προσέγγιση επαναπροσδιορισμού των τριών παραμέτρων (CN, I_w , t_p) δίνοντας όμοια αποτελέσματα για όλα τα επεισόδια βροχόπτωσης. Ενδεικτικά παρατίθενται τα αποτελέσματα για το επεισόδιο βροχόπτωσης 8/2/2009 σε κάθε θέση εξόδου των πέντε υπολεκανών (Διάγραμμα 7-5).

Επεισόδιο 8/2/2009

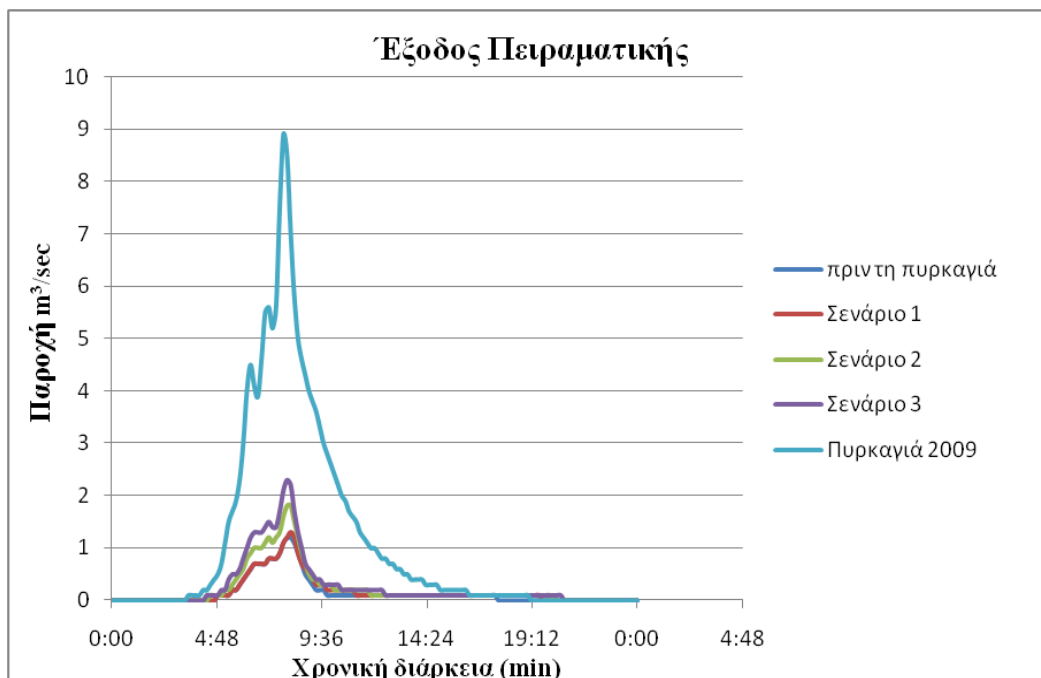
- Έξοδος υπολεκάνης 1: Πικέρμι



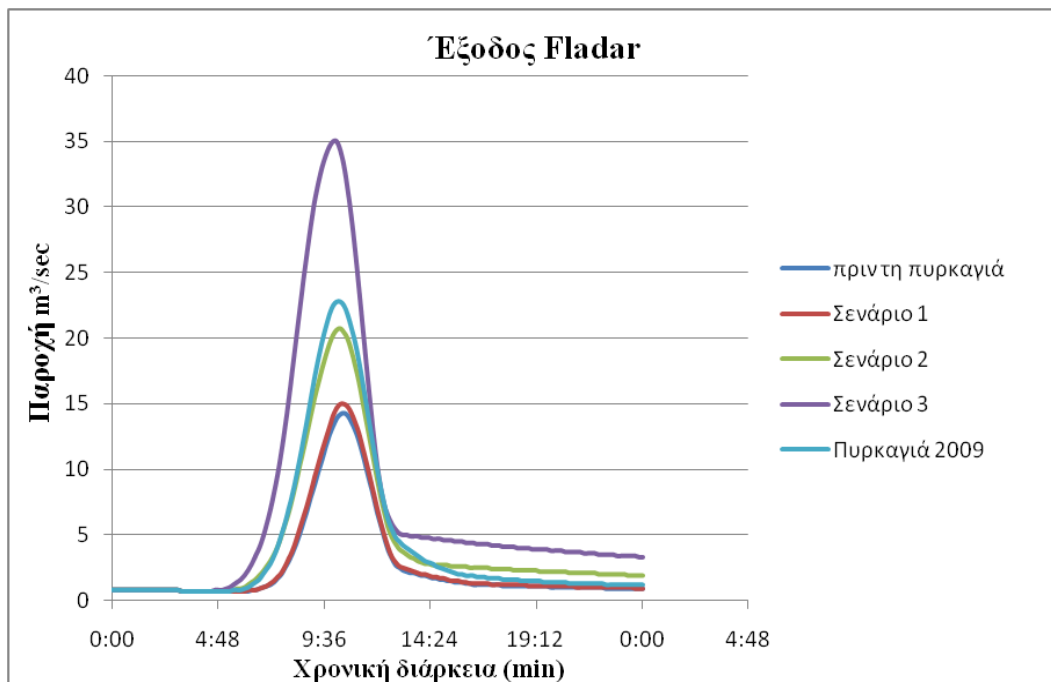
- Έξοδος υπολεκάνης 2: Λυκόρεμα



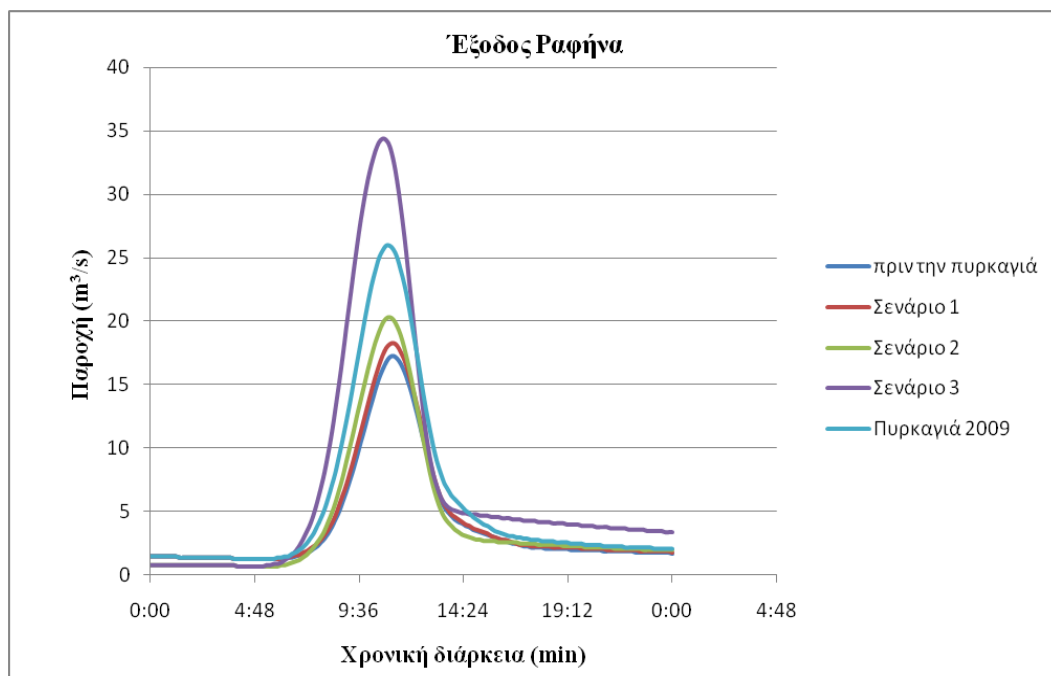
- Έξοδος υπολεκάνης 3: Πειραματική λεκάνη (X-basin)



- Έξοδος υπολεκάνης 4: Έξοδος πριν τον οικισμό της Ραφήνας (θέση Fladar)



- Έξοδος υπολεκάνης 5: Έξοδος Ραφήνα



Διάγραμμα 7-5 Υδρογραφήματα πριν και μετά τις υπό μελέτη πυρκαγιές (6/12/2009) (επαναπροσδιορισμός CN, I_a, t_p)

7.3 Συσχέτιση καμένης έκτασης και παροχών αιχμής για τις υπό μελέτη πυρκαγιές

Τα αποτελέσματα των υδρολογικών προσομοιώσεων για τα παραπάνω επεισόδια βροχόπτωσης συσχετίστηκαν με το ποσοστό καμένης έκτασης των εκάστοτε υπό μελέτη πυρκαγιών. Ο υπολογισμός των παροχών αιχμής πραγματοποιήθηκε στην έξοδο της Ραφήνας, θέση η οποία παρουσιάζει ενδιαφέρον ως προς την πλημμυρική επικινδυνότητα

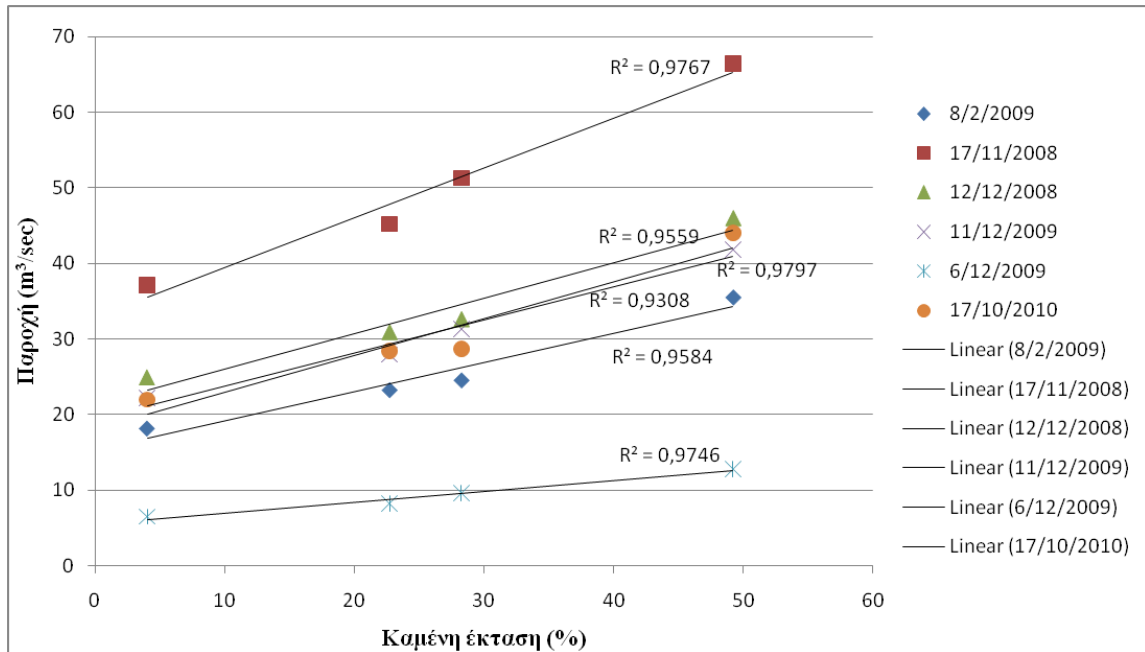
Για καλύτερη κατανόηση της διεργασίας που ακολούθησε, παρατίθεται ο συνολικός πίνακας των ποσοστών καμένων εκτάσεων ανά πυρκαγιά και ο πίνακας των χαρακτηριστικών βροχόπτωσης για κάθε επεισόδιο.

Πίνακας 7-3 Συνολικός πίνακας ποσοστού καμένης έκτασης για κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά

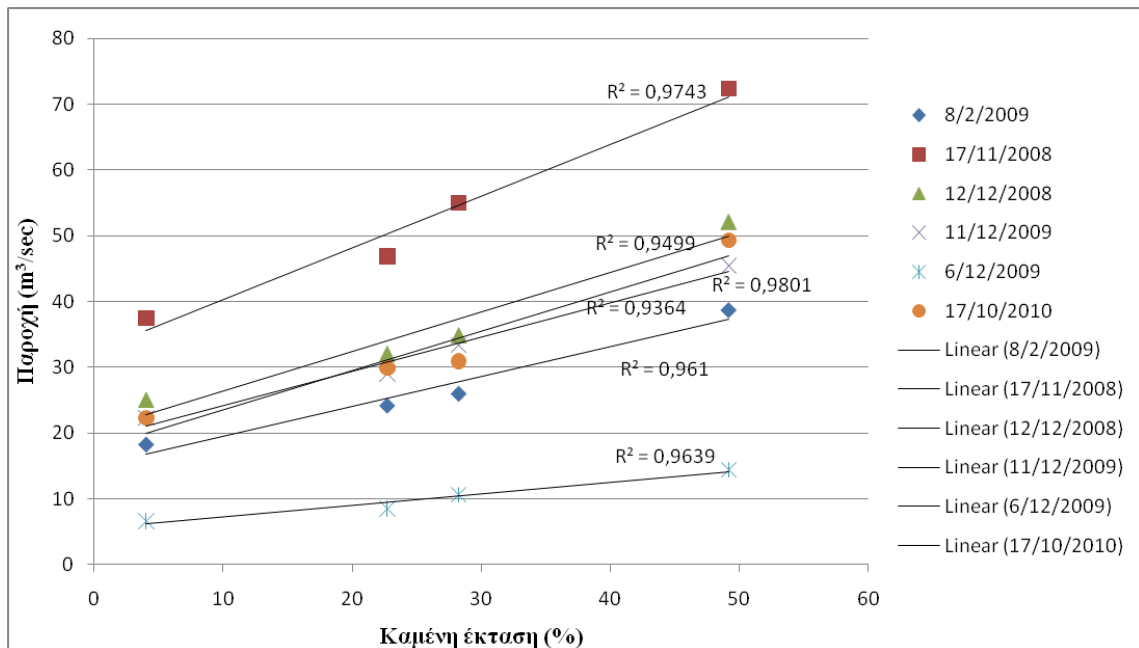
Υπό μελέτη πυρκαγιές	Καμένη έκταση (%)
Σενάριο 1 ^ο	4,0
Σενάριο 2 ^ο	23,0
Σενάριο 3 ^ο	49,0
Πυρκαγιά 2009	28,0

Πίνακας 7-4 Χαρακτηριστικά βροχόπτωσης για κάθε υπό μελέτη επεισόδιο

Επεισόδια βροχόπτωσης	Ύψος βροχόπτωσης (mm)	Ένταση βροχόπτωσης (mm/hr)
8/2/2009	24,3	4,5
12/12/2008	33,6	7,5
17/11/2008	41,0	8,0
11/12/2009	34,0	6,0
6/12/2009	17,6	3,3
17/10/2010	39,0	6,0



Διάγραμμα 7-6 Συσχέτιση παροχών αιχμής με ποσοστό καμένης έκτασης (επαναπροσδιορισμός CN, I_a)



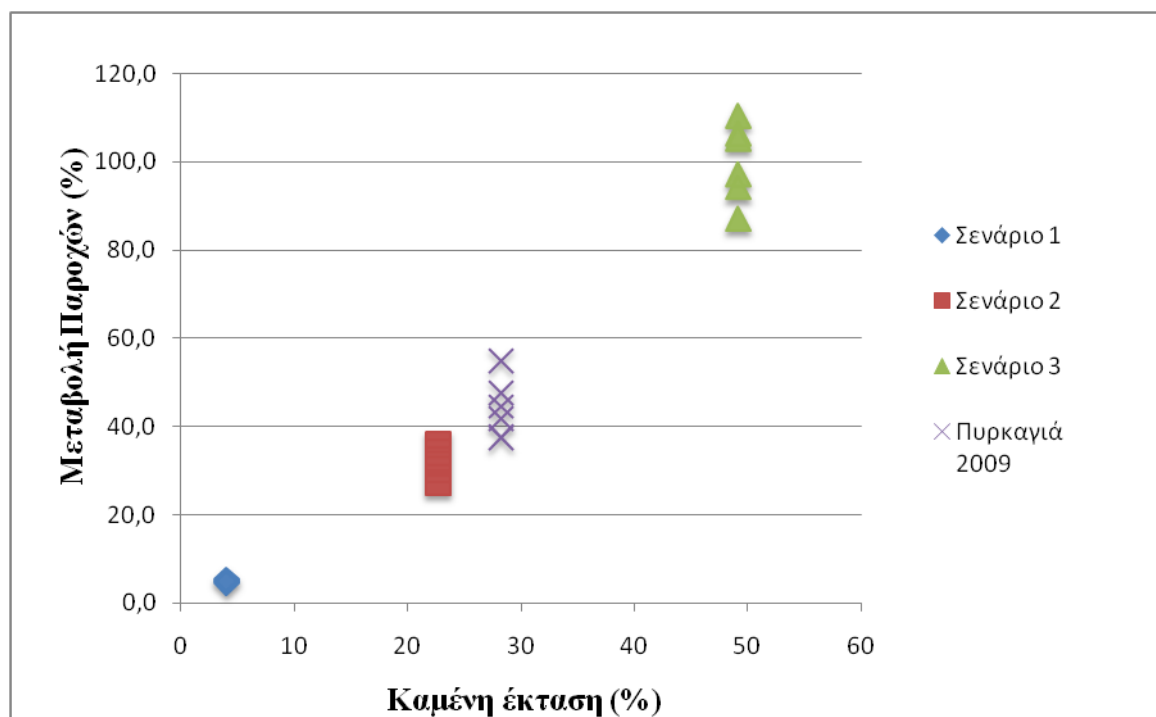
Διάγραμμα 7-7 Συσχέτιση παροχών αιχμής με ποσοστό καμένης έκτασης (επαναπροσδιορισμός CN, I_a, t_p)

Από το παραπάνω διάγραμμα διαπιστώνεται η γραμμική σχέση μεταξύ της καμένης έκτασης και της παροχής αιχμής, με μεγάλο συντελεστή συσχέτισης για όλα τα επεισόδια που εξετάστηκαν.

