

## ΔΑΣΙΚΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΕ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟΥΣ ΘΑΜΝΩΝΕΣ, ΦΡΥΓΑΝΑ ΚΑΙ ΧΟΡΤΟΛΙΒΑΔΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΘΕΙΣΑΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΜΕ ΤΙΣ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΤΟΥ BEHAVEPLUS

Αθανασίου Μιλτιάδης<sup>1</sup>, Ξανθόπουλος Γαβριήλ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Γραφείο Περιβαλλοντικών Μελετών – “Μ. Αθανασίου”  
Θωμά Παλαιολόγου 8, 13673 Αχαρνές, e-mail: [info@m-athanasiou.gr](mailto:info@m-athanasiou.gr)

<sup>2</sup> Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός «ΔΗΜΗΤΡΑ»  
Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων  
Τέρμα Αλκμάνος, Ιλίσια, 115 28 Αθήνα, e-mail: [gxnrta@fria.gr](mailto:gxnrta@fria.gr)

### Περίληψη

Η παρούσα εργασία αφορά στην αξιολόγηση 95 μετρήσεων του πραγματικού ρυθμού εξάπλωσης ( $ROS_{observed}$ ) και 70 μετρήσεων του μήκους φλόγας, πυρκαγιών επιφανείας σε χαμηλούς και υψηλούς θαμνώνες (μακί), φρυγανότοπους αστοιβίδας (*Sarcopoterium spinosum*) και χαμηλά χόρτα, για σύγκριση με τις αντίστοιχες προβλέψεις συμπεριφοράς πυρκαγιάς του συστήματος BehavePlus.

Οι τέσσερις δασικοί τύποι περιγράφηκαν από τέσσερα αντίστοιχα Ελληνικά Μοντέλα Καύσιμης Ύλης και προέκυψαν τέσσερις στατιστικά σημαντικές εξισώσεις, που συνδέουν την προβλεπόμενη με την παρατηρηθείσα συμπεριφορά της πυρκαγιάς και που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσαρμογή των προβλέψεων του BehavePlus. Ειδικότερα για τα υψηλά μακί, οι προβλέψεις του BehavePlus ήταν πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές  $ROS_{observed}$  οπότε δεν κρίνεται απαραίτητη η προσαρμογή τους. Αντίθετα, οι προβλέψεις του BehavePlus για τα χαμηλά χόρτα ήταν κατά 50% περίπου χαμηλότερες από τις πραγματικές οπότε εκεί απαιτείται η εφαρμογή της εξίσωσης για την προσαρμογή των προβλέψεων στις αναμενόμενες πραγματικές τιμές του ρυθμού εξάπλωσης των πυρκαγιών. Από την ανάλυση επίσης φαίνεται ότι οι εξισώσεις για τα χαμηλά μακί και την αστοιβίδα πρέπει να χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή των προβλέψεων του BehavePlus στις αναμενόμενες χαμηλότερες πραγματικές τιμές, όμως εκφράζονται και κάποιες επιφυλάξεις.

Όσον αφορά τις προβλέψεις του μήκους φλόγας από το BehavePlus, και για τους τέσσερις τύπους καύσιμης ύλης παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις από τις παρατηρηθείσες τιμές. Ειδικά για τους φρυγανότοπους αστοιβίδας το BehavePlus υποεκτίμησε συστηματικά και σημαντικά το μήκος φλόγας στην περιοχή τιμών γύρω από την τιμή κατωφλίου των 1,2 μέτρων, που είναι το όριο για άμεση προσβολή της φλόγας με χειρωνακτικά εργαλεία. Το εύρημα αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την ασφάλεια των δασοπροσβεστών και πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπ' όψιν.

*Λέξεις κλειδιά:* Πρόβλεψη συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών, Μεσογειακοί θαμνώνες, φρύγανα, χορτολίβαδα, BehavePlus

### Εισαγωγή

Η αξιόπιστη πρόβλεψη της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών είναι προϋπόθεση για την οργάνωση της πρόληψης και την αποτελεσματική και ασφαλή καταστολή τους (Ξανθόπουλος 1990, Αθανασίου & Ξανθόπουλος 2009). Τα συστήματα πρόβλεψης της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών, μπορούν να υποστηρίξουν τη λήψη αποφάσεων, παρέχοντας εκτιμήσεις για τιμές των παραμέτρων της συμπεριφοράς που χρειάζονται οι χρήστες. Προϋπόθεση όμως γι' αυτό είναι ότι οι τελευταίοι έχουν την απαιτούμενη βασική

θεωρητική γνώση και επιχειρησιακή εμπειρία για να κατανοήσουν και ερμηνεύσουν αυτές τις προβλέψεις και έχουν επαρκή δεδομένα όσον αφορά την αξιοπιστία τους (Αθανασίου 2015).

