

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/336242707>

Πυρκαγιές κόμης σε Μεσογειακά πευκοδάση στην Ελλάδα: Σύγκριση της παρατηρηθείσας συμπεριφοράς με τις προβλέψεις του CFIS και μια εμπειρική προσέγγιση της πρόβλεψης της συμπεριφοράς...

Conference Paper · October 2019

CITATIONS

0

READS

466

1 author:



Miltiadis Athanasiou

Hellenic Agricultural Organization - Demeter

40 PUBLICATIONS 29 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Η φωτιά δεν παίζει, μην παίζεις με το μέλλον του τόπου σου [View project](#)



Επιστημονική έρευνα με Κ.Α. 70/3./6479 - EUFIRELAB [View project](#)



19^ο Πανελλήνιο Δασολογικό Συνέδριο

29 ΣΕΠ
2 ΟΚΤ
2019

ΛΙΠΟΧΩΡΟ
ΠΙΕΡΙΑΣ

« Η συμβολή των
δασικών οικοσυστημάτων
στην ορεινή οικονομία και
στην προστασία του
φυσικού περιβάλλοντος »





ΠΡΑΚΤΙΚΑ

19ου Πανελληνίου Δασολογικού Συνεδρίου

**"Η συμβολή των δασικών οικοσυστημάτων στην ορεινή οικονομία
και στην προστασία του φυσικού περιβάλλοντος"**

**Επιμέλεια Έκδοσης: Νικόλαος Γρηγοριάδης, Θεοχάρης Ζάγκας,
Ιωάννης Σπανός, Διονύσιος Γαϊτάνης, Ιωάννης Τζατζάνης,
Στέφανος Τσιάρας**

Λιτόχωρο Πιερίας, 29 Σεπτεμβρίου-2 Οκτωβρίου 2019

ΔΙΟΡΓΑΝΩΤΗΣ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΑΣΟΛΟΓΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ

ΑΠΓΔΑ

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΣΥΝΔΙΟΡΓΑΝΩΤΕΣ

ΦΟΡΕΑΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΘΝΙΚΟΥ ΔΡΥΜΟΥ ΟΛΥΜΠΟΥ

ΔΗΜΟΣ ΔΙΟΥ-ΟΛΥΜΠΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΔΑΣΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ (ΑΠΘ)

ΕΛΓΟ-ΔΗΜΗΤΡΑ (ΙΔΕ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΙΜΔΟ ΑΘΗΝΩΝ)

ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ-ΘΡΑΚΗΣ

(ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΔΑΣΩΝ ΠΙΕΡΙΑΣ)

ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ (Π.Ε. ΠΙΕΡΙΑΣ)

ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ (ΓΕΩΤΕΕ)

ΧΟΡΗΓΟΣ

ΕΝΩΣΗ ΕΛΛΗΝΩΝ ΔΑΣΟΚΤΗΜΟΝΩΝ

ISBN: 978-618-84551-0-8

Θεματική Ενότητα: Προστασία Δασών

**ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΚΟΜΗΣ ΣΕ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΑ ΠΕΥΚΟΔΑΣΗ ΣΤΗΝ
ΕΛΛΑΔΑ: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΘΕΙΣΑΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΜΕ ΤΙΣ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΤΟΥ CFIS ΚΑΙ ΜΙΑ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ
ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥΣ**

Αθανασίου, Μιλτιάδης¹

¹Wildfire Management Consulting and Training, Θωμά Παλαιολόγου 8, Αχαρνές, 13673, Αθήνα, info@m-athanasiou.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία αξιοποιήθηκαν 56 μετρήσεις πραγματικής συμπεριφοράς πυρκαγιών κόμης σε Μεσογειακά πευκοδάση στην Ελλάδα, για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των προβλέψεων του συστήματος CFIS (Crown Fire Initiation and Spread) σχετικά με α) την πιθανότητα μετάδοσης της φωτιάς από την επιφανειακή βλάστηση στην κόμη β) την κατηγορία της πυρκαγιάς κόμης (παθητική ή ενεργή) και γ) το ρυθμό εξάπλωσής της (ROS). Επίσης, δημιουργήθηκε εμπειρική σχέση η οποία, για δεδομένη τιμή πυκνότητας της βιομάζας του ανορόφου που είναι διαθέσιμη προς καύση (Canopy Bulk Density: CBD), υπολογίζει την τιμή του ROS της πυρκαγιάς, πάνω από την οποία η παθητική πυρκαγιά κόμης μετατρέπεται σε ενεργή πυρκαγιά κόμης. Επιπλέον, συζητήθηκαν περιορισμοί που ανακύπτουν κατά τις προσπάθειες πρόβλεψης του ROS των καθοδηγούμενων από τον άνεμο, ενεργών πυρκαγιών κόμης σε δάση Χαλεπίου πεύκης με υπόροφο υψηλών μακί.

Λέξεις κλειδιά: Πρόβλεψη συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών, Πυρκαγιές κόμης, Χαλέπιος πεύκη, Τραχεία πεύκη, CFIS

Εισαγωγή

Όταν, κατά την εξάπλωση μιας δασικής πυρκαγιάς, η φωτιά μεταδοθεί από την επιφανειακή βλάστηση (τον υπόροφο) στις κόμης των δένδρων (τον ανώροφο) δηλαδή στα δασικά καύσιμα που βρίσκονται σε ύψος μεγαλύτερο των τριών μέτρων και συχνά καλούνται και εναέρια καύσιμα, η πυρκαγιά μετατρέπεται από πυρκαγιά επιφανείας σε πυρκαγιά κόμης. Από τεχνική άποψη, μπορεί να θεωρηθεί ότι πυρκαγιές που εξαπλώνονται σε πολύ υψηλούς θαμνώνες, με ύψος μεγαλύτερο των τριών μέτρων καίγοντας το σύνολο της βλάστησης, είναι πυρκαγιές κόμης (Albini 1984). Οι συνθήκες υπό τις οποίες η φωτιά μεταφέρεται στην κόμη και η πηγή κινδύνου που συνιστούν οι πυρκαγιές κόμης, έχουν μελετηθεί από πολλούς ερευνητές (Xanthopoulos 1990, Rothermel 1991a,b, Albini et al. 1995, Alexander 1998, Van Wagner 1998, Scott and Reinhardt 2001, Cruz et al. 2002). Οι πυρκαγιές κόμης ξεκινούν λόγω της θερμότητας των πυρκαγιών επιφανείας η οποία μεταφέρεται με επαγωγή και ακτινοβολία, με κυρίαρχο μηχανισμό αυτόν της επαγωγής (Xanthopoulos 1990, Perminov 2007). Σε κάποιες περιπτώσεις, οι φλόγες της πυρκαγιάς επιφανείας δεν χρειάζεται απαραίτητα να ακουμπούν ή να εκτείνονται μέσα στην κόμη των δέντρων για να προκαλέσουν την ανάφλεξη της (Alexander 1988, Alexander and Cruz 2012, Alexander et al. 2013) ενώ σε άλλες περιπτώσεις η φωτιά δεν μεταφέρεται στην κόμη παρ' όλο που οι φλόγες ακουμπούν τη βάση της. Η χαμηλή περιεχόμενη υγρασία (MC: Moisture Content), η υψηλή περιεχόμενη θερμική ενέργεια στο φύλλωμα, η παρουσία εύφλεκτων αιθέριων ελαίων και ρητινών στις βελόνες, είναι παράγοντες που συμβάλλουν στην αύξηση της πιθανότητας εκδήλωσης της πυρκαγιάς κόμης, αλλά δεν συνιστούν, από μόνες τους, κύριους παράγοντες εμφάνισής της (Alexander and Cruz 2011). Σύμφωνα με τους Butler and Reynolds (1997), οι συνθήκες που οδηγούν στη μετατροπή μιας πυρκαγιάς επιφανείας σε πυρκαγιά κόμης σε δάση κωνοφόρων, είναι: α) τα συνεχή λεπτά καύσιμα σε επαρκή ποσότητα και κατάλληλη κατακόρυφη και οριζόντια διάταξη, β) ένα ξηρό χρονικό διάστημα, ικανό να μειώσει σημαντικά την MC του συνόλου των νεκρών καυσίμων, σε συνδυασμό με υψηλές τιμές θερμοκρασίας και χαμηλές τιμές σχετικής υγρασίας αέρα και γ) ισχυροί άνεμοι ή απότομες πλαγιές.

Ο Van Wagner (1977) αναγνώρισε τρεις κατηγορίες πυρκαγιών κόμης σε κωνοφόρα, τις παθητικές, τις ενεργές και τις ανεξάρτητες πυρκαγιές κόμης, ανάλογα με το “βαθμό εξάρτησής” τους από την πυρκαγιά επιφανείας: α) Παθητική πυρκαγιά κόμης (passive crown fire) είναι η δασική πυρκαγιά κατά την οποία ένα μέρος της κόμης ή όλη η κόμη του δέντρου καίγεται αλλά η συμπεριφορά της πυρκαγιάς εξαρτάται από τη συμπεριφορά της φωτιάς στην επιφανειακή βλάστηση και ο ρυθμός εξάπλωσης (ROS) της πυρκαγιάς καθορίζεται από τον ROS της πυρκαγιάς επιφανείας (Van Wagner 1977). Εκδηλώνεται όταν, μετά την αρχική έναυση της κόμης, η πυρκαγιά δεν μεταδίδεται αρκετά γρήγορα (Alexander and Cruz 2011) δηλαδή όταν η τιμή του ROS είναι μικρότερη της κρίσιμης τιμής κατωφλίου του Van Wagner (1977) η οποία εκφράζεται ως συνάρτηση της πυκνότητας της διαθέσιμης προς καύση βιομάζας του ανορόφου (Canopy Bulk Density: CBD, kg/m^3). Οι παθητικές πυρκαγιές κόμης καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συμπεριφοράς: από μία πυρκαγιά επιφανείας χαμηλής ή μέτριας έντασης με κάποιες από τις κόμης των υφιστάμενων δένδρων να λαμπαδιάζουν πίσω από το μέτωπο (Scott and Reinhardt 2001) έως και μια υψηλής έντασης πυρκαγιά η οποία εξαπλώνεται με σχεδόν συμπαγή φλόγα που εκτείνεται από τον υπόροφο έως και τον ανώροφο, έχοντας σχεδόν προσεγγίσει μια κρίσιμη ελάχιστη τιμή ROS για την μετατροπή της σε ενεργή πυρκαγιά κόμης. Κατά τους Scott and Reinhardt (2001) οι παθητικές πυρκαγιές κόμης παρατηρούνται συχνά σε περιπτώσεις όπου ο υπόροφος κυριαρχείται από ψηλούς θάμνους και ο ανώροφος είναι χαμηλής πυκνότητας. Καθώς αναφλέγονται οι πρώτες κόμης δένδρων δημιουργούνται και οι προϋποθέσεις για τη μετάδοση της πυρκαγιάς με καύτρες σε μεγάλες αποστάσεις. Οι παθητικές πυρκαγιές κόμης μπορούν να εκδηλωθούν κάτω από δύο γενικές καταστάσεις, είτε α) όταν το ύψος της βάσης του ανορόφου (Canopy Base Height: CBH, m) και η CBD θεωρούνται ιδανικά αλλά η υψηλή MC της καύσιμης ύλης και η σχετικά χαμηλή ένταση του ανέμου δεν είναι ικανές να προκαλέσουν πλήρη και έντονη καύση της κόμης, είτε β) όταν το CBH είναι μεγαλύτερο και η CBD είναι μικρότερη από τις αντίστοιχες τιμές κατωφλίου που απαιτούνται (π.χ. τύποι υψηλών ή ανοικτών δασικών συστάδων) έτσι ώστε ακόμη και υπό συνθήκες πολύ ξηρών καυσίμων και ισχυρού ανέμου, να μην υπάρχει το σύνολο των απαραίτητων προϋποθέσεων για τη μετατροπή της πυρκαγιάς σε ενεργή πυρκαγιά κόμης. (Van Wagner 1977, Alexander et al 2013).