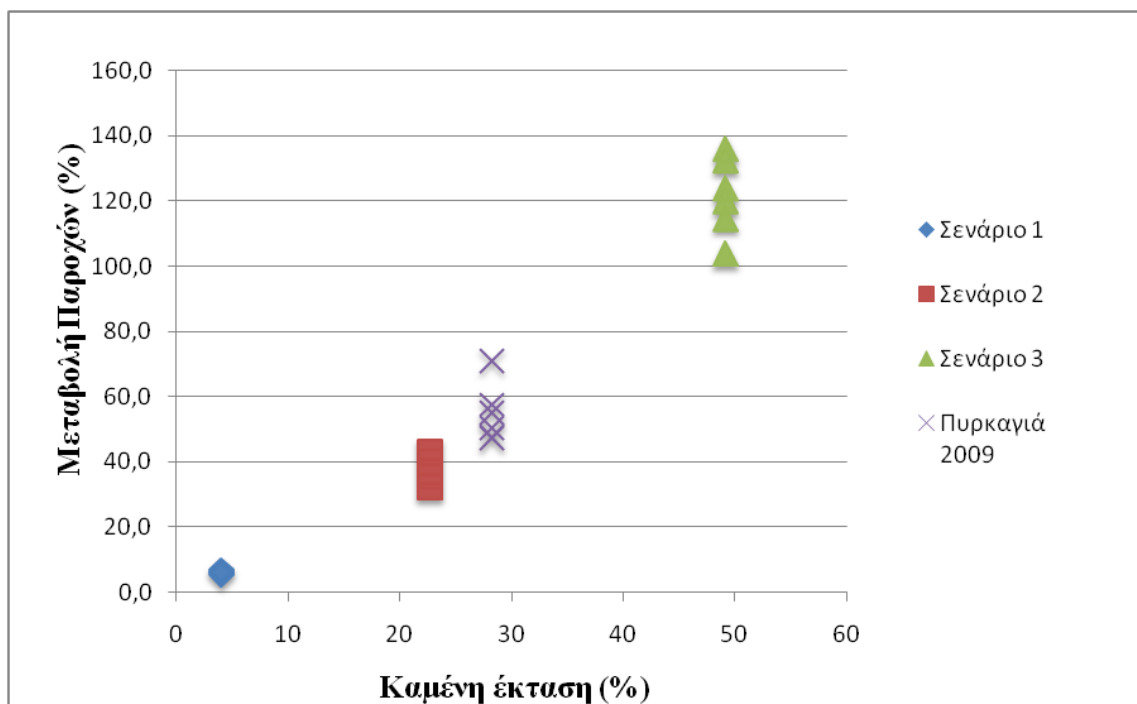
Τα παραπάνω επεισόδια, όπως φαίνεται και από τον πίνακα (7-4) αναφέρονται σε διαφορετικά ύψη βροχής και παράλληλα σε διαφορετικές εντάσεις βροχόπτωσης. Μελετώντας τα χαρακτηριστικά βροχόπτωσης των επεισοδίων και το διάγραμμα 7-6,7 γίνεται κατανοητό ότι κυρίαρχο ρόλο παίζει η ένταση βροχόπτωσης όπου όσο αυξάνεται τόσο αυξάνεται και η παροχή αιχμής για κάθε ποσοστό καμένης έκτασης. Ακόμα παρατηρείται ότι επεισόδια με κοινά χαρακτηριστικά, όπως τα επεισόδια 11/12/2009 και 17/10/2010, τείνουν να ομαδοποιήσουν τα αποτελέσματά τους.

Μετά τη διερεύνηση της σχέσης παροχής σε συνάρτηση του ποσοστού καμένης έκτασης ακολούθησε και ο υπολογισμός της μεταβολής των παροχών αιχμής πριν και μετά την πυρκαγιά.

Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο παρακάτω διάγραμμα (7-8,9).



Διάγραμμα 7-8 Μεταβολή παροχών πριν και μετά την επίδραση πυρκαγιάς (επαναπροσδιορισμός CN, I_a)



Διάγραμμα 7-9 Μεταβολή παροχών πριν και μετά την επίδραση πυρκαγιάς (επαναπροσδιορισμός CN, I_a , tp)

Από το διάγραμμα 7-8 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό της καμένης έκτασης τόσο αυξάνεται η μεταβολή της παροχής αιχμής πριν και μετά την επίδραση πυρκαγιάς. Αναλυτικότερα, κατά το 1^ο σενάριο οι τιμές της παροχής αιχμής μεταβάλλονται κατά 5% ενώ για το 2^ο, 3^ο σενάριο και την πραγματική πυρκαγιά του 2009 η μεταβολή ανέρχεται σε 32%, 100% και 44% αντίστοιχα (οι τιμές αναφέρονται στο μέσο όρο των τιμών της μεταβολής των έξι επεισοδίων για κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά). Επίσης, από το διάγραμμα διαπιστώνεται ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό καμένης έκτασης αυξάνεται και το εύρος της μεταβολής. Το εύρος της μεταβολής (δηλ. μεγαλύτερη μείον μικρότερη τιμή μεταβολής για την ίδια υπό μελέτη πυρκαγιά) των υπό μελέτη επεισοδίων αναφέρεται στον παρακάτω πίνακα (7-5):

Πίνακας 7-5 Εύρος μεταβολής ανά υπό μελέτη πυρκαγιά

Υπό μελέτη πυρκαγιές	Εύρος μεταβολής (%) (CN, I_a)	Εύρος μεταβολής (%) (CN, I_a , tp)
Σενάριο 1 ^ο	0,8	1,5
Σενάριο 2 ^ο	8,6	11
Σενάριο 3 ^ο	23,5	32
Πυρκαγιά 2009	17,5	23,7

Αντίστοιχα αποτελέσματα παρατηρούνται και στο διάγραμμα 7-9, με την προσέγγιση επαναπροσδιορισμού των τριών παραμέτρων (CN, I_a , tp). Αναλυτικότερα, κατά το 1^ο σενάριο οι τιμές της παροχής αιχμή μεταβάλλονται κατά 6% ενώ για το 2^ο, 3^ο σενάριο και την πραγματική πυρκαγιά του 2009 η μεταβολή ανέρχεται σε 38%, 122% και 55% αντίστοιχα (οι τιμές αναφέρονται στο μέσο όρο των τιμών της μεταβολής των έξι επεισοδίων για κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά). Το εύρος της μεταβολής και με την παραπάνω προσέγγιση παρατίθενται στον πίνακα 7-5.

7.4 Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων υδρογραφημάτων μετά την πυρκαγιά του 2009

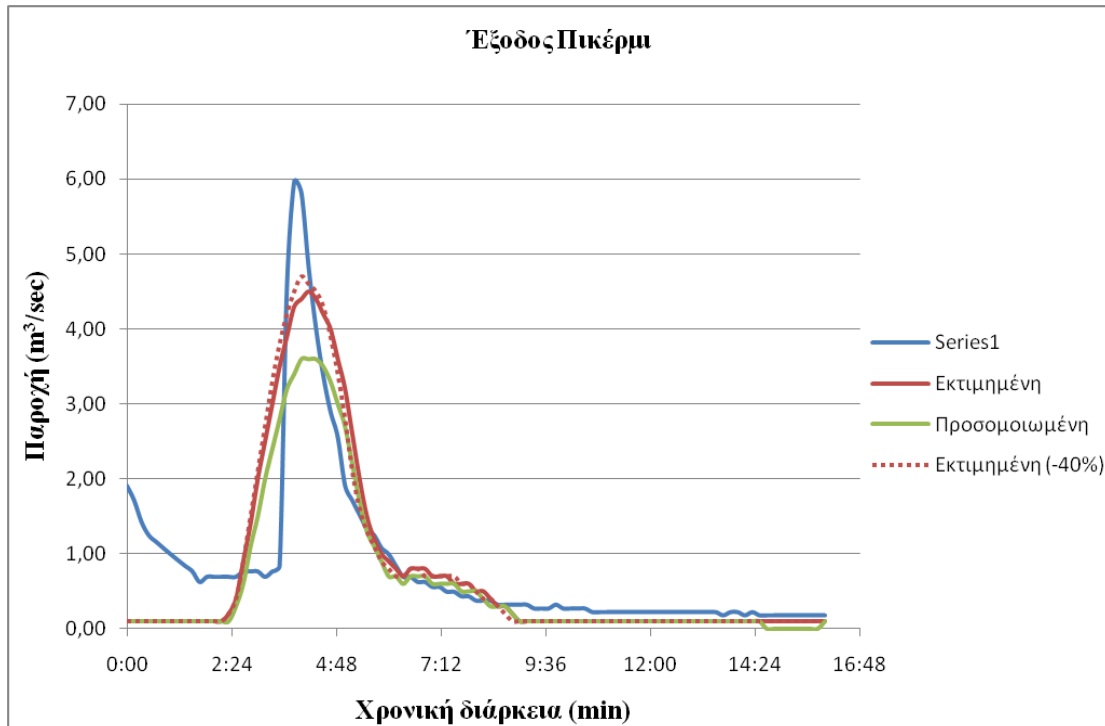
Στην συγκεκριμένη ενότητα πραγματοποιείται σύγκριση των υδρογραφημάτων που προέκυψαν από την υδρολογική προσομοίωση με τη χρήση του μοντέλου HEC-HMS, σύμφωνα με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της μελέτης αυτής, και των παρατηρημένων υδρογραφημάτων μετά την πυρκαγιά του 2009 σε διάφορες θέσης μέτρησης στη λεκάνη. Ταυτόχρονα, γίνεται σύγκριση και με τα προσομοιωμένα υδρογραφήματα που προέκυψαν από το μοντέλο, σύμφωνα με τις συνθήκες που επικρατούσαν πριν την επίδραση της πυρκαγιάς.

Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων αναφέρεται η ορολογία που ορίστηκε για τις ανάγκες της σύγκρισης ως εξής:

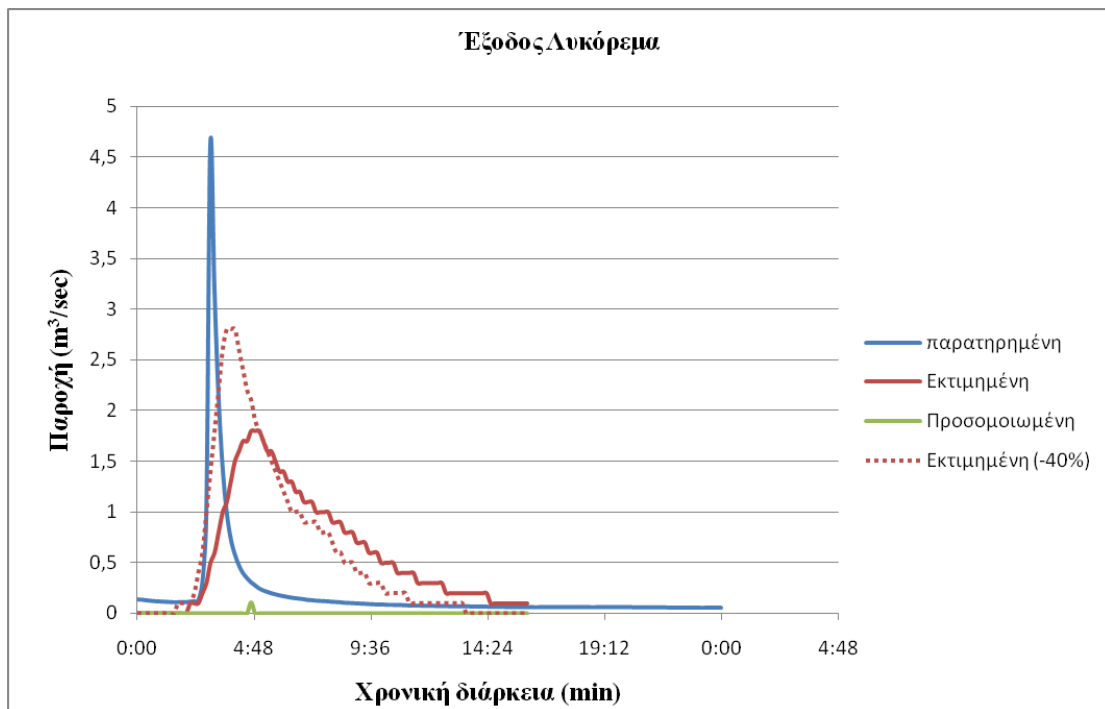
- Παρατηρημένη = Μετρημένη απορροή
- Εκτιμημένη = Υπολογισμένη απορροή – επαναπροσδιορισμός τιμών αριθμού καμπύλης (CN) και αρχικής κατακράτησης (I_a)
- Εκτιμημένη (-40%) = Υπολογισμένη απορροή - επαναπροσδιορισμός τιμών αριθμού καμπύλης (CN), αρχικής κατακράτησης (I_a) και χρόνου υστέρησης (tp)
- Προσομοιωμένη = Υπολογισμένη απορροή - τιμές παραμέτρων πριν την επίδραση πυρκαγιάς

📌 Επεισόδιο 6/12/2009 (4 μήνες μετά την πυρκαγιά)