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μοντέλων πρόβλεψης, δεν τυγχάνει μεγάλης προσοχής στη βιβλιογραφία της επιστήμης των δασικών πυρκαγιών (Cruz et al. 2003a, Gould et al 2011) διεθνώς. Συχνά, η καταλληλότητα των μοντέλων (Albini 1976a) και η συμβατότητά τους σε σχέση με τον σκοπό για τον οποίον προορίζονται (McKinion and Baker 1982, Mayer and Butler 1993) δεν εξετάζονται. Επίσης, η αξιοπιστία των προβλέψεων τους δεν ελέγχεται μέσω σύγκρισής τους με την συμπεριφορά πραγματικών δασικών πυρκαγιών (Rothermel and Reinhardt 1983), παρόλο που συνιστά πολύ σημαντική πλευρά της διαδικασίας ανάπτυξής τους (Cruz et al. 2003, Gould et al. 2011). Κύριοι λόγοι της αδυναμίας ελέγχου, είναι είτε η έλλειψη των κατάλληλων δεδομένων είτε η αμφίβολη ποιότητά τους (Albini 1976).

Η γνώση του βαθμού αξιοπιστίας των μοντέλων πρόβλεψης της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών, είναι προϋπόθεση για την πρακτική τους εφαρμογή και την επιχειρησιακή τους αξιοποίηση. Ο ουσιαστικός έλεγχος μπορεί να γίνει μόνο εφόσον υπάρχουν μετρήσεις συμπεριφοράς πραγματικών δασικών πυρκαγιών (Αθανασίου και Ξανθόπουλος 2009). Με δεδομένο ότι η εμφάνιση των δασικών πυρκαγιών είναι απροσδόκητη και η παρακολούθησή τους υπόκειται σε πολλούς περιορισμούς (έγκαιρης παρουσίας στο χώρο, προσβασιμότητας, ευνοϊκής θέσης παρατήρησης, ασφάλειας, κλπ.) η εξασφάλιση τέτοιων μετρήσεων απαιτεί την αφιέρωση άφθονου χρόνου και κόπου αλλά και συνεπάγεται αρκετό κόστος (Albini et al. 2012, Αθανασίου 2015). Κατ' ανάγκη, η παρακολούθηση και η υψηλής ποιότητας τεκμηρίωση της πραγματικής συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών, δεν διεξάγονται στα πλαίσια μιας μακρόχρονης, ενορχηστρωμένης και συστηματικής προσπάθειας (Alexander and Thomas 2003a,b) αλλά ευκαιριακά και με αργό ρυθμό. Για τη διασφάλιση υψηλής ποιότητας μετρήσεων και την μείωση των σφαλμάτων σε αποδεκτά επίπεδα (Alexander and Cruz 2013), απαιτείται η πιστή και συνεπής τήρηση συγκεκριμένων τεχνικών και διαδικασιών (Rothermel 1983, Norum and Miller 1984, Lawson and Armitage 2008).