β) Η ενεργή πυρκαγιά κόμης (active crown fire), χαρακτηρίζεται από τη σταθερή διάδοση υψηλής και συνεκτικής φλόγας, η οποία εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους έως και πάνω από τον ανώροφο. Οι δύο «φάσεις» της φωτιάς – στον υπόροφο και στον ανώροφο - είναι κατά κάποιον τρόπο συνδεδεμένες και διαδίδονται σαν μια ενότητα (Van Wagner 1977). Ο ROS της ενεργής πυρκαγιάς κόμης καθορίζεται από τη φάση της πυρκαγιάς στην κόμη η οποία εξαρτάται όμως από τη θερμότητα που εκλύεται από την καύση των επιφανειακών δασικών καυσίμων (Scott and Reinhardt 2001). Για να εκδηλωθεί μια ενεργή πυρκαγιά κόμης, απαιτούνται: α) ικανό φορτίο ξηρών επιφανειακών καυσίμων που να επιτρέπει την ανάπτυξη πυρκαγιάς επιφανείας αξιοσημείωτης έντασης, β) μικρό έως μέτριο CBH και γ) αρκετά συνεχής ανώροφος, μέσης έως υψηλής CBD ($>0,1 \text{ kg/m}^3$) με σχετικά χαμηλά ή συνήθη επίπεδα MC στο φύλλωμά του. Ο ROS των ενεργών πυρκαγιών κόμης καθορίζεται από φαινόμενα που δεν είναι πλήρως κατανοητά και συνοδεύουν την ταυτόχρονη καύση των επιφανειακών και εναέριων δασικών καυσίμων καθώς και από την αλληλεπίδραση μεταξύ της κινούμενης προς τα επάνω επαγωγικής στήλης και του πεδίου του ανέμου (Cruz 1999). Ο Van Wagner (1977, 1993) έχει αναπτύξει κριτήρια για την εξάπλωση των ενεργών πυρκαγιών κόμης, τα οποία συνιστούν μια ισχυρά τεκμηριωμένη προσέγγιση (Alexander et al. 2013), όμως οι προσπάθειες πρόβλεψης της συμπεριφοράς τους συνεχίζουν να συναντούν μεγάλες δυσκολίες και να αντιμετωπίζουν σημαντικές ερευνητικές προκλήσεις.

γ) Η ανεξάρτητη πυρκαγιά κόμης (independent crown fire) διαδίδεται “από κόμη σε κόμη” χωρίς ταυτόχρονη και άμεση κατανάλωση της υποκείμενης επιφανειακής βλάστησης. Εξαπλώνεται στον ανώροφο των δένδρων, χωρίς να εξαρτάται από την πυρκαγιά επιφανείας (Van Wagner 1977, Scott and Reinhardt 2001) και τη θερμότητα που αυτή εκπέμπει (Van Wagner 1993). Για την εκδήλωσή της απαιτούνται: α) η ύπαρξη συνεχούς ανορόφου με χαμηλή έως μεσαία CBD δηλαδή η ύπαρξη ενός συνεχούς στρώματος εναέριας βλάστησης, β) ασυνήθιστα χαμηλές τιμές MC στο φύλλωμα και γ) ακραίες μετεωρολογικές συνθήκες δηλαδή πολύ ισχυρός ή θυελλώδης άνεμος. Η εμφάνιση ανεξάρτητης πυρκαγιάς κόμης σε επίπεδη περιοχή είναι εξαιρετικά σπάνια και για να εκδηλωθεί απαιτούνται πολύ ισχυροί ή θυελλώδεις άνεμοι μεγάλης διάρκειας ενώ υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να λάβει χώρα σε ορεινό περιβάλλον με απότομες πλαγιές, ακόμα και υπό συνθήκες

ανέμων μικρότερης έντασης. Εκδηλώνεται σπάνια και όταν εμφανίζεται, η εκδήλωσή της είναι βραχύβια (Van Wagner 1993, Werth et al. 2013), σε αντίθεση με τις παθητικές και τις ενεργές πυρκαγιές κόμης.

Εκτός από τις τρεις παραπάνω κατηγορίες των πυρκαγιών κόμης που είναι καθοδηγούμενες από τον άνεμο (wind-driven) πυρκαγιές (Rothermel 1991a), υπάρχουν και οι περιπτώσεις πυρκαγιών των οποίων η συμπεριφορά και η εξάπλωση επηρεάζεται καθοριστικά από την ανάπτυξη ισχυρής κατακόρυφης επαγωγικής στήλης (plume-dominated) που υψώνεται κατακόρυφα πάνω από την πυρκαγιά (Rothermel 1991a), σχηματίζοντας μικρή γωνία με την κατακόρυφο. Εκδηλώνονται, συνήθως, όταν ο άνεμος δεν είναι ισχυρός και παράλληλα υπάρχουν διαθέσιμες μεγάλες ποσότητες δασικών καυσίμων με χαμηλή MC, τα οποία μπορούν να καταναλωθούν με υψηλό ρυθμό από τη φωτιά. Η δυνατότητα εκτίμησης ή πρόβλεψης της εκδήλωσης και της συμπεριφοράς όλων αυτών των διαφορετικών κατηγοριών ή/και τύπων πυρκαγιών κόμης μπορεί να υποστηρίξει σημαντικά την επιλογή και την υλοποίηση των κατάλληλων προληπτικών ενεργειών και να αναδείξει τους απαραίτητους δασοκομικούς χειρισμούς σε μια περιοχή. Η δυνατότητα αναγνώρισης των καθοριστικά διαφορετικών ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών τους από τους δασοπροσβέστες, συμβάλλει καθοριστικά στην επιλογή ασφαλών, αποτελεσματικών και αποδοτικών τακτικών δασοπροσβέσεως καθώς και στη λήψη ορθολογικών αποφάσεων στο επιχειρησιακό θέατρο για την επιλογή και την επίτευξη ρεαλιστικών στόχων.

Καθοδηγούμενες από τον άνεμο ενεργές πυρκαγιές κόμης έχουν μετρηθεί να εξαπλώνονται με 6 km/h για αρκετές ώρες ακόμη και με 12 km/h για περίπου μία ώρα (Alexander et al. 2013). Πέρα από τις προαναφερόμενες υπερβολικά υψηλές τιμές ROS που παραπέμπουν σε εξαιρετικά αντίξοες και ακραίες συνθήκες, σε γενικές γραμμές, καθώς ο ROS αυξάνεται και η διαθέσιμη προς καύση βιομάζα των δασικών καυσίμων αυξάνεται επίσης, η ένταση μιας ενεργής πυρκαγιάς κόμης μπορεί εύκολα να τετραπλασιαστεί (π.χ. από 3.000 kW/m σε 12.000 kW/m), μέσα στα πρώτα δευτερόλεπτα της μετάδοσης της φωτιάς από τα επιφανειακά δασικά καύσιμα στην κόμη. Το μήκος των φλογών τους, μπορεί να είναι διπλάσιο ή τριπλάσιο του ύψους των δέντρων, εκπέμπουν τεράστια ποσά θερμότητας και το βάθος της ζώνης ενεργής καύσης ξεπερνά τα 30 ή και τα 45 m (Alexander et al. 2013). Οι πυρκαγιές κόμης συχνά μεταδίδονται και με αξιοσημείωτο αριθμό καυτρών που δημιουργούν σημειακές πυρκαγιές σε σημαντικές αποστάσεις (Athanasiou and Xanthopoulos 2018) και συμβάλλουν στην αύξηση του συνολικού ρυθμού εξάπλωσης, (Alexander et al. 2013) όταν οι αποστάσεις μετάδοσης επιτρέπουν την ανεξάρτητη εξάπλωση των σημειακών πυρκαγιών που δημιουργούνται (Alexander and Cruz 2006). Μια μεγάλη ερευνητική πρόκληση κατά τη προσπάθεια ανάπτυξης μοντέλων πρόβλεψης της συμπεριφοράς των καθοδηγούμενων από τον άνεμο ενεργών πυρκαγιών κόμης, είναι η εκτίμηση του ποσοστού των εναερίων καυσίμων που καταναλώνεται από τη φωτιά. Οι βελόνες, τα φύλλα, οι λειχήνες και τα βρύα καταναλώνονται κατά την εξάπλωση μιας πλήρως ανεπτυγμένης ενεργής πυρκαγιάς κόμης (Scott and Reinhardt 2001) μαζί με κάποιο κλάσμα των λεπτών ζωντανών και νεκρών κλαδιών (Brown and Reinhardt 1991, Brown and Bradshaw 1994, Reinhardt et al. 1997). Η υπόθεση των Call and Albini (1997) ότι οι πυρκαγιές κόμης καταναλώνουν το 65% των λεπτών ζωντανών καυσίμων του ανορόφου μιας συστάδας, αν η MC τους είναι 100%, μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση της κατανάλωσης από την πυρκαγιά (Scott and Reinhardt 2001). Από την άλλη πλευρά σε πυρκαγιές κόμης πολύ μεγάλης έντασης, εκτός από το σύνολο των λεπτών ζωντανών καυσίμων της κόμης, καίγεται και κάποιο κλάσμα των ζωντανών καυσίμων που έχουν διάμετρο μεγαλύτερη των 0,63 cm. Οι παραπάνω ποσότητες δεν είναι καθόλου εύκολο να εκτιμηθούν (Stocks et al. 2004) όπως και οι ποσότητες εκείνες των βελονών που ενίοτε παραμένουν άκαυτες.