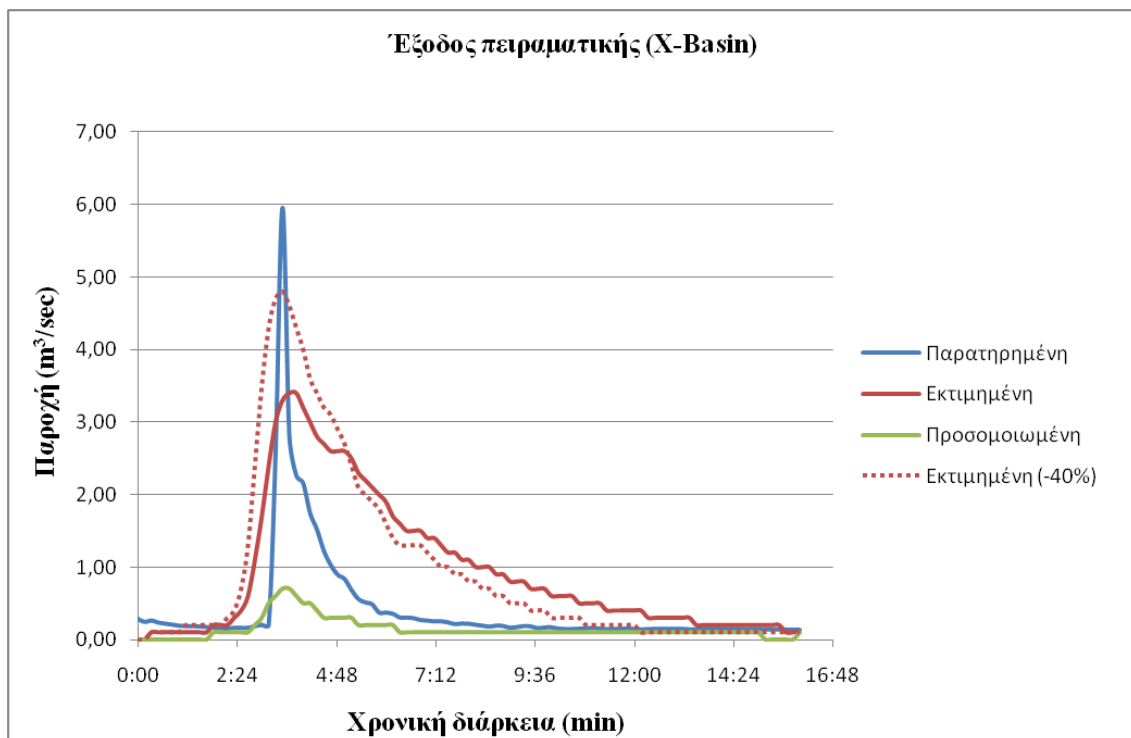
• Έξοδος υπολεκάνης 1: Πικέρμι




• Έξοδος υπολεκάνης 2: Λυκόρεμα

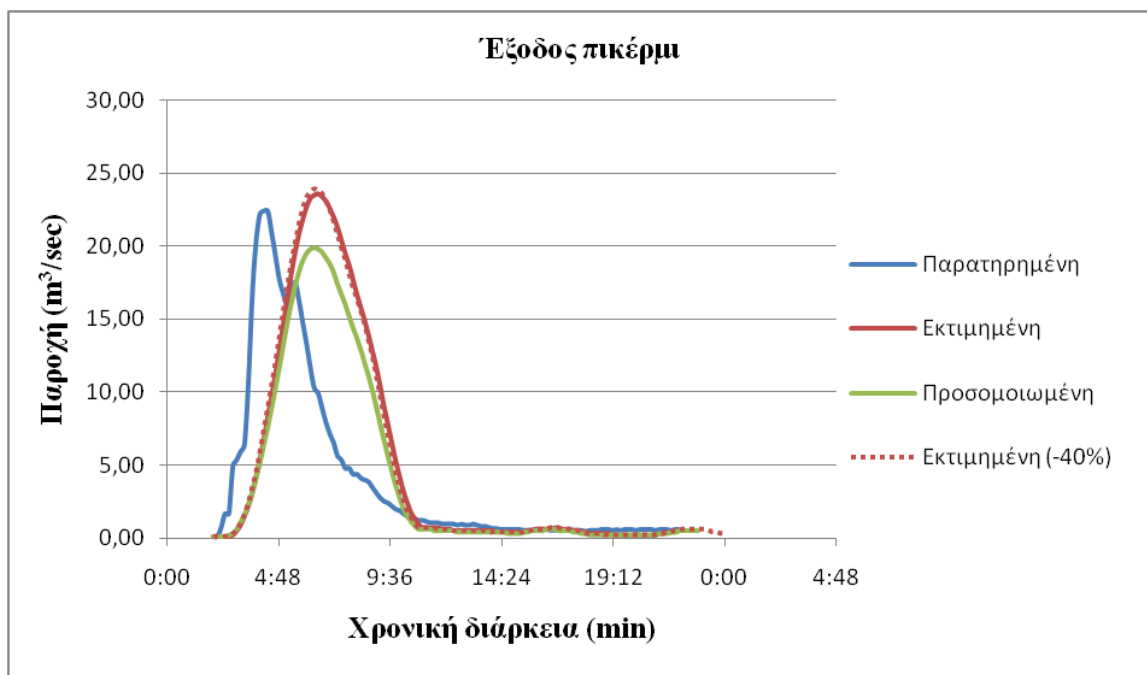


- Έξοδος υπολεκάνης 3: Πειραματική λεκάνη (X-basin)

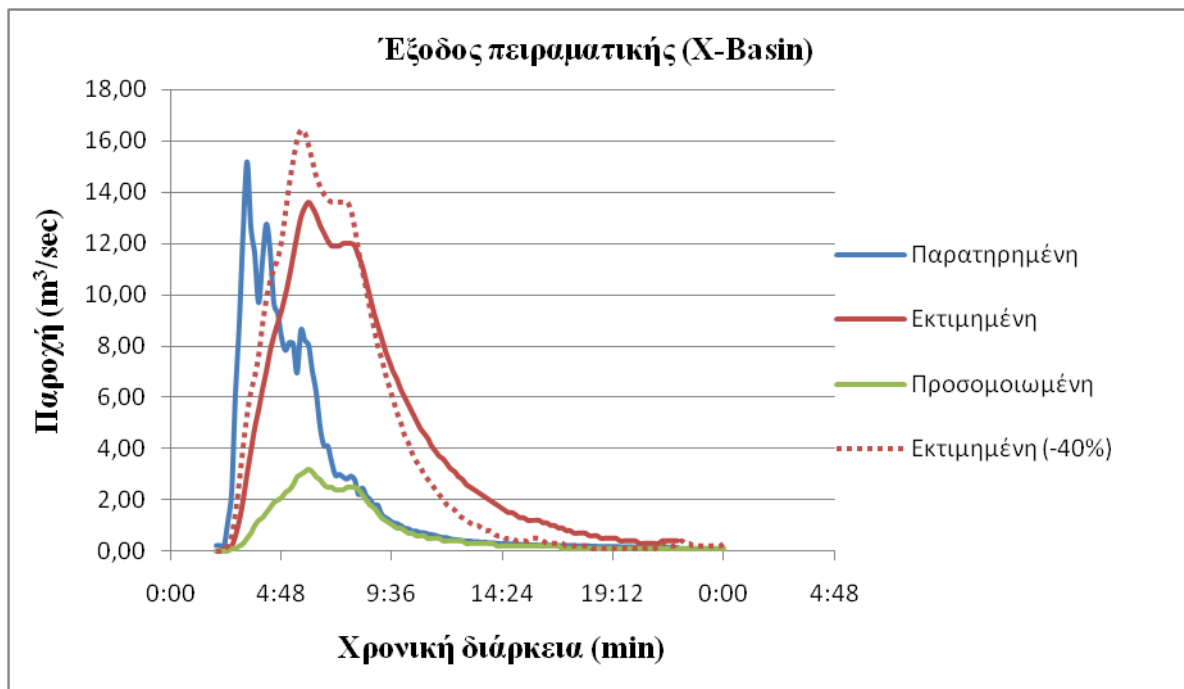


 Επεισόδιο 11/12/2009 (4 μήνες μετά την πυρκαγιά)

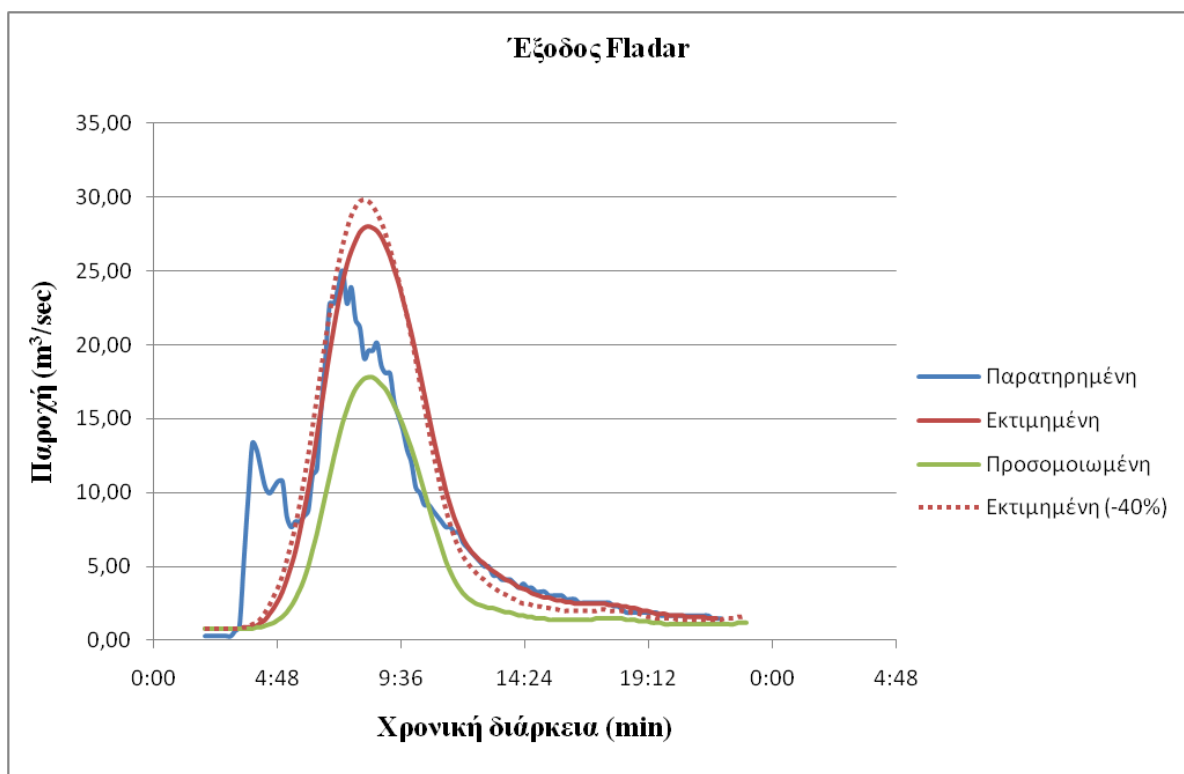
- Έξοδος υπολεκάνης 1: Πικέρμι



- Έξοδος υπολεκάνης 3: Πειραματική λεκάνη (X-basin)

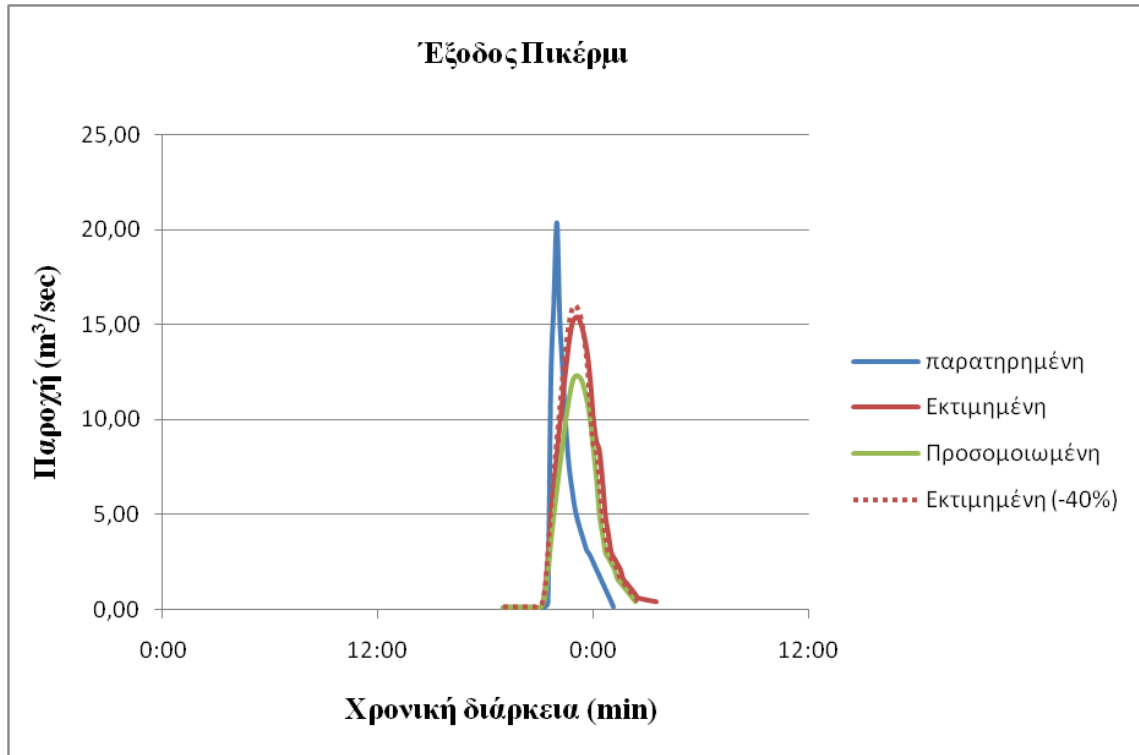


- Έξοδος υπολεκάνης 4: Έξοδος πριν τον οικισμό της Ραφήνας (θέση Fladar)

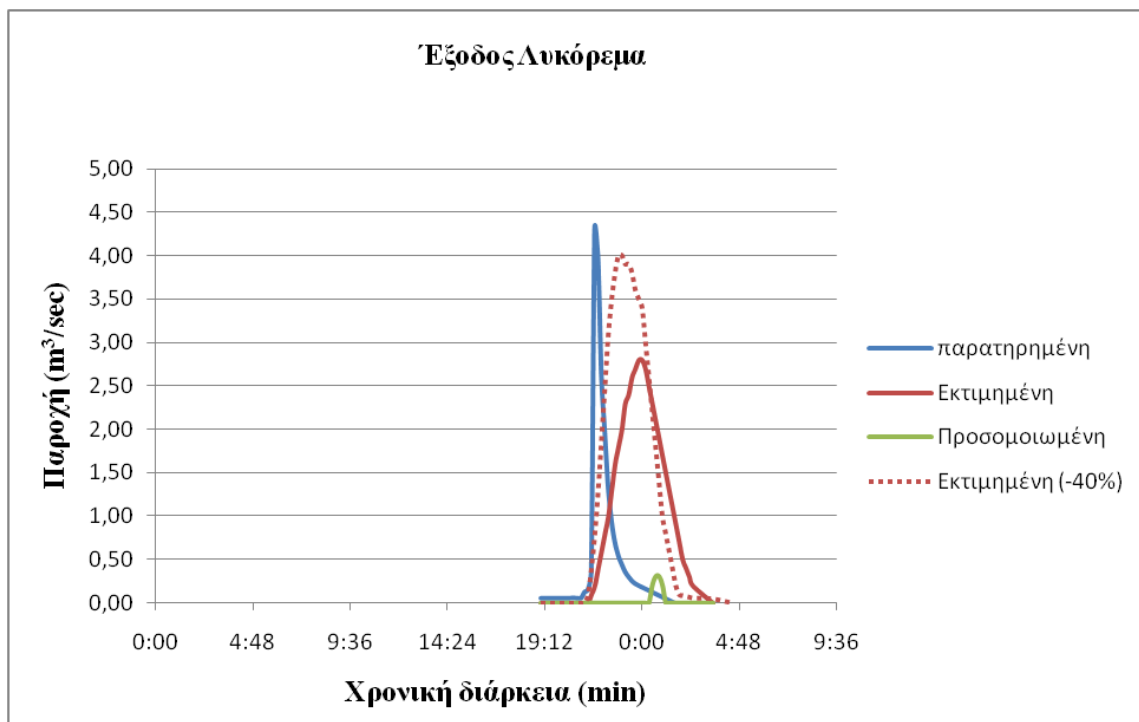


 Επεισόδιο 17/10/2010 (1 χρόνο και 4 μήνες μετά την πυρκαγιά)