Στην Ελλάδα, η συστηματική μελέτη της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών απουσιάζει και δεν υπάρχει τεκμηριωμένη μεθοδολογία πρόβλεψης των χαρακτηριστικών του φαινομένου. Κατά τις αποσπασματικές προσπάθειες μελέτης της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών, χρησιμοποιούνται υφιστάμενα μοντέλα ή συστήματα πρόβλεψης χωρίς την αναγκαία αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους (Αθανασίου 2015). Η πρώτη προσπάθεια ελέγχου της αξιοπιστίας των προβλέψεων του BehavePlus (Andrews et al. 2005) για τους υψηλούς θαμνώνες (υψηλά μακί) μέσω της σύγκρισής τους με την αντίστοιχη πραγματική συμπεριφορά της φωτιάς, έλαβε χώρα μετά την αντιτυρική περίοδο του 2007 (Αθανασίου & Ξανθόπουλος 2009, Athanasiou and Xanthopoulos 2010) αξιοποιώντας το Μοντέλο Καύσιμης Ύλης (M.K.Y.) “ II Θαμνώνες Αείφυλλων Πλατύφυλλων (Ύψος 1,5 – 3,0 m)”, των Dimitrakopoulos et al (2001) και Dimitrakopoulos (2002). Τα αρχικά αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά και η συλλογή επιπλέον παρατηρήσεων πραγματικής συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών στο πεδίο κατά τις επόμενες αντιτυρικές περιόδους, επέτρεψε αφ' ενός την επέκταση του ελέγχου γι' αυτόν το δασικό τύπο σε ευρύτερο φάσμα μετεωρολογικών συνθηκών και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών και αφ' ετέρου τον ανάλογο έλεγχο για τρεις ακόμη δασικούς τύπους: α) τα χαμηλά μακί, β) τα φρύγανα και γ) τα Μεσογειακά χορτολίβαδα που περιγράφηκαν αξιοποιώντας τρία M.K.Y. των ίδιων συγγραφέων, τα “I Θαμνώνες Αείφυλλων Πλατύφυλλων (Ύψος έως 1,5 m)”, “V Φρύγανα II (Αστοιβίδα)” και “VI Μεσογειακά χορτολίβαδα”, αντίστοιχα.

Η παρούσα εργασία αποτελεί τμήμα της διδακτορικής διατριβής του πρώτου συγγραφέα και στόχος της είναι ο έλεγχος της αξιοπιστίας των προβλέψεων του BehavePlus για την Ελλάδα, με δεδομένα εισόδου τα M.K.Y. I, II, V και VI (Πίνακας 1) και η εισαγωγή πιθανά αναγκαίων προσαρμογών που θα συμβάλλουν στην υιοθέτηση της χρήσης του και θα επιτρέψουν την επιχειρησιακή αξιοποίησή του, κατά τη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών (Athanasiou and Xanthopoulos 2014).

Πίνακας 1. Οι τιμές των παραμέτρων των τεσσάρων Μ.Κ.Υ. που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου για την πρόβλεψη του ρυθμού εξάπλωσης ( $ROS_{predicted}$ ) και του μήκους φλόγας ( $FL_{predicted}$ ) της πυρκαγιάς επιφανείας, με το BehavePlus.

Table 1. The values of the parameters of the four fuel models that were used as inputs for predicting surface fire rate of spread ( $ROS_{predicted}$ ) and flame length ( $FL_{predicted}$ ) with BehavePlus.

M.K.Y.	I	II	V	VI
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ				
1 HR (MTON/HA)	9.91	17.88	3.50	4.82
10 HR (MTON/HA)	6.80	13.30	1.02	0.49
100 HR (MTON/HA)	3.60	8.5	0.28	0
LIVE HERB (MTON/HA)	0	0	0	0
LIVE WOODY (MTON/HA)	7.70	10.60	0.85	0
1 HR S/V (1/CM)	55	55	65	78
LIVE HERB S/V (1/CM)	-	-	-	-
LIVE WOODY S/V (1/CM)	55	55	65	-
FUEL BED DEPTH (CM)	102.19	203.58	40.00	27.53
EXT MOISTURE (%)	34	34	20	14
HEAT CONTENT (J/G)	20000	20000	19054	18600

## Υλικά και μέθοδοι

Κατά τις οκτώ τελευταίες αντιπυρικές περιόδους (2007 έως και 2014), καταγράφηκαν και μετρήθηκαν ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά σειράς δασικών πυρκαγιών σε διάφορα μέρη της Ελλάδας. Ταυτόχρονα τεκμηριώθηκαν οι μετεωρολογικές συνθήκες, η καιγόμενη βλάστηση και το γεωμορφολογικό ανάγλυφο των περιοχών όπου οι δασικές πυρκαγιές εξαπλώνονταν, εφαρμόζοντας την μεθοδολογία των Αθανασίου & Ξανθόπουλος (2009), Athanasiou and Xanthopoulos (2010), Αθανασίου & Ξανθόπουλος (2013), Athanasiou and Xanthopoulos (2014) και Αθανασίου (2015). Ως προς τη συμπεριφορά των πυρκαγιών βασικό μέλημα ήταν η τεκμηρίωση και μέτρηση του ρυθμού εξάπλωσης ( $ROS_{observed}$ ) και του μήκους φλόγας ( $FL_{observed}$ ) των πυρκαγιών επιφανείας, με βάση τις μεθόδους των Alexander and Thomas (2003b), Clements et al. (1983) και Athanasiou and Xanthopoulos (2014).