Στην Ελλάδα, ο Μητσόπουλος (2005), οι Dimitrakopoulos et al. (2007) οι οποίοι βασίστηκαν στα κριτήρια που έχουν αναπτυχθεί από τον Van Wagner (1977, 1989, 1993) και στη σχέση του Byram (1959) για την ένταση και το μήκος φλόγας της πυρκαγιάς επιφανείας και οι Mitsopoulos et al. (2016) με την ανάπτυξη της εφαρμογής ΣΥΠΥΔΑ, έχουν προτείνει μεθόδους πρόβλεψης της συμπεριφοράς πυρκαγιών κόμης σε Μεσογειακά πευκοδάση οι οποίες μπορούν στο μέλλον να αξιολογηθούν, μέσω της σύγκρισής των αποτελεσμάτων τους με πραγματική συμπεριφορά πυρκαγιών κόμης. Η συμβολή των παραπάνω προσπαθειών μπορεί να αποδειχθεί πολύ σημαντική για τη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών. Παρέχουν τη δυνατότητα εκτίμησης δενδρομετρικών χαρακτηριστικών της δομής των συστάδων και μπορούν να αξιοποιηθούν για την τεκμηρίωση των εκάστοτε ενδεδειγμένων

δασοκομικών χειρισμών και για την εκτίμηση της επίδρασης που αυτοί αναμένεται να έχουν στη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών.

Το μοντέλο του Van Wagner (1977) αποτελεί επίσης και τον βασικό πυρήνα της εφαρμογής CFIS (Crown Fire Initiation and Spread) των Alexander et al. (2006) που είναι το αποτέλεσμα των ερευνητικών εργασιών των Alexander (1998), Cruz (1999) και Cruz et al. (2002, 2004, 2005). Για την πρόβλεψη, από το CFIS, της πιθανότητας μετάδοσης της φωτιάς από τον υπόροφο στον ανώροφο, δηλαδή της “έναρξης της πυρκαγιάς κόμης” (initiation), χρησιμοποιούνται ως ανεξάρτητες μεταβλητές: α) η ταχύτητα (ένταση) του ανέμου στο ύψος των 10 m (U_{10} , km/h), β) το κατακόρυφο κενό διάστημα μεταξύ του ύψους της βάσης της ζωντανής κόμης (Live CrownBH, m) και του μέσου μέγιστου ύψους του υπορόφου δηλαδή η μεταξύ τους υψομετρική διαφορά (FSG: Fuel Strata Gap, m), γ) μία από τις τρεις διαθέσιμες κλάσεις για την εκτίμηση της κατανάλωσης των επιφανειακών καυσίμων από την πυρκαγιά (SFC Class: Surface Fuel Consumption Class, kg/m², βλ. Πίνακα 1) και δ) η εκτιμώμενη τιμή της MC στα λεπτά νεκρά δασικά καύσιμα (EFFM, %) που είναι ταυτόσημη παράμετρος με την FDFMC (%) του BehavePlus (Andrews et al. 2005). Για την πρόβλεψη της κατηγορίας της πυρκαγιάς κόμης (ενεργή ή παθητική) καθώς και του ROS αυτής, ως ανεξάρτητες μεταβλητές, χρησιμοποιούνται: α) η U_{10} , β) η CBD που συχνά καλείται και φαινομενική πυκνότητα της εναέριας καύσιμης ύλης και αναμένεται να καταναλωθεί από μία πλήρως ανεπτυγμένη ενεργή πυρκαγιά κόμης (Scott and Reinhardt 2001, Cruz et al. 2003) και γ) η EFFM.

Η παρούσα εργασία είναι τμήμα της διδακτορικής διατριβής του συγγραφέα (Αθανασίου 2015) και αποτελεί την πρώτη προσπάθεια σύγκρισης πραγματικής συμπεριφοράς πυρκαγιών κόμης, με τις προβλέψεις του CFIS, για την Ελλάδα. Η τεκμηρίωση της πραγματικής συμπεριφοράς πυρκαγιών κόμης, κυρίως σε Χαλέπιο πεύκη (*Pinus halepensis*) αλλά και σε Τραχεία πεύκη (*Pinus brutia*), επέτρεψε, επιπλέον: α) τη δημιουργία σχέσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εμπειρικό εργαλείο πρόβλεψης της μετατροπής μιας παθητικής πυρκαγιάς κόμης σε ενεργή καθώς και β) μια αρχική προσπάθεια εκτίμησης του αναμενόμενου ROS των καθοδηγούμενων από τον άνεμο, ενεργών πυρκαγιών κόμης σε Μεσογειακά πευκοδάση με υπόροφο υψηλών μακί. Οι εν λόγω έλεγχοι και η ανάπτυξη εμπειρικών εργαλείων, μπορούν να υποστηρίξουν σημαντικά τη λήψη αποφάσεων κατά τη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών.

Υλικά και Μέθοδοι

Από την αντιπυρική περίοδο του 2007 έως και σήμερα, καταγράφονται και μετρούνται ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα και ταυτόχρονα τεκμηριώνονται οι επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες, η καιγόμενη βλάστηση και το γεωμορφολογικό ανάγλυφο των περιοχών όπου εξαπλώνονται, εφαρμόζοντας την μεθοδολογία που περιγράφεται αναλυτικά στη διδακτορική διατριβή του συγγραφέα (Αθανασίου 2015) καθώς και πιο συνοπτικά, στις εργασίες των Αθανασίου & Ξανθόπουλος (2009, 2013, 2015) και Athanasiou and Xanthopoulos (2010, 2014, 2018). Από τη βάση δεδομένων που έχει δημιουργηθεί και συνεχώς εμπλουτίζεται, στην παρούσα εργασία αξιοποιήθηκε δείγμα 56 μετρήσεων πραγματικής συμπεριφοράς πυρκαγιών κόμης σε Μεσογειακά πευκοδάση.

Οι παραπάνω μετρήσεις (N=56) συμπεριελήφθησαν στο αρχικό στάδιο του ελέγχου της αξιοπιστίας των προβλέψεων του CFIS, σχετικά με την πιθανότητα μετάδοσης της φωτιάς από τον υπόροφο στον ανώροφο. Κατά το δεύτερο στάδιο του ελέγχου που ακολούθησε, σχετικά με την πρόβλεψη της κατηγορίας της πυρκαγιάς κόμης (παθητική ή ενεργή), αξιοποιήθηκε υποσύνολο 18 μετρήσεων (11 παθητικές και 7 ενεργές πυρκαγιές κόμης, όλες σε δάση Χαλεπίου πεύκης). Οι υπόλοιπες 38 περιπτώσεις εξαιρέθηκαν διότι ήταν πυρκαγιές οι οποίες είχαν εξαπλωθεί σε περιοχές με μικρές ή/και ανοικτές συστάδες πεύκης (Σχήμα 1) όπου δεν υπήρχε συνεχής ανώροφος. Συνεπώς, γι’ αυτές τις περιπτώσεις, ακόμη και αν οι μετεωρολογικές συνθήκες και η κατάσταση των δασικών καυσίμων επέτρεπαν την εκδήλωση ενεργής πυρκαγιάς κόμης, δεν υπήρχε το σύνολο των απαραίτητων προϋποθέσεων για την εμφάνισή της (Van Wagner 1977, Alexander et al 2013) οπότε αυτές οι μετρήσεις (N=38) ήταν μη συγκρίσιμες με τις προβλέψεις του CFIS για την κατηγορία της πυρκαγιάς κόμης. Στο τρίτο στάδιο του ελέγχου της αξιοπιστίας των προβλέψεων του CFIS, έλαβε χώρα η σύγκριση των πραγματικών τιμών του ROS 5 καθοδηγούμενων από τον άνεμο, ενεργών πυρκαγιών κόμης με τις αντίστοιχες προβλέψεις καθώς και για τις υπόλοιπες 2 πυρκαγιές, ο πραγματικός ROS δεν είχε καταστεί εφικτό να μετρηθεί στο πεδίο.