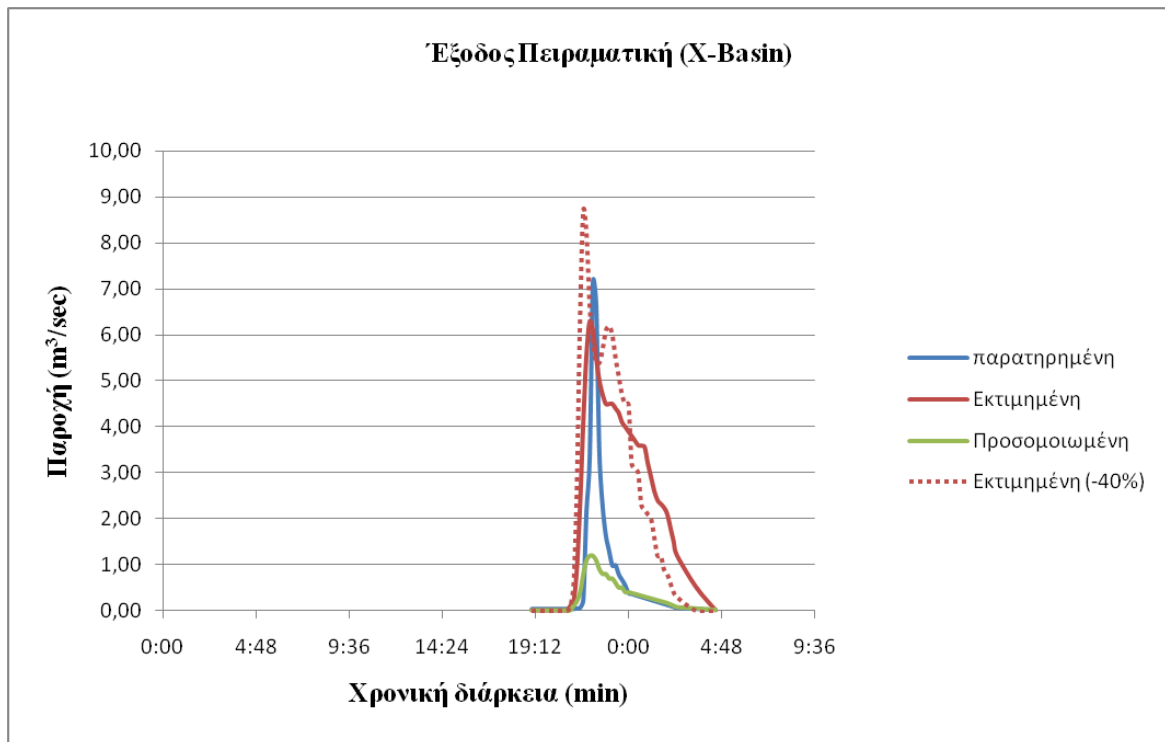
• Έξοδος υπολεκάνης 1: Πικέρμι



• Έξοδος υπολεκάνης 2: Λυκόρεμα



- Έξοδος υπολεκάνης 3: Πειραματική λεκάνη (X-basin)



Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των υπολογισμένων υδρογραφημάτων με τα παρατηρημένα, για επεισόδια βροχόπτωσης που σημειώθηκαν μετά την πυρκαγιά του 2009, γενικά μαρτυρούν την αναγκαιότητα επαναπροσδιορισμού των παραμέτρων του μοντέλου για τις συνθήκες που επικρατούν μετά την επίδραση της πυρκαγιάς. Αρχικά συγκρίνοντας το παρατηρημένο υδρογράφημα με το προσομοιωμένο (τιμές παραμέτρων πριν την πυρκαγιά) διαπιστώνεται η μεγάλη διαφορά στην υδρολογική συμπεριφορά των υπολεκανών μετά την πυρκαγιά. Συγκεκριμένα, σε όλες τις θέσεις μετρήσεων για τα παραπάνω επεισόδια, το προσομοιωμένο υδρογράφημα υπολείπεται του παρατηρημένου, εμφανίζοντας την μεγαλύτερη διαφορά στις υπολεκάνες 2 και 3 (Λυκόρεμα και Πειραματική). Η μεγάλη διαφορά στις προαναφερθείσες υπολεκάνες είναι αναμενόμενη λόγω επίδρασης της πυρκαγιάς στο μέγιστο βαθμό στις υπολεκάνες αυτές. Αντίθετα στην υπολεκάνη 3 (Πικέρμι) λόγω του μικρού βαθμού επηρεασμού της συγκεκριμένης πυρκαγιάς παρουσιάζεται η μικρότερη διαφορά μεταξύ παρατηρημένου και προσομοιωμένου υδρογραφήματος.

Όσον αφορά την σύγκριση των παρατηρημένων υδρογραφημάτων και των εκτιμημένων (εκτιμημένη και εκτιμημένη (-40%)) διαπιστώνεται ότι η μεθοδολογία

που αναπτύχθηκε προσεγγίζει καλύτερα την υδρολογική συμπεριφορά των υπολεκανών μετά την πυρκαγιά. Σε γενικές γραμμές, και οι δύο προσεγγίσεις υπερτιμούν τον όγκο απορροής αλλά ταυτόχρονα προσεγγίζουν καλύτερα την παροχή αιχμής, με την τελευταία προσέγγιση – εκτιμημένη (-40%) – κατά την οποία επαναπροσδιορίζονται και οι τρεις παράμετροι (CN, I_a , tp) να δίνει καλύτερα αποτελέσματα σχεδόν σε όλες τις θέσεις παρατήρησης.

Αναλυτικότερα, από τα αποτελέσματα της σύγκρισης για τη θέση εξόδου της υπολεκάνης 1 (Πικέρμι) παρατηρείται ότι ο χρόνος υστέρησης στην πραγματικότητα μειώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι είχε εκτιμηθεί. Παρολ'αυτά προσεγγίζεται ικανοποιητικά τόσο η τιμή της παροχής αιχμής όσο και ο όγκος απορροής, με καλύτερη προσέγγιση ως προς την παροχή αιχμής στο επεισόδιο 11/12/2009 και ως προς τον όγκο απορροής στα επεισόδια 11/12/2009 και 17/10/2010.

Αναφορικά με τα αποτελέσματα στη θέση εξόδου της υπολεκάνης 2 (Λυκόρεμα) η προσέγγιση κατά την οποία επαναπροσδιορίστηκαν και οι τρεις παράμετροι του μοντέλου (CN, I_a , tp) δίνει καλύτερα αποτελέσματα ως προς την εκτίμηση της παροχής αιχμής στα επεισόδια 6/12/2009 και 17/10/2010, ενώ στο τελευταίο επεισόδιο προσεγγίζεται καλύτερα και ο όγκος απορροής.

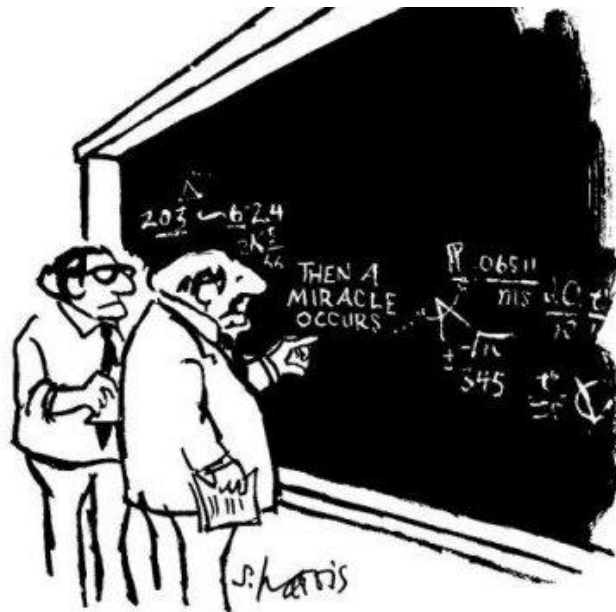
Όσον αφορά την σύγκριση των υδρογραφημάτων στη υπολεκάνη 3 (έξοδος πειραματικής λεκάνης) για τα επεισόδια βροχόπτωσης 6/12/2009 και 11/12/2009 η παροχή αιχμής εκτιμάται καλύτερα με τη μέθοδο επαναπροσδιορισμού των τριών παραμέτρων (CN, I_a , tp) ενώ για το επεισόδιο που σημειώθηκε στις 17/10/2010 η παραπάνω μέθοδος υπερτιμάει σε μικρό βαθμό την τιμή της παροχής, με καλύτερη προσέγγιση της μεθόδου επαναπροσδιορισμού των δύο παραμέτρων (CN, I_a). Αξίζει να σημειωθεί ότι και στα τρία επεισόδια υπερεκτιμάται ο όγκος απορροής.

Τέλος, στην πιο σημαντική θέση ως προς την πλημμυρική επικινδυνότητα, τη θέση fladar (πριν τον οικισμό της Ραφήνας) από τη σύγκριση των υδρογραφημάτων για το επεισόδιο 11/12/2009 διαπιστώνεται η ικανοποιητική προσέγγιση του παρατηρημένου υδρογραφήματος με τη μέθοδο επαναπροσδιορισμού των δύο παραμέτρων (CN, I_a) τόσο σε επίπεδο παροχής αιχμής όσο και σε όγκο απορροής.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα &

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα



"I THINK YOU SHOULD BE MORE EXPLICIT HERE IN STEP TWO."

8. Συμπεράσματα & Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πλαισίου εκτίμησης της μεταβολής της υδρολογικής απόκρισης των λεκανών απορροής μετά την επίδραση πυρκαγιάς.

Τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας συνοψίζονται ως εξής:

από μοντέλο διαχείρισης δασικών πυρκαγιών (G-FMIS):

- η καμένη έκταση αυξάνεται όταν αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου και παράλληλα μειώνεται η υγρασία της καύσιμης ύλης, με τον πρώτο παράγοντα να επηρεάζει περισσότερο το τελικό αποτέλεσμα
- παρατηρείται ανομοιόμορφη εξάπλωση της πυρκαγιάς στα διάφορα τμήματα της λεκάνης, η οποία οφείλεται κυρίως στην διαφορετικότητα της καύσιμης ύλης
- διακρίνεται αναντιστοιχία στο σχήμα των καμένων εκτάσεων λόγω ότι οι εξισώσεις που διαθέτει το μοντέλο ισχύουν για εκτάσεις δασώδεις, θαμνώδεις και λιβαδικές, αδυνατώντας να προσομοιώσει την εξάπλωση πυρκαγιάς σε αστικές χρήσεις γης
- το τελικό ποσοστό καμένης έκτασης για το 1^ο, 2^ο και 3^ο σενάριο ανέρχεται σε 4%, 23% και 49% αντίστοιχα

από διερεύνηση της πυρκαγιάς του 2009:

- σύμφωνα με τη ψηφιοποίηση της καμένης έκτασης της πυρκαγιάς του 2009 από δορυφορική εικόνα, η πυρκαγιά κατέκαψε 35.000 στρ, το 28% της περιοχής μελέτης
- επηρέασε κυρίως τις δασικές εκτάσεις κατά 20,2%, ενώ το ποσοστό που επηρέασε τις αστικές και καλλιεργήσιμες περιοχές ανέρχεται στο 5,0% και στο 2,4% αντίστοιχα

από μεθοδολογία επαναπροσδιορισμού υδρολογικών παραμέτρων:

- οι τιμές του αριθμού καμπύλης μεταβάλλονται ανάλογα την έκταση που επηρεάζει η εκάστοτε πυρκαγιά. Αναλυτικότερα, οι υπολεκάνες 2 και 3, οι οποίες ουσιαστικά αποτελούν την πειραματική λεκάνη (X-basin), παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη μεταβολή στην τιμή CN για την πυρκαγιά του 2009, με ποσοστιαία μεταβολή 137% και 73% αντίστοιχα. Αξιοσημείωτες μεταβολές του αριθμού καμπύλης παρουσιάζει και η υπολεκάνη 4 στο 2^ο και 3^ο σενάριο πυρκαγιάς με ποσοστιαία μεταβολή 34% και 56% αντίστοιχα.
- λόγω της πολύ μικρής έκτασης που επηρεάζει η πυρκαγιά του 1^ο σεναρίου, παρατηρείται ελάχιστη διαφοροποίηση στις τιμές του CN, για όλες τις υπολεκάνες
- οι τιμές της αρχικής κατακράτησης μειώνονται σημαντικά στις υπολεκάνες που εκτιμήθηκε μεγάλη αύξηση του αριθμού καμπύλης, λόγω της αντιστρόφως ανάλογης σχέσης της αρχικής κατακράτησης με τον αριθμό καμπύλης
- ο χρόνος υστέρησης, ο οποίος εκτιμήθηκε σύμφωνα με αναφορές στην διεθνή βιβλιογραφία τείνει να αντιπροσωπεύει σε μεγαλύτερο βαθμό τις συνθήκες της πειραματικής λεκάνης

από μοντέλο υδρολογικής προσομοίωσης (HEC-HMS):

- από τα υδρογραφήματα που προέκυψαν διαπιστώνεται ο μεγάλος βαθμός επηρεασμού της καμένης έκτασης στην υδρολογική συμπεριφορά τόσο σε επίπεδο υπολεκανών όσο και σε ολόκληρη τη λεκάνη
- όσο μικρότερη έκταση έχει η λεκάνη τόσο μεγαλύτερη αύξηση παρουσιάζεται στην τιμή της παροχής αιχμής
- διαπιστώνεται επίσης ότι όσο αυξάνεται το εμβαδό της καμένης έκτασης τόσο αυξάνεται και η παροχή αιχμής στις εξόδους των υπολεκανών

από συσχέτιση καμένης έκτασης και παροχών αιχμής για τις υπό μελέτη πυρκαγιές

- διαπιστώνεται ακόμα γραμμική συσχέτιση μεταξύ της καμένης έκτασης και της παροχής αιχμής, με μεγάλο συντελεστή συσχέτισης για όλα τα επεισόδια που εξετάστηκαν
- από τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης το πιο σημαντικό είναι η ένταση βροχόπτωσης, όπου όσο αυξάνεται τόσο αυξάνεται και η παροχή αιχμής για κάθε ποσοστό καμένης έκτασης
- όσο αυξάνεται το ποσοστό της καμένης έκτασης τόσο μεγαλώνει η μεταβολή της παροχής αιχμής πριν και μετά την επίδραση πυρκαγιάς. Σύμφωνα με τη μέθοδο επαναπροσδιορισμού των CN και I_a για το 1^ο σενάριο οι τιμές της παροχής αιχμής μεταβάλλονται κατά 5% ενώ για το 2^ο, 3^ο σενάριο και την πραγματική πυρκαγιά του 2009 η μεταβολή ανέρχεται σε 32%, 100% και 44% αντίστοιχα. Ενώ σύμφωνα με τη μέθοδο επαναπροσδιορισμού των CN, I_a και t_p 6%, 37%, 122% και 55% αντίστοιχα
- όσο αυξάνεται το ποσοστό καμένης έκτασης τόσο αυξάνεται και το εύρος της μεταβολής. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη μέθοδο επαναπροσδιορισμού των CN και I_a , το εύρος για το 1^ο σενάριο ανέρχεται στο 0,8%, στο 2^ο 8,6% ενώ αυξάνεται στο 23,5% και στο 17,5% για το 3^ο και την πραγματική πυρκαγιά του 2009. Ενώ σύμφωνα με τη μέθοδο επαναπροσδιορισμού των CN, I_a και t_p το εύρος της μεταβολής ανέρχεται σε 1,5%, 11%, 32%, 23,7% για την κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά αντίστοιχα

από σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων υδρογραφημάτων μετά την πυρκαγιά του 2009



- τα αποτελέσματα μαρτυρούν την αναγκαιότητα επαναπροσδιορισμού των παραμέτρων του μοντέλου για τις συνθήκες που επικρατούν μετά την επίδραση της πυρκαγιάς, αφού η προσομοίωση με συνθήκες που επικρατούν πριν την πυρκαγιά, για το ίδιο επεισόδιο βροχόπτωσης,

υποτιμούν κατά μεγάλο βαθμό την υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης

- σε γενικές γραμμές, και οι δύο προσεγγίσεις υπερτιμούν τον όγκο απορροής αλλά ταυτόχρονα προσεγγίζουν καλύτερα την παροχή αιχμής, με την προσέγγιση – εκτιμημένη (-40%) – κατά την οποία επαναπροσδιορίζονται και οι τρεις παράμετροι (CN, I_a , t_p) να δίνει καλύτερα αποτελέσματα σχεδόν σε όλες τις θέσεις παρατήρησης
- στην πιο σημαντική θέση ως προς την πλημμυρική επικινδυνότητα, τη θέση fladar (πριν τον οικισμό της ραφήνας) από τη σύγκριση των υδρογραφημάτων για συγκεκριμένο επεισόδιο διαπιστώνεται η ικανοποιητική προσέγγιση του παρατηρημένου υδρογραφήματος με τη μέθοδο επαναπροσδιορισμού των δύο παραμέτρων (CN, I_a) τόσο σε επίπεδο παροχής αιχμής όσο και σε όγκο απορροής

Από τα παραπάνω συμπεράσματα διαφαίνεται η ύπαρξη δραματικής μεταβολής της υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης μετά την επίδραση πυρκαγιάς αλλά συγχρόνως αποδεικνύεται η αποτελεσματικότητα και ορθότητα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία στην πρόβλεψη της μεταβολής αυτής.