Από τη βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε, για τη διασφάλιση της ποιότητας της ανάλυσης και της συμβατότητας κατά τη σύγκριση των δύο αυτών ποσοτικών χαρακτηριστικών της πραγματικής συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών με τις προβλέψεις του BehavePlus, εξαιρέθηκαν οι περιπτώσεις ενεργών πυρκαγιών κόμης (Van Wagner 1977) και οι περιπτώσεις πυρκαγιών επιφανείας ή παθητικών πυρκαγιών κόμης των οποίων η συμπεριφορά και η εξάπλωση τεκμηριώθηκε ότι είχε επηρεαστεί από: α) το φαινόμενο της κηλίδωσης, β) ισχυρή κατακόρυφη επαγωγική στήλη ή γ) παράγοντες που προκάλεσαν την εκδήλωση εκρηκτικής και ακραίας συμπεριφοράς τους (π.χ. το φαινόμενο της καμινάδας σε κλειστό φαράγγι). Οι παθητικές πυρκαγιές κόμης συμπεριλήφθησαν στην ανάλυση διότι ο ρυθμός εξάπλωσής τους καθορίζεται από την ταχύτητα διάδοσης της φωτιάς στον υπόροφο (Van Wagner 1977). Οι περιπτώσεις που εξαιρέθηκαν της ανάλυσης, διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: α) πυρκαγιές που επηρεάστηκαν από παράγοντες που δεν μπορούν να εξηγηθούν και να περιγραφούν από τους συμβατικούς φυσικούς νόμους της εξάπλωσης της φωτιάς οπότε η συμπεριφορά τους δεν είναι συγκρίσιμη με τις προβλέψεις του BehavePlus και β) πυρκαγιές που εξαπλώθηκαν σε συμπλέγματα δασικών τύπων τα οποία δεν μπορούν να περιγραφούν από κάποιο εκ των επτά Μ.Κ.Υ., των Δημητρακόπουλος κ.α. (2001) και Dimitrakopoulos (2002) για την Ελλάδα (Athanasiou and Xanthopoulos, 2014).

Σχετικά με το μήκος φλόγας, εξασφαλίστηκε ότι η πραγματική τιμή του ήταν συγκρίσιμη με την πρόβλεψη του BehavePlus (Αθανασίου 2015). Για τις περιπτώσεις παθητικών πυρκαγιών κόμης τεκμηριώθηκε ότι η φλόγα που είχε καταγραφεί προερχόταν από τα επιφανειακά καύσιμα και όχι από το επεισοδιακό λαμπάδιασμα της κόμης κάποιου δέντρου οπότε η συμπεριφορά που αναλύθηκε, ήταν συμπεριφορά πυρκαγιάς επιφανείας. Επιβεβαιώθηκε επίσης, για το σύνολο των περιπτώσεων, ότι η φλόγα που είχε καταγραφεί προερχόταν από δασικό τύπο ο οποίος μπορούσε να περιγραφεί από το M.K.Y. που χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένο εισόδου στο BehavePlus για την πρόβλεψη του μήκους της φλόγας.

Οι 95 μετρήσεις του ρυθμού εξάπλωσης πυρκαγιών επιφανείας ( $ROS_{observed}$ ) και 70 μετρήσεις του μήκους φλόγας ( $FL_{observed}$ ), που τελικά περιελήφθηκαν στην ανάλυση, ταξινομήθηκαν με βάση το M.K.Y. που περιγράφει τον δασικό τύπο στον οποίο είχε εξαπλωθεί η κάθε πυρκαγιά. Έτσι δημιουργήθηκαν οκτώ υποσύνολα δεδομένων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Με τη χρήση του εργαλείου NEWMDL, της αρχικής έκδοσης του συστήματος BEHAVE (Burgan and Rothermel 1984), υπολογίστηκαν ορισμένες τιμές οι οποίες απαιτούνταν για τους υπολογισμούς αλλά δεν αναφέρονταν στα δημοσιευμένα μοντέλα. Υπολογίστηκε το συνολικό βάρος της κατηγορίας των νεκρών λεπτών καυσίμων “1h” των MKY, προσθέτοντας το βάρος του “litter” στο υπόλοιπο βάρος των καυσίμων της “1hr”, στη συνέχεια υπολογίστηκε ένα σταθμισμένο “fuel bed depth” και εκτιμήθηκε το “dead fuel moisture of extinction” για κάθε M.K.Y., από το NEWMDL. Οι τιμές που προέκυψαν περιλαμβάνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 2. Αριθμός μετρήσεων  $ROS_{observed}$  και  $FL_{observed}$  ανά δασικό τύπο που συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες προβλέψεις  $ROS_{predicted}$  και  $FL_{predicted}$  του BehavePlus.