Σχετικά με τα δεδομένα εισόδου στο CFIS: α) η U_{10} προσδιορίστηκε με βάση τις σχετικές μετρήσεις πεδίου (Αθανασίου 2015), β) η παράμετρος FSG μετρήθηκε αξιοποιώντας το σχετικό φωτογραφικό και μαγνητοσκοπημένο υλικό, γ) η SFC Class, επιλέχθηκε σύμφωνα με τον Πίνακα 1, δ) η EFFM υπολογίστηκε με βάση την μεθοδολογία του Rothermel (1983) και ε) η CBD της Χαλεπίου πεύκης εκτιμήθηκε με βάση τα παρακάτω βήματα. Οι υπολογισμοί έγιναν αρχικά σε επίπεδο δέντρου (CrownBD) και στη συνέχεια έγινε αναγωγή στο επίπεδο της δασοσυστάδας (CBD), επιστρατεύοντας την παραδοχή ότι η βιομάζα κατανέμεται ομοιόμορφα στον ανώροφο (Keane et al. 1998) που όμως συχνά απέχει αρκετά από την πραγματικότητα (Scott and Reinhardt 2001). Η CrownBD είναι η διαθέσιμη προς καύση ποσότητα βιομάζας ανά μονάδα όγκου της κόμης ενός δένδρου (Scott and Reinhardt 2001). Κατά τον υπολογισμό της CrownBD, συμπεριελήφθησαν οι ζωντανές βελόνες των πεύκων, τα ζωντανά κλαδάκια με διάμετρο έως και 0,63 cm και τα νεκρά καύσιμα της 1 και των 10 h. Τα ζωντανά κλαδιά με διάμετρο από 0,64 έως 2,5 cm δεν συμπεριελήφθησαν στους υπολογισμούς καθώς έγινε η υπόθεση ότι δεν καταναλώνονται από τη φωτιά. Αρχικά, μετρήθηκε η διάμετρος της κόμης (D , m), με τη βοήθεια του φωτογραφικού υλικού και Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της επιφάνειας της κόμης (m^2) με την υπόθεση ότι η προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο είναι κυκλικού σχήματος. Με βάση τη D , εκτιμήθηκε και η έμφλοια στηθιαία διάμετρος (d , cm), αξιοποιώντας τη σχέση $D = 0.4612958 \cdot d^{0.6681564}$ (Απατσιδής κ.α. 1999, Απατσιδής και Τζιοβάρας 2000) η οποία λύθηκε ως προς d [$d = \left(\frac{D}{0.4612958}\right)^{\frac{1}{0.6681564}}$]. Στη συνέχεια, οι τιμές της έμφλοιας στηθιαίας διαμέτρου χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των τιμών του διαθέσιμου βάρους (Crown Fuel Weight ή CFW, kg) των παραπάνω κατηγοριών καυσίμων της κόμης οι οποίες αθροίστηκαν για τον υπολογισμό του διαθέσιμου συνολικού βάρους της βιομάζας της κόμης.



Σχήμα 1. Μεμονωμένα δένδρα Χαλεπίου πεύκης λαμπαδιάζουν κατά την εξάπλωση πυρκαγιάς σε περιοχή με υψηλά μακί.
Figure 1. A stand of isolated Aleppo pine trees torching during the spread of a wildfire in tall maquis.

Πίνακας 1. Οι τρεις κλάσεις της κατανάλωσης των επιφανειακών καυσίμων. Οι τιμές των νεκρών καυσίμων (1, 10 και 100h) και του ζωντανού κλάσματος (LW) είναι οι τιμές των παραμέτρων των αντίστοιχων M.K.Y. των Dimitrakopoulos et al. (2001) και Dimitrakopoulos (2002).

Table 1. Calculating and classifying Surface Fuel Consumption (SFC); the necessary Fuel Load values were derived from five fuel models for Greece (Dimitrakopoulos et al. 2001, Dimitrakopoulos 2002).

Δασικός τύπος	Fuel Load κατηγοριών καυσίμων (t/ha)				Συνολικό Fuel Load (t/ha)	Συνολικό Fuel Load (kg/m ²)	SFC Class (kg/m ²)
	1 h	10 h	100 h	LW			
Υψηλά μακί	17,88	13,30	8,50	10,60	50,28	5,028	> 2
Χαμηλά μακί	9,91	6,80	3,60	7,70	28,01	2,801	
Ξηροτάπητας	11,84	0,47	0,24	0	12,55	1,255	1 έως 2
Φρύγανα (Αστοβίδα)	3,50	1,02	0,28	0,85	5,65	0,565	
Χόρτα	4,82	0,49	0	0	5,31	0,531	< 1

Αξιοποιώντας τις αλλομετρικές εξισώσεις της μορφής $\ln(CFW) = \ln a + b \cdot (\ln(d))$ των Mitsopoulos and Dimitrakopoulos (2007a) για τις ζωντανές βελόνες, τα ζωντανά κλαδάκια με διάμετρο έως και 0,63 cm και τα νεκρά καύσιμα της 1 και των 10h, λύνοντας ως προς το CFW της κάθε κατηγορίας και πολλαπλασιάζοντας με τον εκάστοτε συντελεστή διόρθωσης των Mitsopoulos and Dimitrakopoulos (2007b), προέκυψαν οι τρεις αντίστοιχες εξισώσεις της μορφής $CFW = a \cdot d^b$. Η διαθέσιμη προς καύση συνολική βιομάζα της κόμης, διαιρέθηκε με το εμβαδόν της επιφάνειας της προβολής της στο έδαφος για τον υπολογισμό του συνολικού φορτίου της βιομάζας (Crown Fuel Load ή CFL, kg/m²), το οποίο διαιρέθηκε με το κατακόρυφο βάθος (ή ύψος) της κόμης για τον υπολογισμό της CrownBD (kg/m³). Το ύψος της κόμης είναι η διαφορά του ύψους του δένδρου με το Live CrownBH. Στη συνέχεια, η CrownBD πολλαπλασιάστηκε με τον εκάστοτε συντελεστή κάλυψης του ανορόφου (CC, Canopy Cover) που είναι αδιάστατο μέγεθος με τιμές από 0,1 έως 1 και περιγράφει την οριζόντια διάταξη των δέντρων και το βαθμό συγκόμωσής τους, ώστε να υπολογιστεί η CBD.

Επιπλέον, ελέγχθηκε η δυνατότητα δημιουργίας εμπειρικού εργαλείου (κριτηρίου) που να υπολογίζει - για δεδομένη τιμή CBD - τον ελάχιστο ρυθμό εξάπλωσης ($ROS_{critical}$) ώστε η παθητική πυρκαγιά κόμης, να μετατραπεί σε ενεργή κόμης (Van Wagner 1977). Αξιοποιήθηκαν 5 περιπτώσεις (Πίνακας 2) που ήταν κατάλληλες για αυτή την ανάλυση: α) τρεις 3 παθητικές πυρκαγιές κόμης που εξαπλώθηκαν σε δάση Χαλεπίου πεύκης με υπόροφο υψηλών μακί σε σχεδόν επίπεδες περιοχές, βρίσκονταν στο στάδιο λίγο πριν τη μετατροπή τους σε ενεργές κόμης και ήταν καθοδηγούμενες από άνεμο έντασης έως και 28 km/h και β) 2 πυρκαγιές που εξαπλώθηκαν στον ίδιο δασικό τύπο, σε περιοχές μικρής μορφολογικής κλίσης (Slope), είχαν μόλις μετατραπεί σε ενεργές κόμης και ήταν καθοδηγούμενες από άνεμο (Σχήμα 2), έντασης έως και 20 km/h. Αρχικά, για κάθε μία περίπτωση, υπολογίστηκε η CBD, που στη συνέχεια πολλαπλασιάστηκε με το πραγματικό ROS (m/min), για τον υπολογισμό της παραμέτρου (S, kg/m²min) που αναπαριστά το ρυθμό κατανάλωσης της βιομάζας της κόμης ανά μονάδα επιφάνειας (Van Wagner 1977), εκτιμήθηκε η FDFMC και ορίστηκε η περιεχόμενη υγρασία στα ζωντανά ξυλώδη καύσιμα (LW) σύμφωνα με μετρήσεις οι οποίες είχαν διεξαχθεί κατά την ίδια χρονική περίοδο.

Πίνακας 2. Συμπεριφορά των πυρκαγιών που αξιοποιήθηκαν για τη δημιουργία του κριτηρίου μετατροπής της παθητικής πυρκαγιάς κόμης σε ενεργή κόμης και οι επικρατούσες συνθήκες κατά την εξάπλωσή τους.

Table 2. Crown fire behaviour that led to the generation of the ROS criterion for active crowning and related meteorological, topography and forest fuels data.

Κατηγορία πυρκαγιάς κόμης	ROS (km/h-m/min)	CBD (kg/m ³)	S (kg/m ² min)	FDFMC (%)	LW (%)	Slope (%)	U ₁₀ (km/h)
Παθητική	0,96 – 16,0	0,17	2,73	4	80	0	6
Παθητική	0,77 – 12,8	0,19	2,42	5	75	0	10
Παθητική	1,47 – 24,5	0,20	4,94	5	82	0	28
Ενεργή	1,18 – 19,7	0,19	3,72	4	75	7	13
Ενεργή	2,23 – 37,2	0,10	3,75	6	80	3	20

Για τις τρεις παθητικές πυρκαγιές κόμης του Πίνακα 2, οι μέσες τιμές του ROS (1,07 km/h ή 17,78 m/min), της CBD (0,19 kg/m³), της S (3,36 kg/m²min), της FDFMC (5%) και της LW (79%) αναπαριστούν τις μέσες επικρατούσες συνθήκες, λίγο πριν τη μετατροπή της παθητικής πυρκαγιάς κόμης σε ενεργή πυρκαγιά κόμης και η σχέση μεταξύ CBD και ROS, είναι: $CBD \cdot ROS_{critical}(m/min) = 3,36$ (1). Συνεπώς, μπορεί να υποθεθεί πως όταν $CBD = 0,19$ kg/m³, τότε ο

$ROS_{critical}$ χρειάζεται να είναι λίγο μεγαλύτερος από 1,07 km/h (ή 17,78 m/min) ώστε η παθητική πυρκαγιά κόμης να αρχίσει να μετατρέπεται σε ενεργή πυρκαγιά κόμης.

Στη συνέχεια, αξιοποιώντας τα δενδρομετρικά χαρακτηριστικά ατόμων Χαλεπίου πεύκης υψηλού, μεσαίου και χαμηλού φορτίου εναέριας καύσιμης ύλης, των Μητσόπουλος και Δημητρακόπουλος (2007), αρχικά υπολογίστηκαν πιθανές τιμές της CrownBD που πολλαπλασιάστηκαν με πιθανούς CC (0,4, 0,7 και 0,9) οπότε προέκυψαν πιθανές τιμές της CBD (από 0,01 έως 0,14 kg/m³) που περιγράφουν χαρακτηριστικές καταστάσεις πευκοδασών. Για πέντε τιμές από το παραπάνω διάστημα τιμών της CBD (συγκεκριμένα για 0,01, 0,04, 0,05, 0,1 και 0,14 kg/m³) καθώς και για δύο επιπλέον τιμές (0,2 και 0,25 kg/m³), που περιγράφουν πολύ πυκνό ανώροφο Χαλεπίου πεύκης, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες αναμενόμενες τιμές $ROS_{critical}$, αξιοποιώντας τη σχέση (1).