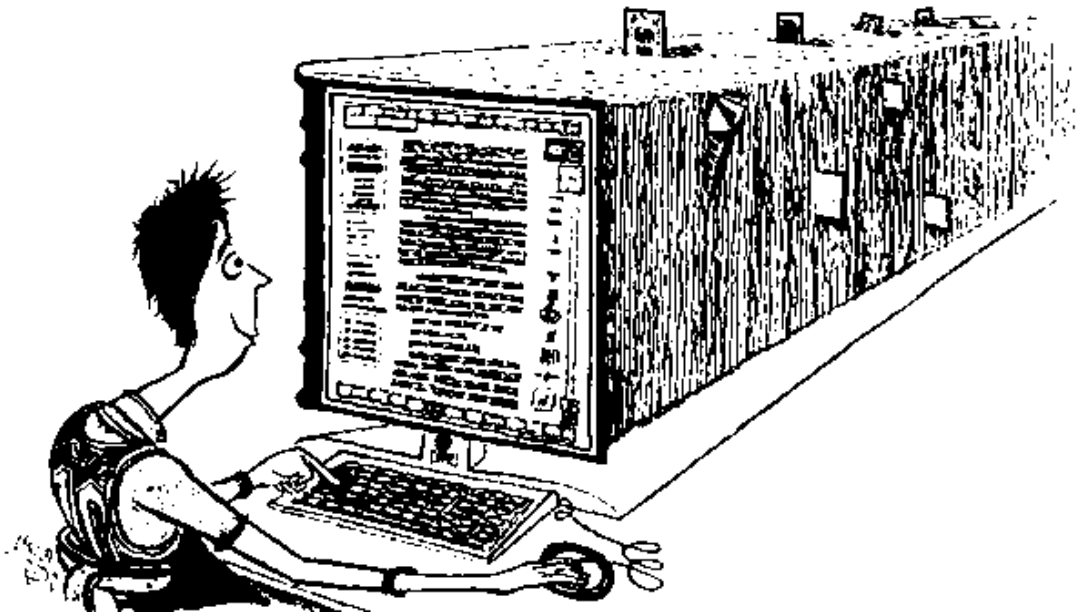
Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:

-  την ανάπτυξη της συγκεκριμένης μεθοδολογίας σε παρόμοιες λεκάνες απορροής, για τη διερεύνηση αντίστοιχων αποτελεσμάτων, επιβεβαιώνοντας με τον τρόπο αυτό την ισχύ της
-  την ανάπτυξη της συγκεκριμένης μεθοδολογίας σε σημαντικά επεισόδια βροχής-απορροής, τα οποία θα σημειώθουν μελλοντικά στην περιοχή μελέτης, και την σύγκριση των εκτιμημένων υδρογραφημάτων που θα παραχθούν με τα παρατηρημένα, με σκοπό να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για το πως μεταβάλλονται οι υδρολογικοί παράγοντες σε σχέση με το χρονικό διάστημα που έχει επέλθει από την πυρκαγιά του 2009, αλλά και το πότε θα επανέλθει η υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης στα επίπεδα πριν την εμφάνιση της πυρκαγιάς

- την εισαγωγή των αποτελεσμάτων του υδρολογικού μοντέλου σε υδραυλικό μοντέλο (π.χ HEC-RAS) με στόχο τη χαρτογράφηση του πεδίου πλημμυρικών κατακλύσεων (βάσει της οδηγίας 2007/60/EK) και την εκπόνηση χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας, μετά την εμφάνιση φαινομένων πυρκαγιάς στις λεκάνες απορροής

Κεφάλαιο 9

Βιβλιογραφία



9. Βιβλιογραφία

Ξένη Βιβλιογραφία

1. Albin, F.A., 1979. Spotfire distance from burning trees - a predictive model. USDA Forest Service, General Technical Report INT-56
2. Anderson, H.W., Trobitz, H.K., 1949. Influence of some watershed variables on a major flood. *Journal of Forestry* 47(5): 347–356
3. Anderson, H.W., Hoover, M.D., and Reinhart, K.G., 1976. Forests and water: effects of forest management on floods, sedimentation and water supply. USDA For. Serv. Rep., Gen. Tech. Rep., PSW- 18, Berkeley, CA.
4. Andrew, P.L., 1986. BEHAVE. Fire behavior prediction and fuel modeling system. Burn subsystem, USDA Forest Service. Ogden, UT.
5. Andrews, P.L., Bevins, C.D. and Seli, R.C., 2005. BehavePlus Fire Modeling System version 3.0. User's Guide. USDA. Forest Research Rocky Mountain, General Technical Report, RMRS-GTR-106WWW-Revised.
6. BAER, 2000. Burned Area Emergency Rehabilitation Plan for Cerro Grande Fire. US Forest Service: see <http://www.baerteam.org/cerrogrande/> or <http://www.fs.fed.us/r3/sfe/fire/cerrogrande/>; accessed June 19, 2001.
7. Baltas, E.A., Dervos, N.A. and Mimikou, M.A., 2007. Technical note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(6): 1825-1829.
8. Benavides-Solorio, J., MacDonald, L.H., 2001. Post-fire runoff and erosion from simulated rainfall on small plot. Colorado Front Range. *Hydrol Process*, 15: 2931–52.
9. Beven, K.J., 2000. Rainfall-runoff modeling - The primer. John Wiley and Sons, LTD, Chichester.
10. Blackburn, W.H., Thurow, T.L., Taylor, C.A., 1986. Soil erosion on rangeland. In Texas Agricultural Experiment Station, TA-2119. Texas Agricultural Experiment Station: College Station, 31–39.
11. Booker, F.A., Dietrich, W.E., 1998. Landscape and management response to wildfires in California. California Department of Forestry and Fire Protection, Burned Watershed Erosion Study, CDF No. 8CA38629.

12. Bosch, J.M., Schulze, R.E., Kruger, F.J., 1984. The effect of fire on water yield. In *Ecological Effects of Fire in South African Ecosystems*, Booysen P, de V, Tainton NM (eds.). Springer-Verlag: Berlin, Chap. 15, 328–348.
13. Brock, J.H., DeBano, L.F., 1990. Wettability of an Arizona chaparral soil influenced by prescribed burning. United States Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report, RM-191, 206–209.
14. Brown, J.A.H., 1972. Hydrologic effects of a bushfire in a catchment in southeastern new South Wales. *J Hydrol*: 15:77–96.
15. Campbell, R.E, Baker, Jr M.B, Folliott, P.F., Larson, F.R., Avery, C.C., 1977. Wildfire effects on a ponderosa pine ecosystem: an Arizona case study. US Department of Agriculture, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. Forest Service Research Paper RM -191: 12.
16. Canfield, H.E., Goodrich, D.C. and Burns, I.S., 2005. Application of Models to Predict Post-fire Runoff and Sediment Transport at the Watershed Scale in Southwestern Forests. Amer. Society of Civil Eng. Watershed Management Conference, Williamsburg, VA, July 19-22, 2005 CD Proceedings, p, 1-12.
17. Cerda, A., 1998. Changes in overland flow and infiltration after a rangeland fire in Mediterranean scrubland. *Hydrological Processes* 12: 1031–1042.
18. Cerda, A., Lasanta, T., 2005. Long-term erosional responses after fire in the Central Spanish Pyrenees 1. *Water Sediment Yield Catena* 2005, 60: 59–80.
19. Chandler, D., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L. and Williams, D., 1983. *Fire in Forestry, Volume I, Forest Fire Behavior and effects*. John Wiley & Sons, Inc. USA.
20. Coelho, A.C., Shakesby, R.A., Walsh, R.D.P., Terry, J.P. and Ferreira, A.D., 1990. Responses of surface and sub-surface soil water movement and soil erosion to forest fires in *Eucalyptus globulus* and *Pinus pinaster* forest, Agueda Basin, Portugal. In: V. Domingos Xavier (Editor), *Proceedings of the International Conference on Forest Fire Research, Coimbra*, p.C.08-1.
21. Cydzik, K. and Hogue, T.S, 2009. Modeling Postfire Response and Recovery Using the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 45(3):702-714. doi: 10.1111/j.1752-1688.2009.00317.x

22. DeBano, L.F., Mann, L.D., Hamilton, D.A., 1970. Translocation of hydrophobic substances into soil by burning organic litter. *Soil Science Society of American Proceedings*, 34: 130–133.
23. DeBano, L.F., 1971. The effect of hydrophobic substances on water movement in soil during infiltration. *Soil Sci. Soc. Am., Proc.*, 35(2): 340–343.
24. DeBano, L.F., Savage, S.M., Hamilton, D.A., 1976. The transfer of heat and hydrophobic substances during burning. *Soil Science Society of America Proceedings* 40: 779–782.
25. DeBano, L.F., Dunn, P.H., Conrad, C.E., 1977. Fire's effect on physical and chemical properties of chaparral soils. *USDA Forest Service General Technical Report WO-3*: 65–74.
26. DeBano, L.F., 1981. Water-repellent soils: a state of the art. *General Technical Report, PSW-46*. United States Department of Agriculture, Forest Service. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley, CA.
27. DeBano, L.F., 1991. The effects of fire on soil properties. *United States Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report, INT-280*, 151–156.
28. DeBano, L.F., 2000a. Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of Hydrology*, 231–232: 4–32, doi: 10.1016/S0022-1694(00)00180-3.
29. DeBano, L.F., 2000b. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of Hydrology* 231–232: 195–206, DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00194-3.
30. Dieckmann, H., Motzer, H., Harres, H.P., Seuffert, O., 1992. Vegetation and erosion. Investigations on erosion plots in Southern Sardinia. *Geoko-plus* 3: 139–149.
31. Dimitrakopoulos, A.P., 2001. Statistical classification of species flammability. *International Journal of Wildland Fire*, 10: 113–118
32. Doehring, D.O., 1968. The effect of fire on geomorphic processes in the San Gabriel Mountains, California. *Contributions to Geology* 7(1): 43–65.
33. Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Walsh, R.P.D., 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics, and hydro-geomorphological significance. *Earth Science Reviews*, 51: 33–65.
34. Dunn, P.H. and DeBano, L.F., 1977. Fire's effect on biological and chemical properties of chaparral soils. In: H.A. Mooney and C.E. Conrad (Technical

- Co-ordinators), Proceedings of the Symposium on the Environmental Consequence of Fire and Fuel Management Ecosystems. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report WO-3, pp. 75-84.
35. Dyrness, C.T., 1976. Effect of wildfire on soil wettability in the High Cascade of Oregon. United States Department of Agriculture, Forest Service, Research Paper PNW-202, Pacific Northwest Forest and Range Experimental Station, Portland, Oregon, 444–447.
 36. Elliott, J.G., Smith, M.J., Friedel, M.R., Stevens, C.R., Bossong, D.W., Litke, R.S., Parker, C., Costello, M.E., Wagner, J., Char, S.J., Bauer, M.A. and Wilds, S.R., 2004. Analysis and Mapping of Post-Fire Hydrologic Hazards for the 2002 Hayman, Coal Seam, and Missionary Ridge Wildfires, Colorado. Scientific Investigations Report 2004–5300.
 37. Finney, M.A., 1998. FARSITE: fire area simulator-model development and evaluation. Research Paper NRMRS-RP-4. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 47 p.
 38. Finney, M.A. and Andrews P.L., 1999. FARSITE- A Program For Fire Growth Simulation. Fire Management Notes, Vol 59 (2) pp.13-15.
 39. Garren, K.H., 1943. Effects of fire on vegetation of the southeastern United States. Bot. Rev, 9: 617-654.
 40. Giovannini, G., Lucchesi S., 1983. Effect of fire on hydrophobic and cementing substances of soil aggregates. Soil Science 136(4): 231–236.
 41. Giovannini, G., Lucchesi, S., Giachetti, M., 1988. Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility. Soil Science 146(4): 255–261.
 42. Giovannini, G. and Lucchesi, S., 1991. Is the vegetation cover the primary factor controlling erosion in burned soils? In: M. Sala and J.L. Rubio (Editors), Proceedings of the E.S.S.C. Conference on Soil Erosion and Degradation as a Consequence of Forest Fires, Barcelona and Valencia, p. 16.
 43. Giovannini, G., Lucchesi, S., 1997. Modifications induced in the soil physio-chemical parameters by experimental fires at different intensities. Soil Science 162: 479–486.
 44. Gonzales-Pelayo, O., Andreu, V., Campo, J., Gimeno-Garcia, E. and Rubino, J.L., 2006. Hydrological Properties of a Mediterranean Soil Burned With Different Fire Intensities. Catena 68: 186-193.

45. 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. Amer. Society of Civil Eng. Watershed Management Conference, Williamsburg, VA, July 19-22, 2005 CD Proceedings, p, 1-12.
46. Harper, R.J., McKissock, I., Gilkes, R.J., Carter, D.J., Blackwell, P.S., 2000. A multivariate framework for interpreting the effects of soil properties, soil management and landuse on water repellency. *Journal of Hydrology* 231–232: 371–383, doi: 10.1016/S0022-1694(00)00209-2.
47. Hawkins, R.H., 1993. Asymptotic Determination of Curve Numbers from Rainfall – Runoff Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering - ASCE*, 119(2): 334-345.
48. Helvey, J.D., 1980. Effects of a north central Washington wildfire on runoff and sediment production. *Water Resources Bulletin*, 16(4): 627–634.
49. Hernando, C., Guijaro, M. and De Los Sandos, A., 1995. Determination de la relation superficie/volumen de las aciculas muertas. *Investigacion Agraria Sistemas y Recursos Forestales* 4(1): 73-85.
50. Hudson, J., Kellman, M., Sanmugadas, K., Alvarado, C., 1983. Prescribed burning *Pinus occarpa* in Honduras. *Forest Ecol Manage*, 5: 269–81.
51. Imeson, A.C., Verstraten, J.M., Van Mulligen, E.J., Sevink, J., 1992. The effects of fire and water repellency on infiltration and runoff under Mediterranean type forest. *Catena* 19: 345–361.
52. Inbar, M., Tamir, M., Wittenberg, L., 1998. Runoff and erosion process after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area. *Geomorphology*, 24: 17–33.
53. 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.
54. Keane, R.E., Burgan, R. and Wagtendonk, J., 2001. Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: Integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling. *International Journal of Remote Sensing*, 10: 301–319.