Table 2.  $ROS_{observed}$  and  $FL_{observed}$  observations per fuel type that were compared with the corresponding BehavePlus predictions ( $ROS_{predicted}$  and  $FL_{predicted}$  values).

Δασικός τύπος	M.K.Y.	$ROS_{observed}$	$FL_{observed}$
Χαμηλά μακί	I	13	17
Υψηλά μακί	II	38	11
Αστοιβίδα	V	26	26
Χόρτα	VI	18	16

Η περιεχόμενη υγρασία στα λεπτά (1h) νεκρά δασικά καύσιμα (FDFMC), υπολογίστηκε με βάση την μεθοδολογία του Rothermel (1983), χρησιμοποιώντας: α) τις μετρήσεις της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα, β) τον μήνα και την ώρα της μέτρησης, γ) την υψομετρική διαφορά ανάμεσα στην περιοχή εξάπλωσης της πυρκαγιάς και τη θέση λήψης των μετεωρολογικών μετρήσεων, δ) την μορφολογική κλίση και τον προσανατολισμό της περιοχής εξάπλωσης της πυρκαγιάς και ε) το ποσοστό κάλυψης και σκίασης των επιφανειακών καυσίμων.

Η τιμή της περιεχόμενης υγρασίας των νεκρών δασικών καυσίμων των 10h θεωρήθηκε ίση με την τιμή της περιεχόμενης υγρασίας των νεκρών δασικών καυσίμων της 1h (Andrews et al., 2005), που είναι μια αποδεκτή παραδοχή η οποία εφαρμόζεται συχνά. Οι τιμές της περιεχόμενης υγρασίας των νεκρών δασικών καυσίμων των 100h και των ζωντανών ξυλωδών καυσίμων (Live Woody) ορίστηκαν σύμφωνα με μετρήσεις οι οποίες είχαν διεξαχθεί ανεξάρτητα κατά την ίδια χρονική περίοδο.

### Αποτελέσματα

Τα ζεύγη τιμών του πραγματικού ρυθμού εξάπλωσης ( $ROS_{observed}$ ) και της αντίστοιχης πρόβλεψης του BehavePlus ( $ROS_{predicted}$ ), συσχετίστηκαν μέσω γραμμικής παλινδρόμησης, χρησιμοποιώντας το λογισμικό SPSS

(v. 10.0) για κάθε δασικό τύπο. Προέκυψαν οι παρακάτω γραμμικές εξισώσεις που είναι στατιστικά σημαντικές (p-value <0.001) (Athanasίου and Xanthopoulos 2014):

$$ROS_{\text{observed}} = 0.165 + 0.886 * ROS_{\text{predicted}}, \quad \text{adjusted } R^2 = 0.806, \text{ (Υψηλά μακί)} \quad (1)$$

$$ROS_{\text{observed}} = 0.127 + 0.709 * ROS_{\text{predicted}}, \quad \text{adjusted } R^2 = 0.873, \text{ (Χαμηλά μακί)} \quad (2)$$

$$ROS_{\text{observed}} = 0.101 + 0.783 * ROS_{\text{predicted}}, \quad \text{adjusted } R^2 = 0.681, \text{ (Αστοιβίδα)} \quad (3)$$

$$ROS_{\text{observed}} = -0.023 + 1.562 * ROS_{\text{predicted}}, \quad \text{adjusted } R^2 = 0.847, \text{ (Χόρτα)} \quad (4)$$