Για τις δύο ενεργές πυρκαγιές κόμης, οι μέσες τιμές των ίδιων παραμέτρων (ήτοι $ROS=1,71$ km/h ή 28,42m/min, $CBD=0,14$ kg/m³, $S=3,73$ kg/m²min, $FDPMC=5\%$ και $LW=78\%$), αναπαριστούν τις μέσες επικρατούσες συνθήκες, λίγο μετά τη μετατροπή της παθητικής σε ενεργή πυρκαγιά κόμης (δηλαδή λίγο μετά την εκδήλωση της ενεργής πυρκαγιάς κόμης) και η σχέση μεταξύ CBD και ROS , είναι: $CBD*ROS_{critical}(m/min)=3,73$ (2). Δηλαδή όταν $CBD=0,14$ kg/m³, τότε ο $ROS_{critical}$ είναι λίγο μικρότερος από 1,71 km/h (ή 28,42 m/min). Αν επιπλέον ληφθεί υπόψη ότι για $CBD=0,14$ kg/m³, η σχέση (1), υπολογίζει $ROS_{critical}=1,44$ km/h (ή 24 m/min), τότε εξάγεται το συμπέρασμα πως ο ROS της ενεργής πυρκαγιάς κόμης που θα έχει μόλις εκδηλωθεί, σε ανώροφο Χαλεπίου πεύκης με $CBD = 0,14$ kg/m³, θα είναι λίγο μεγαλύτερος από 1,44 km/h και λίγο μικρότερος από 1,7 km/h τείνοντας προς τη δεύτερη τιμή. Για τις ίδιες επτά τιμές της CBD που είχαν χρησιμοποιηθεί ως δεδομένο εισόδου στη σχέση 1 με σκοπό τον υπολογισμό των αναμενόμενων τιμών $ROS_{critical}$, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες αναμενόμενες τιμές $ROS_{critical}$, με βάση τη σχέση (2) και στη συνέχεια τα 14 ζεύγη τιμών ($ROS_{critical}$, CBD) συσχετίστηκαν για τη δημιουργία κριτηρίου μετατροπής της παθητικής πυρκαγιάς κόμης σε ενεργή πυρκαγιά κόμης (Σχήμα 3).



Σχήμα 2. Καθοδηγούμενη από τον άνεμο, ενεργή πυρκαγιά κόμης, στο αρχικό στάδιο της εκδήλωσής της σε ώριμο δάσος Χαλεπίου πεύκης ($CBD=0,19$, $U_{10}=13$ km/h, κλίση=7%, πραγματικός $ROS=1,18$ km/h ή 19,7m/min, βλ. Πίνακα 3, 2^η εγγραφή)
Figure 2. A wind-driven, active crown fire - in its initial stage - is spreading through a mature Aleppo pine forest ($CBD=0,19$ kg/m³, $U_{10}=13$ km/h, slope=7%, ROS observed=1,18 km/h or 19,7 m/min, see Table 3, record 2)

Αποτελέσματα

Για όλες τις περιπτώσεις (N=56), το CFIS προέβλεψε ότι η πυρκαγιά επιφανείας θα μετατραπεί σε πυρκαγιά κόμης. Για τις 6 από τις 11 παθητικές πυρκαγιές κόμης, η πρόβλεψη του CFIS ήταν “ενεργή” ενώ για τη 1 από τις 7 ενεργές πυρκαγιές κόμης, η πρόβλεψη ήταν “παθητική”. Από τη σύγκριση των πραγματικών τιμών του ROS των 5 ενεργών πυρκαγιών κόμης με τις αντίστοιχες

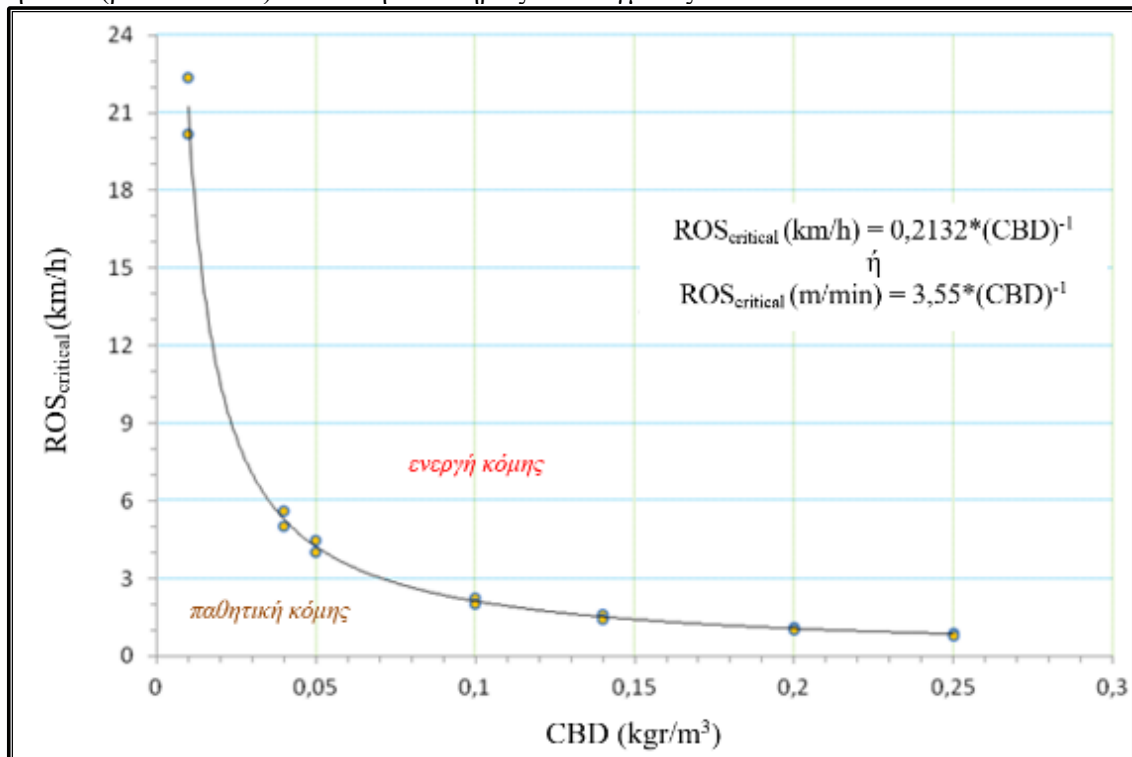
προβλέψεις του CFIS – στις οποίες ενσωματώνονται από την εφαρμογή και οι εκάστοτε προβλέψεις για την κατηγορία της πυρκαγιάς κόμης - προέκυψε ο Πίνακας 3.

Πίνακας 3. Οι προβλέψεις του CFIS για τις ενεργές πυρκαγιές κόμης σε σύγκριση με τις πραγματικές τιμές και ο υπολογισμός των αντίστοιχων τιμών του $ROS_{critical}$

Table 3. CFIS predictions regarding crown fire type and ROS versus observed active crown fire ROS values and calculation of the corresponded $ROS_{critical}$ values

A/A	ROS (km/h)	CBD (kg/m ³)	Slope (%)	U ₁₀ (km/h)	Πρόβλεψη CFIS		ROS _{critical} (km/h)	ROS/ROS _{critical}
					Κατηγορία κόμης	ROS _{CFIS} (km/h)		
1	2,40	0,12	-3	20	Ενεργή	2,30	1.78	1.35
2	1,18	0,19	7	13	Ενεργή	2,40	1.12	1.05
3	2,23	0,1	3	20	Ενεργή	2,20	2.13	1.05
4	1,76	0,21	29	0	Παθητική	0,03	1.02	1.73
5	1,57	0,25	0	27	Ενεργή	4,9	0.85	1.84

Η συσχέτιση των τιμών της CBD με τις αντίστοιχες τιμές του $ROS_{critical}$ που υπολογίστηκαν από τις σχέσεις (1) και (2), οδήγησε στη δημιουργία της σχέσης: $ROS_{critical}(m/min) = 3,55*(CBD)^{-1}$ (3), που απεικονίζεται στο Σχήμα 3. Στη συνέχεια, για τις ενεργές πυρκαγιές κόμης του Πίνακα 3, υπολογίστηκαν, με βάση τη σχέση (3), οι τιμές του $ROS_{critical}$ και οι αντίστοιχες τιμές του λόγου $ROS/ROS_{critical}$ που τελικά προστέθηκαν σε αυτόν. Ακολούθως, για τις περιπτώσεις 1, 4 και 5 του Πίνακα 3, οι οποίες ήταν πλήρως ανεπτυγμένες ενεργές πυρκαγιές κόμης (Scott and Reinhardt 2001, Cruz et al. 2003), υπολογίστηκε η μέση τιμή του λόγου $ROS/ROS_{critical}$ που ισούται με 1,64 συνεπώς μπορεί να υποτεθεί πως $ROS=1,64*ROS_{critical}$ (4). Επισημαίνεται πως σε αυτόν τον υπολογισμό δεν περιλαμβάνονται οι εγγραφές 2 και 3 που ήταν ενεργές πυρκαγιές κόμης οι οποίες είχαν μόλις εκδηλωθεί (βλ. Πίνακα 2) και δεν ήταν πλήρως ανεπτυγμένες.



Σχήμα 3. Συσχέτιση τιμών CBD ((kg/m³) με τις αντίστοιχες τιμές $ROS_{critical}$ (km/h) που υπολογίστηκαν από τις σχέσεις (1) και (2), για τη δημιουργία του κριτηρίου μετατροπής της παθητικής πυρκαγιάς κόμης σε ενεργή κόμης

Figure 3. Plot of CBD ((kg/m³) and the corresponded $ROS_{critical}$ (km/h) values calculated from equations (1) and (2), that led to the generation of the ROS criterion for active crowning

Συζήτηση – Συμπεράσματα

Το CFIS, επιβεβαίωσε την αυξημένη πιθανότητα μεταφοράς της φωτιάς στην κόμη που υπάρχει στα μεσογειακά πευκοδάση στην Ελλάδα ακόμη και κάτω από τις συνήθεις συνθήκες καύσης, προβλέποντας και για τις 56 περιπτώσεις που εξετάστηκαν, ότι η πυρκαγιά επιφανείας θα μετατραπεί σε κόμη. Η επιτυχής πρόβλεψη αποδίδεται κυρίως στις χαμηλές τιμές του CBH της Χαλεπίου πεύκης (Mitsopoulos and Dimitrakopoulos 2007b) καθώς και στις υψηλές τιμές της SFC Class και χρειάζεται να επισημανθεί ότι το σύστημα προέβλεψε κάτι που ήταν ουσιαστικά προφανές.