55. Kettredge, J., 1983. Comparative infiltration in the forest and open. *Journal of Forestry*, 36: 1156-1157.
56. Kirby, M.J., Morgan, R.P.C., 1980. *Soil Erosion*. John Wiley and sons. New York.
57. Knebl, M.R., Yang, Z.L., Hutchison, K. and Maidment, D.R., 2005. Regional Scale Flood Modeling Using NEXRAD Rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: A Case Study for the San Antonio River Basin Summer 2002 Storm Event. *Journal of Environmental Management*, 75(4): 325-336.
58. Kutiel, P. and Inbar, M., 1993. Fire impact on soil nutrients and soil erosion in a Mediterranean pine forest plantation. *Catena*, 20: 129-139.
59. Lavabre, J., Sempere, D., Cernesson, F., 1993. Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after a wildfire. *J Hydrol*, 142: 273-99.
60. Lindley, A.J., Bosch, J.M., Van Wyk, D.B., 1988. Changes in water yield after fire in fynbos catchments. *Water South Africa*, 14(1): 7-12.
61. López, R. and Batalla, R.J., 2001. Análisis del comportamiento hidrológico de la cuenca mediterránea de Arbúcies antes y después de un incendio forestal. *Congreso Forestal Español III*, Granada.
62. Markar, M.S., Clark, S.Q., Yaowu, M. and Jing, Z., 2004. Evaluation of Hydrologic and Hydraulic Models for Real-Time Flood Forecasting Use in the Yangtze River Catchment. 8th National Conference on Hydraulics in Water Engineering. The Institution of Engineers, Gold Coast, Australia, July 13-16
63. Martin, D.A., Moody, J.A., 2001. Comparison of soil infiltration rates in burned and unburned mountainous watersheds. *Hydrological Processes* 15: 2893-2903.
64. McCaughey, W.W., Farnes, P.E., Hansen, K.J., 1997. Historic role of fire in determining the natural variability of annual water yield in mountain watersheds. Banff, Alberta, Canada. US Department of Agriculture, Rocky Mountain Research Station, Bozeman, MT: 21. In 66th Annual Western Snow Conference, May 5-8.
65. McLin, S.G., Springer, E.P. and Lane, L.J., 2001. Predicting Floodplain Boundary Changes Following the Cerro Grande Wildfire. *Hydrological Processes* 15: 2967-2980.

66. McNabb, D.H. and Swanson, F.J., 1990. Effects of fire on soil erosion. In: J.D. Walstad, S.R. Radosevich and D.V. Sandberg (Editors), *Natural and Prescribed Fire in Pacific Northwest Forests*. Oregon State University Press, Corvallis, OR, pp. 159-173.
67. Meeuwig, R.O., 1971. Infiltration and water repellency in granitic soils. In *USDA Forest Service Research Note INT-111*. Intermountain Forest and Range Experiment Station: Ogden, 10.
68. Merwade, V., 2008. *Watershed and Stream Network Delineation*, School of Civil Engineering, Purdue University.
69. Michel, C., Andréassian, V. and Perrin, C., 2005. Soil Conservation Service Curve Number method: How to mend a wrong soil moisture accounting procedure? *Water Resour. Res.*, 41, W02011, doi: 10.1029/2004WR003191.
70. Mishra, S.K. and Singh, V.P., 2004. Long-term hydrological simulation based on the soil conservation service curve number. *Hydrol. Process.*, 18(7): 1291-1313.
71. Mishra, S.K. and Singh, V.P., 2006. A relook at NEH-4 curve number data and antecedent moisture condition criteria. *Hydrol. Process.* 20(13): 2755-2768.
72. 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* doi: 10.1016/j.catena.2007.03.008.
73. Moody, J.A, Martin, D.A., 2001. Post-fire, rainfall intensity–peak discharge relations for three mountainous watersheds in the western USA. *Hydrol. Process.* 15: 2981–2993. doi: 10.1002/hyp.386.
74. Moore, P.D., 1996. Fire damage soils our forests. *Nature*. 384: 312-313.
75. Morris, S.E. and Moses, T.A., 1987. Forest fire and the natural soil erosion regime in the Colorado Front Range. *Annals of the Association of American Geographers*, 77: 245–254.
76. Nasser, I., 1988. Frequency of floods from a burned chaparral watershed. In: *Proceeding of the symposium on fire and watershed management*. General Technical Report PSW-109, USDA (Forest Service). Berkeley, California.
77. 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, doi: 10.1016/S0378-1127(99)00032-8.

78. Neary, V.S., Habib, E. and Fleming, M., 2004. Hydrologic Modeling With NEXRAD Precipitation in Middle Tennessee. *Journal of Hydrologic Engineering* 9(5): 339-349.
79. O'Loughlin, E.M., Cheney, N.P., Burns, J., 1982. The Bushrangers experiment: hydrological response of a eucalypt catchment to fire. First National Symposium on Forest Hydrology. *Inst. Eng. Aust. Natl. Conf. Publ.* 82(6): 132–138.
80. Pierson, F.B., Robichaud, P.R., Spaeth, K.E., 2001. Spatial and temporal effects of wildfire on the hydrology of a steep rangeland watershed. *Hydrological Processes*, 15: 2905–2916.
81. Pierson, F.B., Carlson, D.H., Spaeth, K.E., 2002a. Hydrologic impacts of fire on steep intermountain sagebrush–steppe rangeland. *International Journal of Wildland Fire*, 11: 145–151.
82. 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.
83. Pistocchi, A. and Mazzoli, P., 2002. Use of HEC-RAS and HEC-HMS With ArcView for Hydrologic Risk Management. *Proceedings of the International Environmental Modelling Software Society, iEMSs, Manno, Switzerland.*
84. Ponce, V.M. and Hawkins, R.H., 1996. Runoff curve number: Has it reached maturity? *J. Hydrol. Eng. ASCE*, 1(1): 11-18.
85. Prosser, I.P., Williams L., 1998. The effect of wildfire on runoff and erosion in native Eucalyptus forest. *Hydrological Processes* 12: 251–265, doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(199802)12 : 2<251:AIDHYP574> 3.0.CO; 2-4.
86. Pyne, S.J., Andrews, P.L. and Laven, R.D., 1996. *Introduction to Wildland Fire*, second edition. John Wiley & Sons, Inc. New York.
87. Ralston, C.W. and Hatche, G.E., 1971. Effects of prescribed burning on physical properties of soil. In: *Prescribed burning symposium proceedings*, April 14-16-1971. Charleston, SC. USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville NC.
88. Rauzi, F., Fly, C.L., Dyksterhuis, E.J., 1968. Water intake on mid-continental rangelands as influenced by soil and plant cover. In *USDA Technical Bulletin # 1390*. USDA: Washington DC, 58.

89. Rawls, W.J., Shalaby, A. and McCuen, R.H., 1981. Evaluation of methods for determining urban runoff curve numbers. *Trans. ASAE*, 24: 1562-1566.
90. Robichaud, P.R., Luce, C.H., Brown, R.E., 1993. Variation among different surface conditions in timber harvest sites in the Southern Appalachians. International workshop on soil erosion: Proc. Moscow, Russia. Purdue University, West Lafayette, IN, pp. 231–241
91. Robichaud, P.R., Waldrop, T.A., 1994. A comparison of surface runoff and sediment yields from low- and high-severity site preparation burns. *Water Resour. Bull.* 30, 27–34.
92. Robichaud, P.R., 1996. Spatially-varied erosion potential from harvested hillslopes after prescribed fire in the Interior Northwest. PhD Diss., University of Idaho, Moscow, ID, 219pp.
93. Robichaud, P.R., Hungerford, R.D., 2000. Water repellency by laboratory burning of four northern Rocky Mountain forests soils. *Journal of Hydrology* 231–232: 227–219.
94. Robichaud, P.R., 2000. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in northern Rocky Mountain forests, USA. *Journal of Hydrology*, 231–232, 220–229.
95. Robichaud, P.R., 2000a. Forest fire effects on hillslope erosion: what we know. In *Watershed Management Council Networker*. Watershed Management Council: Davis, 1: 9–13.
96. Robichaud, P.R., 2000b. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests, USA. *Journal of Hydrology*, 231–232: 220–229.
97. Robichaud, P.R., 2005. Measurement of post-fire hillslope erosion to evaluate and model rehabilitation treatment effectiveness and recovery. *International Journal of Wildland Fire*, 14: 475–485.
98. Ronan, N.M., 1986. The hydrological effects of fuel reduction burning and wildfire at wallaby Creek. Melbourne and Metropolitan Board of Works, Report No. MMBW-W-0015: 204.
99. Rothermel, R.C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service, General Technical Report INT-115.
100. Rothermel, R.C., 1991. Predicting behavior and size of crown fires in the northern Rocky Mountains. USDA Forest Service, Paper INT-438.

101. Rulli, M.C., Rosso, R., 2005. Modeling catchment erosion after wildfires in the Saint Gabriel Mountains of southern California. *Geophysical Research Letters* 32, L19401, doi: 10.1029/2005GL023635.
102. Rulli, M.C., Bozzi, S., Spada, M., Bocchiola, D., Rosso, R., 2006. Rainfall simulations on a fire disturbed Mediterranean area. *J Hydrol*, 327(3–4): 323–38.
103. Rulli, M.C., Rosso, R., 2007. Hydrologic response of upland catchments to wildfires. *Advances in Water Resources* 30: 2072–2086.
104. Rycroft, H.B., 1947. A note on the immediate effects of veld burning on stormflow in a Jonkershoek stream catchment. *Journal of the South African Forestry Association* 15: 80–88.
105. Sayeeduzzaman, M., Weirich, F.H., 1996. Runoff and sediment yield in a fire impacted, mountain watershed: fluvial hydrologic modeling in a GIS environment. In *Proceedings AWRA Annual Symposium, GIS and Water Resources, TPS-96-3, September 22–26, 1996, Fort Lauderdale FL, Hallam CA, Lanfear KJ, Salisbury JM, Battaglin WA (eds). American Water Resources Association: Herndon, VA: 447–456.*
106. Scott, D.F., Van Wyk, D.B., 1990. The effects of wildfire on soil wettability and hydrological behaviour of an afforested catchment. *J Hydrol*: 121: 239–56.
107. Scott, D.F, Schulze, R.E., 1992. The hydrological effects of a wildfire in a eucalypt afforested catchment. *South African Forestry Journal* 160: 67–74.
108. Scott, D.F., 1993. The hydrological effects of fire in South African mountain catchments. *Journal of Hydrology* 150: 409–432.
109. Settergren, C.D., 1969. Reanalysis of past research on effects of fire on wildland hydrology. University of Missouri, Columbia, Agricultural Experiment Station, Research Bulletin 954: 16.
110. Sevink, J., Imeson, A.C., Verstraten, J.M., 1989. Humus form development and hillslope runoff, and the effects of fire and management, under Mediterranean forest in N.E. Spain. *Catena* 16: 461–475.
111. Sheridan, G.S., Lane, P.N.J., Murphy, S., 2001. Testing and development of a simple field-based Erosion Hazard Assessment Scheme. In *Soil Research for the 21st Century, Ascough JC II and Flanagan DC (eds).*

- Proceedings of the International Symposium, Honolulu, Hawaii 633–636, 3–5
January
112. Simanton, J.R., Wingate, G.D., Weltz, M.A., 1990. Runoff and sediment yield from a burned sagebrush community. In Effects of Fire Management of Southwestern Natural Resources, Proceedings of the Symposium, November 14–17, 1988, Tucson, AZ, Krammes JS (coord.) General Technical Report. RM-191. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, CO: 180–185.
 113. Soler, M., Sala, M., Gallart, F., 1994. Post fire evolution of runoff and erosion during an eighteen month period. In Soil Erosion and Degradation as a Consequence of Forest Fires, Sala M, Rubio JL (eds). Geofoma Ediciones: Logrono: 149–161.
 114. Soto, B., Basanta, R., Benito, E., Perez, R., Diaz-Fierros, F., 1994. Runoff and erosion from burnt soils in northwest Spain. In Soil Erosion and Degradation as a Consequence of Forest Fires, Sala M, Rubio JL (eds). Geofoma Ediciones: Logrono: 91–98.
 115. 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.
 116. Springer, E. and Hawkins, R.H., 2005. Curve Number Peakflow Response Following the Cerro Grande Fire on a Small Watershed. Amer. Society of Civil Eng. Watershed Management Conference, Williamsburg, VA, CD Proceedings, p 1-12, July 19-22.
 117. Thomas, A.D., Walsh, R.P.D., Shakesby, R.A., 1999. Nutrient losses in eroded sediment after fire in eucalyptus and pine forests in the wet Mediterranean environment of northern Portugal. *Catena*, 36: 283–302.
 118. Tiedemann, A.R., Conrad, C.E., Dieterich, J.H., Hornbeck, J.W., Megahan, W.F., Viereck, L.A. and Wade, D.D., 1979. Effects of fire on water: a state of knowledge review. USDA For. Serv. Rep., Gen. Tech. Rep. WP-10, Washington, D.C.
 119. Trabaud, L., Whelan, R.J., 1996. The ecology of fire Book review. *Acta Oecol*: 16(5).

120. Troendle, C.A., Bevenger, G.S., 1996. Effect of fire on streamflow and sediment transport, Shoshone National Forest, Wyoming. In Proceedings of the Second Biennial Conference on the Greater Yellowstone Ecosystem, The Ecological Implications of Fire in Greater Yellowstone, September 19–21, Yellowstone National Park, Wyoming, Greenlee J (ed.). International Association of Wildland Fire: Fairfield, WA: 43–52.
121. USDA, 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service Technical Release 55.
122. Van Dam, J.C., Hendrickx, J.M.H., Van Ommen, H.C., Bannink, M.H., van Genuchten, M.Th. and Dekker, L.W., 1990. Water and solute movement in a coarse-textured waterrepellent field soil. *J. Hydrol*, 120: 359-379.
123. Vega, J.A., Fernandez, C., Fonturbel, T., 2005. Throughfall runoff and soil erosion after prescribed burning in gorse shrubland in Galicia (NW Spain). *Land Degrad Develop*, 16: 37–51.
124. Wahlenberg, W.G., Greens, S.W. and Reed, H.R., 1939. Effects of fire and grazing on soil properties and the natural reproduction of longleaf pine. *Journal of Forestry*, 33: 331-338.
125. Wallis, M.G., Horne, D.J., 1992. Soil water repellency. In: Stewart, B.A. (ed.), *Advances in Soil Science Vol. 20* Springer, New York, pp. 91–146.
126. Wells, C.G., Campbell, R.E., DeBano, L.F., Lewis, C.E., Predriksen, R.L., Franklin, E.C., Froelich, R.C. and Dunn, P.H., 1979. Effects of fire on soils. General Technical Report WO-7, U.S. Department of, Agriculture Forest Service, 33 pp.
127. Wells, W.G., 1981. Some effects of brushfires on erosion processes in coastal Southern California. In: T.R.H. Davies and A.J. Pearce (eds), *Proc. Syrup. on Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands*. Christchurch, New Zealand, January 1981, IAHS Publication No. 132, Wallingford, pp. 305-342.
128. Wilson, C.J., 1999. Effects of logging and fire on runoff and erosion on highly erodible granitic soils in Tasmania. *Water Resources Research* 35 (11), 3531–3546.

129. Wohlgenuth, P.M., Hubbert, K.R., Robichaud, P.R., 2001. The effects of log erosion barriers on post-fire hydrologic response and sediment yield in small forested watersheds, Southern California. *Hydrological Processes*, 15: 3053–3066, doi: 0Π1002/hyp.391.
130. Wright, H.A., Bailey, A.W., 1982. In *Fire Ecology*. John Wiley and Sons: New York: 501.