Οι συντελεστές που ορίζουν τις κλίσεις των τεσσάρων ευθειών είναι στατιστικά σημαντικοί (p-value <0,001). Οι σταθερές των εξισώσεων (1), (3) και (4) δεν είναι στατιστικά σημαντικές (p-value<sub>1</sub>=0.052, p-value<sub>3</sub>=0.266 and p-value<sub>4</sub>=0.950, αντίστοιχα) δηλαδή δεν είναι στατιστικά διαφορετικές του μηδενός ενώ η σταθερά της εξίσωσης (2) είναι στατιστικά σημαντική (p-value<sub>2</sub>=0.046). Οι εξισώσεις (1), (2) και (4) παρουσιάζουν υψηλούς διορθωμένους συντελεστές συσχέτισης ( $R^2_{\text{adjusted}}$ ) ενώ αντίθετα η εξίσωση (3) έχει σχετικά χαμηλό  $R^2_{\text{adjusted}}$ , το οποίο σημαίνει ότι η εξίσωση εξηγεί σχετικά μικρότερο ποσοστό (68%) της διακύμανσης των πραγματικών τιμών του ρυθμού εξάπλωσης της πυρκαγιάς, στο πολύ εύφλεκτο φρυγανικό είδος *Sarcopoterium spinosum*. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στο ότι το M.K.Y. V χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει καύσιμη ύλη αξιοσημείωτης ετερογένειας, δηλαδή περιοχές όπου, αν και κυριαρχούσε η αστοιβίδα, υπήρχαν σε μίξη κι άλλα φρυγανικά είδη όπως λαδανιές (*Cistus spp.*) και σε ορισμένες περιπτώσεις ασφάκα (*Flomis fruticosa*).

Στη συνέχεια, οι τιμές του  $FL_{\text{observed}}$  συγκρίθηκαν με τις προβλέψεις ( $FL_{\text{predicted}}$ ) του BehavePlus. Από τις συσχετίσεις των  $FL_{\text{observed}}$  και  $FL_{\text{predicted}}$  μέσω γραμμικής παλινδρόμησης για τα χαμηλά μακί, τα υψηλά μακί, την αστοιβίδα και τα χόρτα και τις αντίστοιχες τιμές του διορθωμένου συντελεστή συσχέτισης των εξισώσεων, προέκυψε ότι η διακύμανση των πραγματικών τιμών του μήκους φλόγας, εξηγείται κατά μόλις 42%, 57%, 38% και 14%, αντίστοιχα (Αθανασίου, 2015). Το πλέον σημαντικό αποτέλεσμα της ανάλυσης των τιμών του μήκους φλόγας για τους τέσσερις δασικούς τύπους, ήταν ότι για τις 26 περιπτώσεις πυρκαγιών επιφανείας σε φρυγανότοπους, οι πραγματικές τιμές του μήκους φλόγας ( $FL_{\text{observed}}$ ) ήταν κατά 2,3 φορές υψηλότερες από τις τιμές των προβλέψεων ( $FL_{\text{predicted}}$ ) που υπολογίστηκαν για το M.K.Y. V, με το BehavePlus. Ο λόγος  $FL_{\text{observed}}$  προς  $FL_{\text{predicted}}$  κυμάνθηκε ανάμεσα στο 0,3 και το 5,0 με τυπική απόκλιση 1,2 και μόνο σε δύο περιπτώσεις οι τιμές  $FL_{\text{observed}}$  ήταν χαμηλότερες από τις τιμές  $FL_{\text{predicted}}$  (Athanasίου and Xanthopoulos 2014).

### Συζήτηση – Συμπεράσματα

Τα ζεύγη των τιμών του  $ROS_{\text{observed}}$  και του  $ROS_{\text{predicted}}$ , συσχετίστηκαν μέσω γραμμικής παλινδρόμησης για τους τέσσερις δασικούς τύπους και προέκυψαν τέσσερις στατιστικά σημαντικές (p<0.001) εξισώσεις με ικανοποιητικές τιμές διορθωμένων συντελεστών συσχέτισης ( $R^2_{\text{adjusted}}$ ). Οι συντελεστές που ορίζουν τις κλίσεις των τεσσάρων ευθειών είναι στατιστικά σημαντικοί (p-value<0,001) αλλά, εκτός της σταθεράς της εξίσωσης για τα χαμηλά μακί, οι σταθερές των εξισώσεων για τα υψηλά μακί, την αστοιβίδα (*Sarcopoterium spinosum*) και τα χόρτα δεν είναι στατιστικά σημαντικές, δηλαδή δεν είναι σημαντικά διαφορετικές από το μηδέν. Το ανεξήγητο σφάλμα των εξισώσεων για τα χαμηλά μακί, τα υψηλά μακί και τα χόρτα ήταν χαμηλό αλλά ήταν υψηλότερο για την αστοιβίδα (*Sarcopoterium spinosum*). Το υψηλότερο ανεξήγητο σφάλμα της εξίσωσης (3), για το πολύ εύφλεκτο αυτό φρυγανικό είδος, μπορεί να εξηγηθεί από το ότι το M.K.Y. V χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει φρυγανότοπους αξιοσημείωτης ετερογένειας.