Τα σφάλματα κατά την πρόβλεψη της κατηγορίας της πυρκαγιάς κόμης ήταν αξιοσημείωτα. Για το 55% των παθητικών πυρκαγιών κόμης που εξετάστηκαν (για τις 6 από τις 11), το CFIS προέβλεψε ότι η πυρκαγιά θα μετατραπεί σε ενεργή πυρκαγιά κόμης μετά τη μεταφορά της φωτιάς στην κόμη ενώ στην πραγματικότητα η πυρκαγιά που καταγράφηκε στο πεδίο ήταν παθητική κόμη. Η χαμηλή απόδοση του CFIS κατά την πρόβλεψη της κατηγορίας της πυρκαγιάς κόμης μπορεί να εξηγηθεί από το κατακόρυφο κενό διάστημα μεταξύ της βάσης της ζωντανής κόμης και του μέσου μέγιστου ύψους του υπορόφου (FSG) που ήταν πολύ μικρό ($\leq 2\text{m}$), από τις μεγάλες τιμές της CBD ($0,11 < \text{CBD} < 0,27 \text{ kg/m}^3$) και για κάποιες περιπτώσεις και από την ένταση του ανέμου που προσέγγισε τα 27 km/h . Το παραπάνω συμφωνεί με τη διαπίστωση ότι για τα δάση Χαλεπίου πεύκης, τα μοντέλα των Wagner (1977) και Cruz et al. (2004), προβλέπουν την εκδήλωση ενεργών πυρκαγιών κόμης μεγάλης έντασης στις ομήλικες συστάδες λόγω των υψηλότερων τιμών του διαθέσιμου CFL και της CBD ενώ σε ανομοιογενείς, ως προς την ηλικία των ατόμων, συστάδες προβλέπουν κυρίως την εκδήλωση παθητικής πυρκαγιάς κόμης (Mitsopoulos and Dimitrakopoulos 2007b). Για την 1 από τις 7 ενεργές πυρκαγιές κόμης, το CFIS προέβλεψε λανθασμένα ότι η πυρκαγιά θα “παραμείνει” παθητική πυρκαγιά κόμης μετά τη μεταφορά της φωτιάς στην κόμη. Αν και η τιμή της CBD σε αυτήν την περίπτωση ήταν πολύ υψηλή ($0,21 \text{ kg/m}^3$), και ο υπόροφος διείσδυσε στη βάση του ανορόφου κατά περίπου 2m ($\text{FSG} = -2\text{m}$), δεδομένα ικανά να υποστηρίξουν πρόβλεψη εμφάνισης ενεργής πυρκαγιάς κόμης, η αδυναμία σωστής πρόβλεψης εξηγείται από το ότι η εν λόγω πυρκαγιά είχε εξαπλωθεί προς τα ανάντη, σε πλαγιά μορφολογικής κλίσης 29% που προκάλεσε την εκδήλωση της ενεργής πυρκαγιάς κόμης αλλά κάθετα στον άνεμο, χωρίς την καθοδήγησή του. Με μηδενική ταχύτητα του ανέμου ως δεδομένο εισόδου στο CFIS και με δεδομένη την αδυναμία του εν λόγω συστήματος να συνυπολογίσει την επίδραση της μορφολογικής κλίσης στη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών (Cruz et al. 2002), το CFIS ουσιαστικά προέβλεψε τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς που εξαπλώνεται σε επίπεδη περιοχή και σε συνθήκες νηνεμίας, αφού μπορεί να προβλέψει τη συμπεριφορά των πυρκαγιών κόμης, μόνο σε επίπεδες περιοχές (Cruz et al. 2002).

Για τις 5 ενεργές πυρκαγιές κόμης σε δάση Χαλεπίου πεύκης (Πίνακας 3), των οποίων ο πραγματικός ROS ήταν γνωστός, έγιναν οι αντίστοιχες προβλέψεις από το CFIS (ROS_{CFIS}), με βάση το μοντέλο των Cruz et al. (2005). Το πολύ μικρό δείγμα επέτρεψε μόνον κάποιες παρατηρήσεις και μερικές επισημάνσεις σχετικά με τη δυνατότητα αξιοποίησης του CFIS στην Ελλάδα, για την πρόβλεψη του ROS των ενεργών πυρκαγιών κόμης σε Μεσογειακά πευκοδάση. Από πρακτική άποψη, οι 4 πυρκαγιές του Πίνακα 3, εξαπλώθηκαν σε επίπεδες περιοχές (από -3 έως και +7%) ενώ η 1 πυρκαγιά ήταν περίπτωση εξάπλωσης προς τα ανάντη, με τη διεύθυνση του διανύσματος του ανέμου κάθετο στη διεύθυνση του διανύσματος της κλίσης.

Η κατά πολύ υπερεκτιμημένη πρόβλεψη της πέμπτης εγγραφής του Πίνακα 3 ($\text{ROS}_{\text{CFIS}} = 4,9 \text{ km/h}$), μπορεί να αποδοθεί στην υψηλή τιμή της CBD διότι στο μοντέλο του Cruz (1999) η σχέση μεταξύ των ROS και CBD είναι ανάλογη καθώς και στο ότι η τιμή της έντασης του ανέμου δεν ήταν πολύ μικρή. Όμως, δεν είναι βέβαιο ότι στην πραγματικότητα, η υψηλή CBD ευνοεί πάντοτε την αύξηση του ROS ή το αν υπάρχει κάποια τιμή κατωφλίου της CBD, πάνω από την οποία εμποδίζεται η γρήγορη διάδοση της φλόγας ή περιορίζεται και η επίδραση του ανέμου επάνω της. Η σχεδόν μηδενική τιμή της πρόβλεψης για την τέταρτη περίπτωση ($\text{ROS}_{\text{CFIS}} = 0,03 \text{ km/h}$) έχει ήδη εξηγηθεί παραπάνω: το CFIS ουσιαστικά προέβλεψε τη συμπεριφορά μιας παθητικής πυρκαγιάς κόμης που εξαπλώνεται σε επίπεδη περιοχή και σε συνθήκες νηνεμίας. Η δεύτερη εγγραφή του Πίνακα 3 (βλ. Σχήμα 2) αφορά σε μία ενεργή πυρκαγιά κόμης που είχε μόλις εκδηλωθεί και άρα δεν ήταν πλήρως ανεπτυγμένη, εξηγώντας σε κάποιο βαθμό, την επίσης υπερεκτιμημένη πρόβλεψη του CFIS γι’ αυτήν την περίπτωση αφού το μοντέλο του Van Wagner (1977) και τα υπόλοιπα μοντέλα που αποτελούν τον πυρήνα του, αναφέρονται σε πυρκαγιές κόμης οι οποίες έχουν προσεγγίσει έναν περίπου σταθερό ρυθμό εξάπλωσης.

Το γεγονός ότι τα μοντέλα που αποτελούν τον πυρήνα του CFIS, βασίζονται σε δεδομένα που έχουν προέλθει από τον Καναδά και τις Η.Π.Α., εγείρει ερωτήματα για τη δυνατότητα εφαρμογής του (Cruz et al. 2002) σε Μεσογειακά δασικά οικοσυστήματα. Η συζήτηση, σχετικά με την επίδραση των χαρακτηριστικών του ανορόφου στη συμπεριφορά των ενεργών πυρκαγιών κόμης, είναι ευρεία και περιλαμβάνει πολλές ετερόκλητες υποθέσεις και προσεγγίσεις. Το φυσικό μοντέλο του Grishin (1997) δείχνει αύξηση του ROS με τη μείωση του CBD ενώ το εμπειρικό μοντέλο του Cruz (1999) δείχνει ανάλογη σχέση μεταξύ των ROS και CBD. Ο τρόπος με τον οποίο ανταποκρίνεται το μοντέλο του Albinì (1996) στις διακυμάνσεις του CBD, δεν είναι γνωστός. Η δυσκολία ποσοτικής περιγραφής των συμπλεγμάτων δασικών καυσίμων και ειδικά των χαρακτηριστικών της κόμης αποτελεί συχνά, το λόγο μη εφαρμογής των μοντέλων πρόβλεψης της συμπεριφοράς των πυρκαγιών κόμης, με αποτέλεσμα τον περιορισμό της χρήσης τους (Cruz et al. 2003).

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης, το CFIS δεν φαίνεται να έχει την απαιτούμενη ευαισθησία για αξιόπιστη πρόβλεψη της συμπεριφοράς των πυρκαγιών κόμης στις συνθήκες που επικρατούν στα Ελληνικά πευκοδάση, δεν μπορεί να προταθεί για ευρεία επιχειρησιακή εφαρμογή στην Ελλάδα και απαιτείται η περαιτέρω αξιολόγησή του. Από την άλλη πλευρά θα ήταν πολύ χρήσιμο να ενσωματωθεί σε κατάλληλα προσαρμοσμένα εκπαιδευτικά προγράμματα δασοπροσβεστών και στελεχών δασικών υπηρεσιών ώστε να αξιοποιείται - μαζί και με άλλα συστήματα και μοντέλα πρόβλεψης της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών - για τη διευκόλυνση της κατανόησης των βασικών φυσικών νόμων και μηχανισμών που διέπουν τη διάδοση της φωτιάς (Αθανασίου 2015, Athanasiou 2018). Η σχέση (3) είναι το αποτέλεσμα της ανάλυσης της πραγματικής συμπεριφοράς πέντε πυρκαγιών κόμης, οι οποίες εξαπλώθηκαν σε Μεσογειακά πευκοδάση, όπου η CBD κυμάνθηκε από 0,1 έως 0,2 kg/m³, η κλίση από 0 έως 7% και σε συνθήκες U₁₀ από 6 έως 28 km/h, FDFMC από 4 έως 6% και LW από 75 έως 82%. Είναι εμπειρικό εργαλείο που μπορεί να αξιοποιηθεί ως κριτήριο για την εκδήλωση της ενεργής πυρκαγιάς κόμης, απαιτεί ένα μόνο δεδομένο εισόδου, την τιμή της CBD και η δυνατότητά του να προβλέπει επιτυχώς την μετατροπή της παθητικής πυρκαγιάς κόμης σε ενεργή, χρειάζεται να αξιολογηθεί. Η τιμή S=3,55 (kg/m²min) είναι λίγο μεγαλύτερη από την τιμή 3 (kg/m²min) του VanWagner (1977).