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Καρύμπαλης, Ε., Γάκη-Παπαναστασίου, Κ., και Μαρουκιάν Χ., 2005. Συμβολή των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών του υδρογραφικού δικτύου του Μεγάλου Ρέματος Ραφήνας και οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στην εκδήλωση πλημμυρών. *Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τόμος: XXXVIII*.
2. Κουτσογιάννης, Δ., 1986. Υδρολογία και ποσοτικές εκτιμήσεις φερτών υλικών. Σεμινάριο Εγγείων Βελτιώσεων. Αθήνα, σελ. 174-188.
3. Κωνσταντινίδης, Π., Γκατζογιάννης, Σ., 2001. Επιλογή δασικών ειδών για αναδάσωση σε πυρόπληκτες περιοχές με εκτενή εισαγωγή στο πρόβλημα των δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα. ΕΘΙΑΓΕ-ΙΔΕ, Ταχυδρομικό Ταμειυτήριο, 184 σελ, ISBN: 960-86160-9-3.
4. Μαμάσης, Ν., 2007. Σημειώσεις μαθήματος «Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα», τίτλος μαθήματος: «Γεωμορφολογία και απορροή. Εφαρμογές με τη χρήση ΣΓΠ». Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων.
5. Μαρίνος, Π., Βαλαδάκη-Πλέσσα, Κ., Πλέσσας, Σ., 1995. Επεξεργασία και προσαρμογή γεωλογικών δεδομένων για την εκτίμηση της επικινδυνότητας έναντι διαβρώσεων και παραγωγής φερτών υλικών στις υδρολογικές λεκάνες του λεκανοπεδίου, Μαραθώνα και Μεσόγαιας Ν.Αττικής. Ημερίδα: Αντιπλημμυρική προστασία του λεκανοπεδίου της Αθήνας. Αθήνα, Πρακτικά Τ.Ε.Ε.
6. Μποναζούντας και συνεργάτες, 2010. ArcFIRE TechnologyTM: Διαχείριση Δασικής Πυρκαγιάς. Ημερίδα ΕΜΠ: Πυρκαγιές-Έγκαιρη ειδοποίηση, Σχεδιασμός, Αντιμετώπιση, Αθήνα: 15 Ιουνίου.

7. Σούλης, Κ., Δέρκας, Ν. και Βαλιάντζας, Ι.Δ., 2007. Παρουσίαση πειραματικής λεκάνης απορροής στον χείμαρρο Λυκόρρεμα του όρους Πεντέλη. Πρακτικά 5ου Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Λάρισα: 18 – 20 Οκτωβρίου
8. Σούλης, Κ., Λόντρα, Π., Αλωνιστιώτη, Δ., Πολλάλης, Ε. και Βαλιάντζας, Ι. Δ. 2009. Διερεύνηση της επίδρασης των δασικών πυρκαγιών στις πλημμυρικές απορροές. Πρακτικά 6ου Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Θεσσαλονίκη: 8 – 10 Οκτωβρίου.
9. Στάμου, Λ. και Σκοπελίτη, Α., 2009. Παρουσίαση στο μάθημα «Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών στους Υδατικούς Πόρους» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων».
10. Τσακίρης, Γ., 1995. Υδατικοί Ποροί: Ι. Τεχνική Υδρολογία. Αθήνα, σελ.300

Διδακτορικές Διατριβές - Μεταπτυχιακές Μελέτες

1. Βασιλάκος, Χ., 2007. Τηλεπισκόπηση, τεχνητή νοημοσύνη και συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών στην εκτίμηση κινδύνου δασικών πυρκαγιών. Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος.
2. Κασσελά, Α., 2011. Υδρολογική προσομοίωση της διευρυμένης πειραματικής λεκάνης της Ανατολικής Αττικής: ρέματα Ραφήνας και Λυκορέματος, με χρήση του μοντέλου HEC-HMS. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
3. Μακρής, Α. και Μαντούδη, Κ., 1997. Πυρκαγιές και εδαφική διάβρωση, Η περίπτωση της Πεντέλης. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων.
4. Παπαθεοδοσίου, Μ. και Χριστοδούλου, Δ., 2009. Επιπτώσεις των πυρκαγιών στην υδρολογία και τη διάβρωση: Η περίπτωση της Πάρνηθας. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος.
5. Ρούσσου, Ο.Ν., 2009. Χαρτογράφηση και Τρισδιάστατη Οπτικοποίηση Καύσιμης Ύλης για Διαχείριση Πυρκαγιών με Χρήση Δορυφορικών Εικόνων Υψηλής Ανάλυσης και Εργαλείων Γεωπληροφορικής. Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Γεωγραφίας.
6. Σούλης, Κ.Ξ., 2009. Διαχείριση υδατικών πόρων: Ανάπτυξη υδρολογικού μοντέλου με τη χρήση γεωγραφικών πληροφοριακών συστημάτων. Γεωπονικό

Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής.

7. Τσαρούχη, Γ-Μ.Ν., 2010. Εκτίμηση Επιπτώσεων Σεναρίων Δασικής Πυρκαγιάς στην Μεταβολή της Πλημμυρικής Επικινδυνότητας της Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Αράχθου. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα: «Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων».

Εγχειρίδια λογισμικών

1. HEC-GeoHMS Users manual 4.2
2. HEC-HMS Quick Start Guide 3.4

Διαδικτυακοί Τόποι

1. <http://www.fri.gr/>
2. <http://www.tovima.gr/default.asp?pid=2&artid=286982&ct=1&dt=06/09/200#ixzz1BzhS3spZ>
3. <http://maps.google.com/>
4. <http://effis.jrc.ec.europa.eu/>
5. <http://www.chi.civil.ntua.gr>
6. www.chi.civil.ntua.gr
7. <http://meteonet.chi.civil.ntua.gr/wk/main/splash>
8. <http://www.minenv.gr/>
9. <http://www.firemodels.org/>
10. www.g-fmis.gr
11. www.ecosystema.ru
12. <http://www.esa.int/esaCP/index.html>
13. <http://www.space.noa.gr/nrealtime/fireproducts.htm>
14. <http://modis.gsfc.nasa.gov/index.php>
15. <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/BAER/>
16. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
17. <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/GISHYDRO/ferdi/research/agree/agree.html>
18. www.cartoonstock.com
19. brooklynramblings.blogspot.com/

10. Παράρτημα

Πίνακας 10-1 Περιγραφή μοντέλων καύσιμης ύλης κατά τον Albini (1976)

Fuel model	Typical fuel complex	Fuel loading				Fuel bed depth	Moisture of extinction dead fuels
		1 hour	10 hours	100 hours	Live		
		-----Tons/acre-----				Feet	Percent
Grass and grass-dominated							
1	Short grass (1 foot)	0.74	0.00	0.00	0.00	1.0	12
2	Timber (grass and understory)	2.00	1.00	.50	.50	1.0	15
3	Tall grass (2.5 feet)	3.01	.00	.00	.00	2.5	25
Chaparral and shrub fields							
4	Chaparral (6 feet)	5.01	4.01	2.00	5.01	6.0	20
5	Brush (2 feet)	1.00	.50	.00	2.00	2.0	20
6	Dormant brush, hardwood slash	1.50	2.50	2.00	.00	2.5	25
7	Southern rough	1.13	1.87	1.50	.37	2.5	40
Timber litter							
8	Closed timber litter	1.50	1.00	2.50	0.00	0.2	30
9	Hardwood litter	2.92	.41	.15	.00	.2	25
10	Timber (litter and understory)	3.01	2.00	5.01	2.00	1.0	25
Slash							
11	Light logging slash	1.50	4.51	5.51	0.00	1.0	15
12	Medium logging slash	4.01	14.03	16.53	.00	2.3	20
13	Heavy logging slash	7.01	23.04	28.05	.00	3.0	25

Πίνακας 10-2 Τα Μ.Κ.Υ. που αναπτύχθηκαν για το σύστημα πρόβλεψης συμπεριφοράς πυρκαγιάς BEHAVE (Andrews, 1986) και η προσαρμογή τους στις συνθήκες της ελληνικής βλάστησης (Καλαμποκίδης, 2004)

M.K.Y.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	
1	Short grasses (30cm)	Ποολίβαδα
2	Timber (grass and understory)	Δασολίβαδα
3	Tall grass (76 cm)	Λιβάδια (υψηλή βλάστηση)
4	Chaparral (18 cm)	Θαμνώνες (αείφυλλα - σκληρόφυλλα)
5	Brush (61cm)	Θαμνολίβαδα (φυλλοβόλα)
6	Dormant brush, hardwood slash	Θαμνότοποι (ξηροφυτικοί)
7	Southern rough	Θαμνότοποι (μερικώς δασοσκεπείς)
8	Closed timber litter	Κλειστά δάση (ξηροτάπητας)
9	Hardwood litter	Φυλλοβόλα δάση (ξηροτάπητας)
10	Timber (litter and understory)	Σύμπικνα δάση (ξηροτάπητας και υπόροφος)
11	Light logging slash	Υπολείμματα υλοτομιών (μικρή ποσότητα)
12	Medium logging slash	Υπολείμματα υλοτομιών (μέτρια ποσότητα)
13	Heavy logging slash	Υπολείμματα υλοτομιών (μεγάλη ποσότητα)

Πίνακας 10-3 Τα πρότυπα Μ.Κ.Υ. που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο διάδοσης πυρκαγιάς του Rothermel

Μ.Κ.Υ.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	
GR1, GR2, GR3, GR4, GR5, GR6, GR7, GR8, GR9	Nearly Pure Grass/Or Forb Type (Grass)	Ποολιβαδα
GS1, GS2, GS3, GS4	Mixture of grass and shrub up to 50 shrub coverage (Grass-Shrub)	Θαμνολίβαδα (τουλάχιστον 50% κάλυψη θάμνων)
SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9	Shrub cover at least 50 shrub coverage (Shrub)	Θαμνότοποι
TU1, TU2, TU3, TU4, TU5	Grass or shrubs mixed with litter from forest canopy (Timber-understory)	Σύμπικνα δάση (ξηροτάπητας και υπόροφος)
TL1, TL2, TL3, TL4, TL5, TL6, TL7, TL8, TL9	Dead and down woody fuel (litter) beneath a forest canopy (Timber-Litter)	Κλειστά δάση (ξηροτάπητας)
SB1, SB2, SB3, SB4	Activity fuels (slash) or debris from wind damage (Slash – Blowdown)	Υπολείμματα υλοτομιών
NB1, NB2, NB3, NB8, NB9	Insufficient wildland fuel (Non-burnable)	Υλικά που δεν επιδέχονται καύση

Πίνακας 10-4 Υπολογισμός σταθμισμένου και τελικού CN μετά την πυρκαγιά – Σενάριο 1^ο

Καμένη έκταση/ Έκταση υπολεκάνης (λ)	CN μετά την πυρκαγιά	Σταθμισμένο CN				Ποσοστό ακαυτής	Τελικό CN
		λ*CN μετά	Σύνολο (λ*CN μετά)	Σύνολο λ	CN καμένων εκτάσεων		
Υπολεκάνη 1							
0,01	90,00	0,48	1,75	0,02	90,73	0,98	61
0,01	91,00	1,27					
Υπολεκάνη 2							
0,00	86,00	0,18	8,15	0,11	77,18	0,89	39
0,04	77,00	3,02					
0,06	77,00	4,96					
Υπολεκάνη 3							
0,01	77,00	0,43	0,43	0,01	77,00	0,99	45
Υπολεκάνη 4							
0,00*	86,00	0,08	2,55	0,03	87,22	0,97	51
0,00	86,00	0,03					
0,00	86,00	0,07					
0,01	77,00	0,44					
0,00	88,00	0,11					
0,02	90,00	1,45					
0,00	91,00	0,10					
0,00	91,00	0,13					
0,00	91,00	0,10					
0,00	91,00	0,02					

0,00	91,00	0,01					
Υπολεκάνη 5							
0,01	91,00	0,71	9,64	0,11	88,58	0,89	81
0,00	91,00	0,05					
0,00	86,00	0,03					
0,01	77,00	0,96					
0,00	88,00	0,02					
0,02	90,00	1,94					
0,01	90,00	1,22					
0,00	90,00	0,24					
0,00	88,00	0,00					
0,05	90,00	4,48					

Πίνακας 10-5 Υπολογισμός σταθμισμένου και τελικού CN μετά την πυρκαγιά – Σενάριο 2^ο

		Σταθμισμένο CN					
Καμένη έκταση/ Έκταση υπολεκάνης (λ)	CN μετά την πυρκαγιά	λ*CN μετά	Σύνολο (λ*CN μετά)	Σύνολο λ	CN καμένων εκτάσεων	Ποσοστό ακαυτής	Τελικό cn
Υπολεκάνη 1							
0,02	90,00	1,89	8,83	0,10	89,62	0,90	63
0,01	90,00	1,27					
0,00	91,00	0,02					
0,02	91,00	2,03					
0,00	88,00	0,21					
0,00	81,00	0,31					
0,00	90,00	0,27					

0,01	88,00	0,69					
0,00	90,00	0,36					
0,00	88,00	0,15					
0,00	90,00	0,01					
0,00	88,00	0,24					
0,01	90,00	0,46					
0,00	90,00	0,18					
0,00	90,00	0,01					
0,00	91,00	0,02					
0,00	89,00	0,00					
0,00	91,00	0,12					
0,00	89,00	0,16					
0,00	91,00	0,44					
Υπολεκάνη 2							
0,00	86,00	0,18					
0,08	77,00	5,90	12,93	0,16	79,06	0,84	42
0,07	77,00	5,09					
0,02	94,00	1,76					
Υπολεκάνη 3							
0,01	77,00	0,68					
0,04	77,00	2,98					
0,01	57,00	0,46					
0,00	57,00	0,12					
0,06	81,00	5,13	17,19	0,21	79,96	0,79	53
0,01	57,00	0,62					
0,06	91,00	5,22					
0,03	77,00	1,97					
Υπολεκάνη 4							

0,01	91,00	0,91	39,73	0,45	88,95	0,55	67
0,00	86,00	0,09					
0,00	86,00	0,11					
0,00	86,00	0,07					
0,02	77,00	1,23					
0,00	86,00	0,00					
0,00	91,00	0,22					
0,01	77,00	0,91					
0,00	57,00	0,01					
0,00	57,00	0,00					
0,01	90,00	1,19					
0,02	90,00	2,18					
0,08	88,00	6,66					
0,00	90,00	0,15					
0,00	85,00	0,02					
0,00	90,00	0,39					
0,01	88,00	0,53					
0,11	90,00	9,68					
0,00	90,00	0,28					
0,00	91,00	0,06					
0,00	89,00	0,01					
0,00	91,00	0,43					
0,00	89,00	0,01					
0,04	90,00	3,31					
0,00	90,00	0,00					
0,02	93,00	1,82					
0,00	89,00	0,18					
0,00	86,00	0,10					

0,00	91,00	0,42				
0,00	86,00	0,15				
0,01	91,00	0,92				
0,00	89,00	0,03				
0,00	91,00	0,05				
0,01	86,00	0,73				
0,00	91,00	0,24				
0,00	90,00	0,04				
0,00	88,00	0,00				
0,01	90,00	1,00				
0,00	90,00	0,01				
0,00	90,00	0,12				
0,00	90,00	0,22				
0,00	88,00	0,01				
0,00	85,00	0,00				
0,00	90,00	0,07				
0,02	90,00	2,24				
0,00	91,00	0,32				
0,00	89,00	0,03				
0,00	91,00	0,38				
0,01	91,00	1,14				
0,00	91,00	0,32				
0,00	91,00	0,14				
0,00	91,00	0,08				
0,00	89,00	0,08				
0,00	91,00	0,02				
0,00	91,00	0,41				
Υπολεκάνη 5						

0,03	91,00	2,31	15,48	0,17	89,95	0,83	82
0,01	91,00	1,01					
0,00	86,00	0,09					
0,01	77,00	1,05					
0,00	88,00	0,10					
0,00	88,00	0,13					
0,00	88,00	0,27					
0,03	93,00	2,72					
0,02	93,00	1,97					
0,00	88,00	0,05					
0,00	88,00	0,28					
0,01	91,00	0,48					
0,00	88,00	0,04					
0,06	90,00	4,98					
0,00	91,00	0,00					
0,00	89,00	0,00					

Πίνακας 10-6 Υπολογισμός σταθμισμένου και τελικού CN μετά την πυρκαγιά – Σενάριο 3^ο

		Σταθμισμένο CN					
Καμένη έκταση/ Έκταση υπολεκάνης (λ)	CN μετά την πυρκαγιά	λ*CN μετά	Σύνολο (λ*CN μετά)	Σύνολο λ	CN καμένων εκτάσεων	Ποσοστό ακαυτής	Τελικό CN
Υπολεκάνη 1							