Στον Πίνακα 3, παρουσιάζονται τιμές  $ROS_{observed}$  που προκύπτουν από την επίλυση των εξισώσεων (1), (2), (3) και (4), για ένα εύρος πιθανών τιμών  $ROS_{predicted}$ . Ο βαθμός συμφωνίας των προβλέψεων με την αναμενόμενη πραγματική συμπεριφορά είναι μεγάλος και δείχνει ικανοποιητική ακρίβεια, για πιθανή επιχειρησιακή εφαρμογή. Φαίνεται ότι η συμφωνία για το M.K.Y. II που περιγράφει τα υψηλά μακί είναι πολύ καλή (Athanasίου and Xanthopoulos, 2010, 2014) οπότε η χρήση της εξίσωσης (1) δεν φαίνεται να είναι αναγκαία για την προσαρμογή των προβλέψεων του BehavePlus ( $ROS_{predicted}$ ), στις πραγματικές τιμές  $ROS_{observed}$  οι οποίες αναμένονται να είναι λίγο χαμηλότερες. Η συμφωνία για τα μοντέλα M.K.Y. I και V είναι σχετικά καλή αν και οι προβλέψεις του BehavePlus είναι υψηλότερες από τις πραγματικές τιμές του ROS. Εξ' αιτίας της υπερεκτίμησης αυτής, προτείνεται οι προβλέψεις για αυτά τα δύο M.K.Y., να προσαρμόζονται, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (2) and (3), αντίστοιχα. Ειδικότερα για την εξίσωση (2), επειδή ο αριθμός των παρατηρήσεων που αναλύθηκαν για το δασικό τύπο των χαμηλών μακί, ήταν αρκετά μικρός (N=13) η χρήση της προτείνεται με επιφύλαξη. Οποσδήποτε απαιτείται η εξασφάλιση και ανάλυση περισσότερων μετρήσεων στο μέλλον για επιβεβαίωσή της. Στην περίπτωση των χορτολίβαδων, το BehavePlus υποεκτιμά σοβαρά τις τιμές του ROS. Η στατιστικά σημαντική η εξίσωση (4) που έχει υψηλή τιμή διορθωμένου συντελεστή συσχέτισης ( $R^2_{adjusted} = 0.847$ ) οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η υποεκτίμηση θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν όταν το ελληνικό M.K.Y. VI χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη του ROS σε χορτολίβαδα από το BehavePlus. Η εξίσωση (4) θα πρέπει να χρησιμοποιείται για την απόκτηση των προσαρμοσμένων τιμών των προβλέψεων του BehavePlus, έτσι ώστε να προσεγγιστούν οι αναμενόμενες πραγματικές τιμές ( $ROS_{observed}$ ).

Πίνακας 3. Επίλυση των εξισώσεων (1) έως (4) για ένα εύρος πιθανών τιμών  $ROS_{predicted}$ .  
Table 3. Solution of equations (1)-(4) for a range of values of  $ROS_{predicted}$ .

$ROS_{predicted}$ (km/h)	$ROS_{observed}$ (km/h)			
	Υψηλά μακί Μοντέλο II	Χαμηλά μακί Μοντέλο I	Φρύγανα (αστοιβίδα) Μοντέλο V	Χαμηλά χόρτα Μοντέλο VI
0	0.165	0.127	0.101	-0.023
1	1.051	0.836	0.884	1.539
2	1.937	1.545	1.667	3.101
3	2.823	2.254	2.450	4.663
4	3.709	2.963	3.233	6.225
5	4.595	3.672	4.016	7.787
6	5.481	4.381	4.799	9.349
7	6.367	5.09	5.582	10.911
8	7.253	5.799	6.365	12.473
9	8.139	6.508	7.148	14.035
10	9.025	7.217	7.931	15.597