Στον Πίνακα 4, παρουσιάζονται τιμές ROS_{critical} που προκύπτουν από την επίλυση της σχέσης (3), για ένα εύρος πιθανών τιμών CBD. Για τη διευκόλυνση πιθανής επιχειρησιακής εφαρμογής αλλά και αξιολόγησης της προτεινόμενης μεθοδολογίας, παρατίθενται επίσης οι εκάστοτε αντίστοιχες προβλέψεις του ROS πλήρους ανεπτυγμένης ενεργής κόμης, με βάση αφ' ενός τον συντελεστή 1,64 της σχέσης (4), αφ' ετέρου τον συντελεστή 1,81 που έχει υπολογιστεί για τον ίδιο δασικό τύπο από τους Athanasiou and Xanthopoulos (2010). Από πρακτική άποψη η εκάστοτε τιμή της ROS_{critical} μπορεί να θεωρηθεί πως είναι ίση με την μέγιστη τιμή του ROS της πυρκαγιάς επιφανείας αν και κατά τις προσπάθειες περιγραφής και μοντελοποίησης του φαινομένου, δεν πρέπει να αγνοείται πως δεν είναι ακριβώς ίδια και το ότι η πρώτη τείνει να είναι λίγο πιο υψηλή από τη δεύτερη.

Πίνακας 4: Υπολογισμός των τιμών του ROS_{critical} για πιθανές τιμές της CBD με βάση τη σχέση (3) και εκτίμηση των αντίστοιχων τιμών του ROS της πλήρους ανεπτυγμένης ενεργής πυρκαγιάς κόμης, με βάση δύο συντελεστές.

Table 4. Solution of equation (3) for a range of values of CBD and the estimation of the corresponded ROS values of a fully-fledged active crown fire by utilizing two different coefficients

CBD (kg/m ³)	ROS _{critical}		Πρόβλεψη ROS πλήρους ανεπτυγμένης ενεργής πυρκαγιάς κόμης, με βάση τον συντελεστή 1,64 της σχέσης (4)		Πρόβλεψη ROS πλήρους ανεπτυγμένης ενεργής πυρκαγιάς κόμης, με βάση τον συντελεστή 1,81 των Athanasiou and Xanthopoulos (2010)	
	(m/min)	(km/h)	(m/min)	(km/h)	(m/min)	(km/h)
0,04	88.8	5.33	145.6	8.73	160.6	9.64
0,05	71.0	4.26	116.4	6.99	128.5	7.71
0,1	35.5	2.13	58.2	3.49	64.3	3.86
0,14	25.4	1.52	41.6	2.50	45.9	2.75
0,17	20.9	1.25	34.2	2.05	37.8	2.27
0,2	17.8	1.07	29.1	1.75	32.1	1.93
0,25	14.2	0.85	23.3	1.40	25.7	1.54

Στον Πίνακα 4 και στο Σχήμα 3, φαίνεται ότι ενώ για $CBD \leq 0,04 \text{ kg/m}^3$, η εκδήλωση ενεργής πυρκαγιάς κόμης είναι εξαιρετικά σπάνια ή αδύνατη. Για $CBD \leq 0,05 \text{ kg/m}^3$, η πιθανότητα μετατροπής μιας παθητικής πυρκαγιάς κόμης σε ενεργή είναι πολύ μικρή, καθώς ο ROS της πρέπει να προσεγγίσει και να ξεπεράσει την τιμή 4,26 km/h (ή 71 m/min). Ακόμα όμως κι αν ο ROS ξεπεράσει αυτή την τιμή, θα εκδηλωθεί μάλλον μια παθητική πυρκαγιά κόμης μεγάλης έντασης η οποία δεν θα αναμένεται να μετατραπεί σε ενεργή πυρκαγιά κόμης (Alexander and Cruz 2011), εξ' αιτίας της χαμηλής CBD. Επιπλέον, αν και σε περιπτώσεις πολύ πυκνών πευκοδασών οι τιμές του CBD είναι υψηλές, άρα οι τιμές του $ROS_{critical}$ αναμένεται να είναι χαμηλές οπότε η πιθανότητα εμφάνισης ενεργής πυρκαγιάς κόμης αναμένεται να είναι μεγάλη, εν τούτοις κάτι τέτοιο μπορεί να μην επιτυγχάνεται είτε λόγω της σημαντικής μείωσης της έντασης του ανέμου στο ύψος λίγο πάνω από την κορυφή του ανορόφου εξ' αιτίας του συντελεστή τριβής της βλάστησης είτε επειδή η δασοσυστάδα κατά κάποιον τρόπο αυτοπροστατεύεται λόγω της συμπαγούς δομής της είτε και επειδή είναι προστατευμένη από τον άνεμο λόγω των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής οπότε η ένταση του ανέμου εκεί είναι περαιτέρω μειωμένη. Σε τέτοιες περιπτώσεις, συνήθως εκδηλώνεται μια παθητική πυρκαγιά κόμης υψηλής έντασης η οποία δεν μετατρέπεται εύκολα σε ενεργή. Επιπλέον μετρήσεις πραγματικής συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών κόμης στο μέλλον, θα επιτρέψουν τον έλεγχο της αξιοπιστίας των προβλέψεων του Πίνακα 4 καθώς και περαιτέρω έλεγχο της αξιοπιστίας των προβλέψεων του CFIS, επίσης.

Ευχαριστίες

Η παρούσα ερευνητική εργασία αποτελεί τμήμα της διδακτορικής διατριβής του συγγραφέα που χρηματοδοτήθηκε σε ένα μέρος της, από τη Διεθνή Ένωση για τις Δασικές Πυρκαγιές (International Association of Wildland Fire) διαμέσου της υποτροφίας για υποψήφιους διδάκτορες (Doctoral Student Scholarship Award) για το έτος 2014.

Abstract

This paper presents: i) a testing of fifty-six field observations of crown fire behaviour versus predictions from CFIS (Crown Fire Initiation and Spread) software tool, regarding crowning onset, crown fire type and Rate of Spread (ROS), for Mediterranean pine forests and ii) an empirical equation (criterion) that was developed and calculates, for any specified value of Canopy Bulk Density (CBD), the critical surface ROS value (threshold) above which active crowning can be sustained, in Mediterranean pine forests. Some limitations regarding active crown fire ROS prediction, were addressed and discussed, also. Even though CFIS, was deemed as inappropriate for operational use in Greece before further testing, it might still be quite useful as a training tool for the estimation of crown initiation and could be suitably incorporated in firefighters training courses.

Βιβλιογραφία

- Albini, F.A., 1984. Wildland fires. *American Scientist*. 72: 590-597.
- Albini, F.A., Brown, J.K., Reinhardt, E.D., Ottmar, R.D., 1995. Calibration of a large fuel burnout model. *International Journal of Wildland Fire* 5: 173-192. doi: 10.1071/WF9950173.
- Alexander, M.E., 1988. Help with making crown fire hazard assessments. In: Fischer, W. C.; Arno, S. F., comps. *Protecting people and homes from wildfire in the Interior West: proceedings of the Symposium and Workshop; 1988 October 6-8; Missoula, MT. Proc. Gen. Tech. Rep. INT-251*. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experimental Station. 147-156.
- Alexander, M.E., 1998. *Crown fire thresholds in exotic pine plantations of Australasia*. Australian National University, Canberra, Australia. 228 p. Dissertation.
- Alexander, M.E., Cruz, M.G., 2006. Evaluating a model for predicting active crown fire rate of spread using wildfire observations. *Can. J. For. Res.* 36: 3015–3028.
- Alexander, M.E., Cruz, M.G., Lopes, A.M.G., 2006. CFIS: a software tool for simulating crown fire initiation and spread [Abstr.]. *For. Ecol. Manage.* 234: S133.
- Alexander, M.E., Cruz, M.G., 2012. Interdependencies between flame length and fireline intensity in predicting crown fire initiation and crown scorch height. *International Journal of Wildland Fire* 21: 95-113.

Alexander, M.E., Cruz, M.G., Vaillant, N.M., Peterson, D.L., 2013. Crown fire behavior characteristics and prediction in conifer forests: a state-of-knowledge synthesis. Joint Fire Science Program, Boise, Idaho. JFSP 09-S-03-1 Final Report. 39 p.

Alexander, M.E., Cruz, M.G., 2011. Crown fire dynamics in conifer forests. In 'Synthesis of Knowledge of Extreme Fire Behavior: Volume 1 for Fire Managers'. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, General Technical Report PNW-GTR-854, pp. 107–142. (Portland, OR).

Andrews, P.L., Bevins, C.D., Seli, R.C., 2005. BehavePlus fire modeling system, Version 4.0: User's Guide. General Technical Report RMRS-GTR-106WWW revised. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 132 p.

Αθανασίου, Μ., Ξανθόπουλος, Γ., 2009. Η συμπεριφορά των μεγάλων δασικών πυρκαγιών του 2007 στην Ελλάδα. Σελ. 591-602. Στα πρακτικά του 14ου Πανελλήνιου Δασολογικού Συνεδρίου, 1-4 Νοεμβρίου 2009, Πάτρα. Ελληνική Δασολογική Εταιρεία, Θεσσαλονίκη. 1101 σελ.

Athanasίου, Μ., Xanthopoulos, G., 2010. Fire behaviour of the large fires of 2007 in Greece. In proceedings of the 6th International Conference on Forest Fire Research, November 15-18, 2010, Coimbra, Portugal. D.G. Viegas, Editor. ADAI/CEIF, University of Coimbra, Portugal. Abstract p. 336, full text on CD.