0,04	90,00	3,69	40,14	0,45	89,01	0,55	73
0,02	90,00	2,05					
0,01	81,00	0,69					
0,00	81,00	0,00					
0,00	91,00	0,02					
0,03	91,00	2,38					
0,00	82,00	0,02					
0,00	91,00	0,01					
0,00	88,00	0,01					
0,00	88,00	0,00					
0,00	91,00	0,01					
0,00	91,00	0,31					
0,00	88,00	0,21					
0,01	85,00	0,63					
0,00	82,00	0,16					
0,00	82,00	0,01					
0,00	82,00	0,02					
0,00	85,00	0,40					
0,03	88,00	2,31					
0,00	81,00	0,06					
0,00	81,00	0,03					
0,00	76,00	0,22					
0,01	81,00	0,62					
0,01	90,00	0,60					
0,00	90,00	0,15					

0,01	88,00	0,69					
0,00	90,00	0,06					
0,00	90,00	0,18					
0,00	93,00	0,00					
0,00	90,00	0,39					
0,01	88,00	0,61					
0,00	85,00	0,00					
0,00	85,00	0,00					
0,00	85,00	0,01					
0,01	88,00	0,44					
0,02	90,00	1,52					
0,01	93,00	0,71					
0,00	88,00	0,18					
0,00	90,00	0,22					
0,00	90,00	0,09					
0,00	90,00	0,01					
0,03	90,00	3,04					
0,03	88,00	2,40					
0,01	90,00	0,57					
0,00	90,00	0,01					
0,00	90,00	0,03					
0,00	90,00	0,04					
0,00	90,00	0,12					
0,01	90,00	0,46					
0,00	90,00	0,03					

0,00	90,00	0,05					
0,00	90,00	0,26					
0,02	88,00	1,56					
0,04	90,00	3,16					
0,00	86,00	0,09					
0,00	90,00	0,04					
0,00	90,00	0,01					
0,01	90,00	0,62					
0,01	88,00	1,22					
0,00	90,00	0,03					
0,00	90,00	0,17					
0,00	90,00	0,02					
0,00	90,00	0,02					
0,00	90,00	0,03					
0,00	90,00	0,38					
0,00	90,00	0,06					
0,00	90,00	0,26					
0,00	90,00	0,05					
0,00	90,00	0,02					
0,00	90,00	0,05					
0,01	88,00	0,47					
0,00	90,00	0,33					
0,00	93,00	0,03					
0,00	92,00	0,27					
0,00	92,00	0,02					

0,00	93,00	0,07					
0,00	93,00	0,25					
0,00	92,00	0,30					
0,00	91,00	0,02					
0,00	89,00	0,00					
0,00	91,00	0,13					
0,00	86,00	0,06					
0,00	94,00	0,08					
0,00	91,00	0,05					
0,00	89,00	0,01					
0,00	85,00	0,21					
0,00	93,00	0,04					
0,00	85,00	0,10					
0,00	90,00	0,37					
0,01	88,00	1,00					
0,00	89,00	0,20					
0,01	91,00	0,53					
0,00	92,00	0,32					
0,00	91,00	0,31					
0,00	94,00	0,20					
0,00	91,00	0,00					
0,00	91,00	0,18					
Υπολεκάνη 2							
0,00	86,00	0,18	16,50	0,20	81,28	0,80	44
0,08	77,00	6,47					

0,07	77,00	5,16					
0,04	94,00	3,74					
0,01	94,00	0,95					
Υπολεκάνη 3							
0,02	77,00	1,33	30,21	0,39	77,83	0,61	58
0,04	77,00	3,29					
0,01	57,00	0,52					
0,01	57,00	0,64					
0,00	81,00	0,10					
0,00	57,00	0,24					
0,12	81,00	9,63					
0,06	57,00	3,15					
0,00	91,00	0,16					
0,10	91,00	9,18					
0,03	77,00	1,97					
Υπολεκάνη 4							
0,01	91,00	1,27	64,86	0,73	88,78	0,27	78
0,00	91,00	0,15					
0,00	86,00	0,09					
0,00	86,00	0,19					
0,00	86,00	0,07					
0,02	77,00	1,41					
0,01	81,00	1,13					
0,00	86,00	0,16					
0,01	91,00	0,70					

0,01	77,00	1,07					
0,00	57,00	0,03					
0,00	72,00	0,02					
0,00	57,00	0,09					
0,01	90,00	0,49					
0,00	90,00	0,06					
0,00	88,00	0,08					
0,00	90,00	0,30					
0,01	90,00	1,33					
0,03	90,00	2,35					
0,16	88,00	14,38					
0,00	90,00	0,15					
0,00	85,00	0,02					
0,01	90,00	0,47					
0,01	88,00	0,65					
0,11	90,00	10,32					
0,00	90,00	0,02					
0,02	90,00	1,84					
0,01	91,00	0,63					
0,00	89,00	0,01					
0,01	91,00	1,28					
0,00	89,00	0,01					
0,08	90,00	6,89					
0,00	90,00	0,00					
0,00	90,00	0,00					

0,03	93,00	2,40				
0,00	89,00	0,18				
0,00	86,00	0,10				
0,00	91,00	0,42				
0,00	86,00	0,15				
0,01	91,00	0,92				
0,00	89,00	0,03				
0,00	91,00	0,05				
0,01	86,00	0,73				
0,00	91,00	0,24				
0,00	90,00	0,00				
0,00	90,00	0,04				
0,00	88,00	0,01				
0,02	90,00	1,72				
0,00	90,00	0,03				
0,00	90,00	0,18				
0,00	90,00	0,37				
0,00	88,00	0,06				
0,00	85,00	0,00				
0,00	90,00	0,07				
0,03	90,00	2,75				
0,00	88,00	0,00				
0,00	90,00	0,01				
0,00	90,00	0,00				
0,00	91,00	0,32				

0,00	89,00	0,03					
0,00	91,00	0,38					
0,01	91,00	1,14					
0,00	91,00	0,32					
0,00	91,00	0,14					
0,00	91,00	0,08					
0,00	89,00	0,08					
0,00	91,00	0,02					
0,01	91,00	0,51					
0,01	91,00	1,30					
0,00	89,00	0,06					
0,00	91,00	0,03					
0,01	90,00	0,84					
0,00	90,00	0,11					
0,01	88,00	0,57					
0,00	91,00	0,43					
0,00	81,00	0,02					
0,00	81,00	0,13					
0,00	81,00	0,06					
0,00	88,00	0,16					
Υπολεκάνη 5							
0,03	91,00	2,72					
0,05	91,00	4,44					
0,00	86,00	0,19					
0,02	77,00	1,31					
			24,84	0,28	89,11	0,72	83

0,00	88,00	0,39					
0,01	88,00	0,99					
0,00	90,00	0,01					
0,01	88,00	0,97					
0,03	90,00	3,10					
0,03	90,00	2,79					
0,00	88,00	0,05					
0,02	88,00	2,12					
0,00	89,00	0,00					
0,01	91,00	0,72					
0,00	88,00	0,04					
0,06	90,00	4,98					
0,00	91,00	0,01					
0,00	89,00	0,00					

Πίνακας 10-7 Υπολογισμός σταθμισμένου και τελικού CN μετά την πυρκαγιά – Πυρκαγιά 2009

		Σταθμισμένο CN					
Καμένη έκταση/ Έκταση υπολεκάνης (λ)	CN μετά την πυρκαγιά	λ*CN μετά	Σύνολο (λ*CN μετά)	Σύνολο λ	CN καμένων εκτάσεων	Ποσοστό ακαυτης	Τελικό cn
Υπολεκάνη 1							
0,00	82,00	0,02	13,37	0,16	85,51	0,84	64

0,00	72,00	0,00				
0,00	91,00	0,11				
0,01	86,00	0,58				
0,00	86,00	0,05				
0,01	77,00	1,15				
0,00	94,00	0,01				
0,00	77,00	0,20				
0,00	94,00	0,01				
0,00	86,00	0,14				
0,00	94,00	0,03				
0,00	86,00	0,04				
0,00	77,00	0,20				
0,02	77,00	1,24				
0,02	94,00	1,46				
0,00	77,00	0,01				
0,00	94,00	0,28				
0,00	77,00	0,06				
0,00	94,00	0,07				
0,00	77,00	0,12				
0,00	57,00	0,02				
0,00	85,00	0,00				
0,00	77,00	0,13				
0,00	90,00	0,10				
0,01	90,00	0,64				
0,00	85,00	0,08				

0,01	81,00	0,84					
0,00	57,00	0,01					
0,00	81,00	0,07					
0,00	72,00	0,00					
0,00	57,00	0,09					
0,00	86,00	0,25					
0,00	77,00	0,01					
0,05	91,00	4,17					
0,01	86,00	0,98					
0,00	77,00	0,20					
0,00	77,00	0,00					
0,00	90,00	0,04					
Υπολεκάνη 2							
0,01	77,00	0,51					
0,01	77,00	0,79					
0,01	94,00	0,72					
0,02	77,00	1,25					
0,00	94,00	0,18					
0,00	86,00	0,00					
0,00	86,00	0,20					
0,00	77,00	0,16					
0,00	86,00	0,08					
0,01	94,00	0,53					
0,00	86,00	0,33					
0,30	77,00	22,80					
			83,03	1,00	83,06	0,00	83

0,14	94,00	12,93					
0,00	94,00	0,13					
0,00	77,00	0,33					
0,01	94,00	1,03					
0,02	77,00	1,69					
0,00	86,00	0,18					
0,11	77,00	8,32					
0,11	77,00	8,83					
0,05	77,00	3,55					
0,10	94,00	9,18					
0,09	94,00	8,31					
0,00	77,00	0,37					
0,01	77,00	0,62					
Υπολεκάνη 3							
0,01	77,00	0,43					
0,02	94,00	2,29					
0,01	94,00	0,60					
0,03	77,00	2,49					
0,05	77,00	3,61					
0,00	77,00	0,22	78,42	1,00	78,44	0,00	78
0,02	94,00	1,68					
0,01	94,00	0,90					
0,00	77,00	0,29					
0,00	94,00	0,18					
0,00	57,00	0,00					

0,00	86,00	0,02					
0,01	57,00	0,54					
0,05	57,00	2,58					
0,00	77,00	0,02					
0,00	90,00	0,00					
0,00	90,00	0,03					
0,15	81,00	12,04					
0,02	57,00	1,33					
0,32	81,00	25,99					
0,11	57,00	6,29					
0,01	91,00	1,33					
0,01	91,00	1,11					
0,14	91,00	12,47					
0,03	77,00	1,97					
Υπολεκάνη 4							
0,01	91,00	0,95					
0,02	91,00	1,66					
0,00	86,00	0,09					
0,00	86,00	0,19					
0,00	86,00	0,07					
0,02	77,00	1,51					
0,02	81,00	1,31					
0,00	86,00	0,16					
0,00	91,00	0,02					
0,01	91,00	1,29					
			13,97	0,16	86,66	0,84	56

0,01	77,00	1,07					
0,00	57,00	0,00					
0,00	72,00	0,00					
0,00	81,00	0,02					
0,00	81,00	0,10					
0,00	57,00	0,00					
0,00	90,00	0,02					
0,00	88,00	0,09					
0,00	90,00	0,35					
0,00	88,00	0,10					
0,00	90,00	0,11					
0,01	91,00	0,90					
0,01	91,00	0,63					
0,00	89,00	0,01					
0,01	91,00	1,34					
0,00	89,00	0,01					
0,01	90,00	0,78					
0,00	90,00	0,00					
0,00	88,00	0,01					
0,00	91,00	0,28					
0,01	91,00	0,78					
0,00	89,00	0,06					
0,00	91,00	0,03					
0,00	90,00	0,04					
0,00	90,00	0,02					

Υπολεκάνη 5							
0,01	91,00	0,63	24,47	0,31	78,77	0,69	80
0,00	86,00	0,22					
0,05	77,00	3,56					
0,00	86,00	0,28					
0,00	86,00	0,19					
0,00	86,00	0,40					
0,00	94,00	0,30					
0,19	77,00	14,49					
0,03	76,00	2,26					
0,00	57,00	0,01					
0,00	81,00	0,00					
0,00	57,00	0,01					
0,00	90,00	0,20					
0,00	88,00	0,06					
0,00	76,00	0,00					
0,02	91,00	1,83					
0,00	89,00	0,02					

* Οι τιμές δεν είναι μηδενικές, είναι πολύ μικρές και λόγω στρογγυλοποίησης παρουσιάζονται ως μηδενικές.

Πίνακας 10-8 Παροχές αιχμής και ποσοστιαία μεταβολή παροχής αιχμής για κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά (CN, I_α)

Επεισόδιο Βροχόπτωσης	Θέση παρατηρημένου	Παροχή αιχμής πριν την πυρκαγιά(m3/sec)	Παροχή αιχμής (m ³ /sec) μετά την πυρκαγιά							
			Σενάριο 1 ^ο	Ποσοστιαία μεταβολή (%)	Σενάριο 2 ^ο	Ποσοστιαία μεταβολή (%)	Σενάριο 3 ^ο	Ποσοστιαία μεταβολή (%)	Πυρκαγιά 2009	Ποσοστιαία μεταβολή (%)
8/2/2009	Ραφήνα	17,3	18,1	4,6	23,2	34,1	35,5	105,2	24,5	41,6
12/12/2008	Ραφήνα	23,7	24,9	5,1	30,9	30,4	46	94,1	32,6	37,6
17/11/2008	Ραφήνα	35,5	37,1	4,5	45,2	27,3	66,4	87,0	51,3	44,5
11/12/2009	Ραφήνα	21,2	22,2	4,7	27,9	31,6	41,8	97,2	31,3	47,6
6/12/2009	Ραφήνα	6,2	6,5	4,8	8,2	32,3	12,8	106,5	9,6	54,8
17/10/2010	Ραφήνα	20,9	22	5,3	28,4	35,9	44	110,5	28,7	37,3

Πίνακας 10-9 Εύρος μεταβολής για κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά (CN, I_α)

Σενάριο 1 ^ο	Εύρος μεταβολής (%)	Σενάριο 2 ^ο	Εύρος μεταβολής (%)	Σενάριο 3 ^ο	Εύρος μεταβολής (%)	Πυρκαγιά 2009	Εύρος μεταβολής (%)
5,3	0,8	35,9	8,6	110,5	23,5	54,8	17,5
4,5		27,3		87		37,3	

Πίνακας 10-10 Παροχές αιχμής και ποσοστιαία μεταβολή παροχής αιχμής για κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά (CN, I_a,tr)

Επεισόδιο Βροχόπτωσης	Θέση παρατηρημένου	Παροχή αιχμής πριν την πυρκαγιά (m ³ /sec)	Παροχή αιχμής (m ³ /sec) μετά την πυρκαγιά							
			Σενάριο 1 ^ο	Ποσοστιαία μεταβολή (%)	Σενάριο 2 ^ο	Ποσοστιαία μεταβολή (%)	Σενάριο 3 ^ο	Ποσοστιαία μεταβολή (%)	Πυρκαγιά 2009	Ποσοστιαία μεταβολή (%)
8/2/2009	Ραφήνα	17,3	18,3	5,8	24,2	39,9	38,7	123,7	26	50,3
12/12/2008	Ραφήνα	23,7	25,1	5,9	32,1	35,4	52,1	119,8	34,9	47,3
17/11/2008	Ραφήνα	35,5	37,5	5,6	46,9	32,1	72,4	103,9	55	54,9
11/12/2009	Ραφήνα	21,2	22,3	5,2	29	36,8	45,5	114,6	33,4	57,5
6/12/2009	Ραφήνα	6,2	6,6	6,5	8,5	37,1	14,4	132,3	10,6	71,0
17/10/2010	Ραφήνα	20,9	22,3	6,7	29,9	43,1	49,3	135,9	30,9	47,8

Πίνακας 10-11 Εύρος μεταβολής για κάθε υπό μελέτη πυρκαγιά (CN, I_a,tr)

Σενάριο 1 ^ο	Εύρος μεταβολής (%)	Σενάριο 2 ^ο	Εύρος μεταβολής (%)	Σενάριο 3 ^ο	Εύρος μεταβολής (%)	Πυρκαγιά 2009	Εύρος μεταβολής (%)
6,7	1,5	43,1	11	135,9	32	71	23,7
5,2		32,1		103,9		47,3	