Αθανασίου, Μ., Ξανθόπουλος, Γ., 2013. Παρατηρήσεις μετάδοσης δασικών πυρκαγιών με καύτρες στην Ελλάδα Σελ. 30-40. Στα πρακτικά του 16ου Πανελλήνιου Δασολογικού Συνεδρίου, 6-9 Οκτωβρίου 2013, Θεσσαλονίκη. Ελληνική Δασολογική Εταιρεία, Θεσσαλονίκη. 1144 σελ.

Athanasίου, Μ., Xanthopoulos, G., 2014. Wildfires in Mediterranean shrubs and grasslands, in Greece: In situ fire behaviour observations versus predictions. In proceedings of the 7th International Conference on Forest Fire Research: Advances in Forest Fire Research, 17-20 November 2014, Coimbra, Portugal. D. G. Viegas, Editor. ADAI/CEIF, University of Coimbra, Portugal. Abstract p. 488, full text on CD.

Αθανασίου, Μ., Ξανθόπουλος, Γ., 2015. Δασικές πυρκαγιές σε Μεσογειακούς θαμνώνες, φρύγανα και χορτολίβαδα στην Ελλάδα: Σύγκριση της παρατηρηθείσας συμπεριφοράς πυρκαγιάς με τις προβλέψεις του BehavePlus. Σελ. 175-183. Στα πρακτικά του 17ου Πανελλήνιου Δασολογικού Συνεδρίου, 4-7 Οκτωβρίου 2015, Αργοστόλι, Κεφαλονιά. Ελληνική Δασολογική Εταιρεία & Φορέας Διαχείρισης Εθνικού Δρυμού Αίνου. 979 σελ.

Αθανασίου, Μ., 2015. Συμβολή στην επιλογή της καλύτερης μεθόδου πρόβλεψης της συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών για την Ελλάδα. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Σελ. 408.

Athanasίου, Μ., 2018. Greece: Fire Behavior and Outreach – A Scholar's Story. *Wildfire*, April 2018 – Vol. 27.2: 32-37.

Athanasίου, Μ., Xanthopoulos, G., 2018. Observations on wildfire spotting occurrence and characteristics in Greece. In proceedings of the 8th International Conference on Forest Fire Research: Advances in Forest Fire Research, 9-16 November 2018, Coimbra, Portugal. D. G. Viegas, Editor. ADAI/CEIF, University of Coimbra, Portugal. Abstract p. 113, full text on CD (p. 588-597), https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_65.

Απατσίδης, Α.Δ., Ζιάγκας, Ε.Χ., Περρής, Ι.Γ., Σωτηρόπουλος, Δ.Σ., Τζιοβάρας, Ε.Ζ., 1999. Πρότυπο εκτίμησης στατικών και δυναμικών στοιχείων δασοσυστάδων Χαλεπίου πεύκης. *Δασική Έρευνα* 12: σελ. 22-33.

Απατσίδης, Α.Δ., Τζιοβάρας, Ε.Ζ., 2000. Σχέση μεταξύ στηθιαίας διαμέτρου και διαμέτρου κόμης δένδρων δασοσυστάδων Χαλεπίου πεύκης. *Δασική Έρευνα* 13: σελ. 3-10.

Brown, J.K., Reinhardt, E.D., 1991. Predicting and managing fuel consumption in the Interior West. In: Andrews, P. L.; Potts, D. L., eds. Proceedings of the 11th Conference on Fire and Forest Meteorology; 1991 April 16-19; Missoula, MT. Proc. Bethesda, MD: Society of American Foresters Publication 91-04: 419-429.

Brown, J.K., Bradshaw, L.S., 1994. Comparisons of particulate emissions and smoke impacts from presettlement, full suppression and Prescribed Natural Fire periods in the Selway-Bitterroot Wilderness. *International Journal of Wildland Fire* 4(3): 143-155.

Butler, B.W., Reynolds, T. D., 1997. Wildfire case study: Butte City Fire, southeastern Idaho, July 1, 1994. Gen. Tech. Rep. INT-GTR-351. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Research Station. 15 p.

- Byram, G.M., 1959. Combustion of forest fuels; Forest fire behavior. in Davis, K.P., ed. Forest fire: Control and use. New York: McGraw-Hill: 61-89, 90-123.
- Call, P., Albini, F.A., 1997. Aerial and surface consumption in crown fires. *International Journal of Wildland Fire* 7(3): 259-264.
- Cruz, M.G., 1999. Modeling the initiation and spread of crown fires. Master of Science thesis. University of Montana, Missoula. 162p.
- Cruz, M.G., Alexander, M. E., Wakimoto, R.H., 2002. Predicting crown fire behavior to support forest fire management decision-making. *Forest Fire Research and Wildland Fire Safety*, Viegas (ed.). Millpress, Rotterdam, ISBN 90-77017-72-0.
- Cruz, M.G., Alexander, M.E., Wakimoto, R.H., 2003. Definition of a fire behavior model evaluation protocol: a case study application to crown fire behavior models. In *Fire, Fuel Treatments, and Ecological Restoration: Conference Proceedings*, 16-18 April 2002, Fort Collins, Colo. Technically edited by P.N. Omi and L.A. Joyce. USDA For. Serv. Proc. RMRS-P-29. pp. 49-67.
- Cruz, M.G., Alexander, M.E., Wakimoto, R.H., 2004. Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands. *Forest Science* 50: 640-658.
- Cruz, M.G., Alexander, M.E., Wakimoto, R.H., 2005. Development and testing of models for predicting crown fire rate of spread in conifer forest stands. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 1926-1939.
- Dimitrakopoulos, A. P., 2002. Mediterranean fuel models and potential fire behaviour in Greece, *International Journal of Wildland Fire* 11(2) 127 – 130.
- Dimitrakopoulos, A. P., Mitsopoulos, I. D., Raptis, D. I., 2007. Nomographs for predicting crown fire initiation in Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) forests. *European Journal of Forest Research* 126(4):555-561.
- Grishin, A.M., 1997. Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them. Albini, F., ed. Translated by Czuma, M.; Chikina, L.; Smokotina, L. Tomsk, Russia: Tomsk State University. 390 p.
- Keane, R.E., Garner, J.L., Schmidt, K.M., Long, D.G., Menakis, J.P., Finney, M.A., 1998. Development of Input Data Layers for the FARSITE Fire Growth Model for the Selway- Bitterroot Wilderness Complex, USA , Ogden, Utah (General Technical Report, Ogden, Utah), pp. 66.
- Μητσόπουλος, Ι., 2005. Ανάλυση και διαχείριση πυρκαγιών κόμης σε δάση Χαλεπίου πεύκης. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ. 207.
- Μητσόπουλος, Ι.Δ., Δημητρακόπουλος, Α.Π., 2007. Διάκριση δένδρων Χαλεπίου πεύκης σύμφωνα με το διαθέσιμο φορτίο της εναέριας καύσιμης ύλης. Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα ΓΕΩΤΕΕ. Σειρά II, Τόμος 18(2): σελ. 16-24.
- Mitsopoulos I.D. and Dimitrakopoulos, A.P., 2007a. Allometric equations for crown fuel biomass of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) in Greece. *International Journal of Wildland Fire* 16:642–647.
- Mitsopoulos I.D. and Dimitrakopoulos, A.P., 2007b. Canopy fuel characteristics and potential crown fire behavior in Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) forests. *Ann. For. Sci.* 64:287–299.
- Mitsopoulos, I., Trapatsas, P., Xanthopoulos, G., 2016. SYPYDA: A software tool for fire management in Mediterranean pine forests of Greece. *Computers and Electronics in Agriculture*. 121:195–199.
- Perminov, V., 2007. Mathematical modeling of forest fire initiation in three dimensional setting. In: Butler, Bret W.; Cook, Wayne, comps. *The fire environment--innovations, management, and policy; conference proceedings*. 26-30 March 2007; Destin, FL. Proceedings RMRS-P-46CD. Fort Collins, CO: USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. CD-ROM. p. 241-248.
- Reinhardt, E., Keane, R.E., Brown., J.K., 1997. First Order Fire Effects Model: FOFEM 4.0, user's guide. USDA Forest Service, Intermountain Research Station, General Technical Report INT-GTR-344. (Ogden, UT).
- Rothermel, R.C. 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. Gen. Tech. Rep. INT-143. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 161 p.
- Rothermel, R.C., 1991a. Predicting behaviour and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains. Res. Pap. INT-438. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Research Station.

Rothermel, R.C., 1991b. Crown fire analysis and interpretation, pp.253-263. In: Andrews P.I., Potts D.F., (eds.), Proceedings of the 11th Conference on Fire and Forest Meteorology. Society of American Foresters, Missoula, Montana, USA.

Scott, J.H., Reinhardt., E.D., 2001. Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behavior. Res. Pap. RMRS-RP-29. Fort Collins, CO: USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 59 p.

Stocks, B.J., Alexander, M.E., Wotton, B.M., Stefner, C.N., Flannigan, M.D., Taylor, S.W., Lavoie, N., Mason, J.A., Hartley, G.R., Maffey, M.E., Dalrymple, G.N., Blake, T.W., Cruz, M.G., Lanoville, R.A., 2004b. Crown fire behaviour in a northern jack pine – black spruce forest. Can. J. For. Res. 34: 1548-1560.

Van Wagner, C.E., 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. Canadian Journal of Forest Research. 7: 23–34.

Van Wagner, C.E., 1989. Prediction of crown fire behaviour in conifer stands. In: MacIver, D.C, H. Auld, and R. Whitewood eds., proc. 10th conf. on fire and forest meteorology. Ottawa, Canada

Van Wagner, C.E., 1993. Prediction of crown fire behavior in two stands of jack pine. Can. J. For. Res. 23:442-449.

Van Wagner, C.E. 1998. Modeling logic and the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Forest Chronicle 74 (1): 50-52.

Werth, P.A., Potter, B.E., Alexander, M.E., Clements, C.B., Cruz, M.G., Finney, M.A., Forthofer, J.M., Goodrick, S.L., Hoffman, C.M., Jolly, W.M., McAllister, S.S., Ottmar, R.D., Parsons, R.A., 2013. Synthesis of knowledge of extreme fire behavior: Volume 2 for fire behavior specialists, researchers and meteorologists. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon. General Technical Report PNW-GTR-In press.

Xanthopoulos, G., 1990. Development of a wildland crown fire initiation model. Ph.D. Dissertation. Univ. of Montana, MT, USA. 152 p.