Οι προβλέψεις του μήκους φλόγας από το BehavePlus, για τα χαμηλά και τα υψηλά μακί, τα φρύγανα και τα χαμηλά χόρτα, δεν ήταν αξιόπιστες. Η αξιοσημείωτη υποεκτίμηση του μήκους φλόγας από το BehavePlus που σημειώθηκε στην αστοιβίδα, είναι σοβαρό πρόβλημα και για έναν επιπλέον λόγο: λαμβάνει χώρα σε μια στενή περιοχή τιμών του μήκους φλόγας η οποία περιλαμβάνει την τιμή κατωφλίου των 1,2 m που είναι το όριο για άμεση προσβολή των φλογών με χειρωνακτικά εργαλεία (Deeming et al. 1977, Hirsch and Martell 1996). Στις 10 από τις 26 περιπτώσεις η τιμή  $FL_{predicted}$  ήταν χαμηλότερη από την τιμή κατωφλίου του

1,2 m ενώ η πραγματική τιμή  $FL_{observed}$  ήταν μεγαλύτερη από αυτήν. Στην Ελλάδα έχουν συμβεί πολλά δυστυχήματα κατά την καταστολή πυρκαγιών σε φρύγανα, τα οποία είναι πολύ εύφλεκτα και ανταποκρίνονται πολύ γρήγορα στις αλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών (ανέμου, τοπογραφίας και σχετικής υγρασίας) (Xanthopoulos 2007). Η αξιοπιστία των προβλέψεων του μήκους της φλόγας (FL) για ένα μεγάλο εύρος μετεωρολογικών συνθηκών, χαρακτηριστικών τοπογραφίας και δασικών τύπων είναι κρίσιμη και απαραίτητη αφού το μήκος φλόγας επηρεάζει την ικανότητα κατάσβεσης του προσωπικού και ανακρίβεις προβλέψεις του μήκους φλόγας μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια των δασοπροσβεστών σ' αυτά τα λεπτά και πολύ εύφλεκτα καύσιμα (Athanasίου and Xanthopoulos 2014).

Η μεγάλη υποεκτίμηση του μήκους φλόγας στα φρύγανα από το BehavePlus, ίσως εξηγείται και από το ότι η κατώτατη τιμή που μπορεί να εισαχθεί στο πεδίο της παραμέτρου "Live Woody" του M.K.Y. V στο BehavePlus, είναι η τιμή 30%. Οπότε, οι πολύ πιο χαμηλές τιμές που είχαν μετρηθεί σε *Cistus* spp. (της τάξης του 17%) και θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν σαν τιμή της παραμέτρου "Live Woody" του M.K.Y. V, ώστε να υπολογιστεί η πρόβλεψη, δεν μπορούσαν να εισαχθούν στο σύστημα και εισήχθη υποχρεωτικά, η τιμή 30%. Ο παραπάνω περιορισμός μπορεί να συγκαταλέγεται στους λόγους για τους οποίους το BehavePlus υποεκτίμησε το μήκος φλόγας, κατά τις προβλέψεις με τη χρήση του M.K.Y. V, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή των φρυγανότοπων (Αθανασίου 2015).

Το κύριο εύρημα της παρούσας εργασίας είναι ότι, για τα τέσσερα M.K.Y. που εξετάστηκαν, το BehavePlus μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη του ρυθμού εξάπλωσης πυρκαγιών επιφανείας αλλά όχι για την πρόβλεψη του μήκους φλόγας.

Σχετικά με το ρυθμό εξάπλωσης, οι τέσσερις γραμμικές εξισώσεις είναι στατιστικά σημαντικές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε οι προβλέψεις του BehavePlus να προσεγγίζουν τις εκάστοτε αναμενόμενες πραγματικές τιμές (Athanasίου and Xanthopoulos 2014) και έχουν ήδη ενσωματωθεί σε δοκιμαστική έκδοση Συστήματος Υποστήριξης Λήψης Αποφάσεων το οποίο έχει δημιουργηθεί (Αθανασίου, 2015). Η σοβαρή υποεκτίμηση του μήκους φλόγας από το BehavePlus για την αστοιβίδα, όταν για την περιγραφή της χρησιμοποιείται το ελληνικό M.K.Y. V, συνιστά πολύ σημαντικό εύρημα που είναι χρήσιμο για την ασφάλεια δασοπροσβεστών και πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπ' όψιν.

Μελλοντική εξασφάλιση επιπλέον μετρήσεων πραγματικής συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών, θα καταστήσει εφικτή την περαιτέρω αξιολόγηση της ακρίβειας της ως άνω αναφερόμενης μεθόδου πρόβλεψης του ρυθμού εξάπλωσης καθώς και την ανάλυση του μήκους φλόγας, βελτιώνοντας την ασφάλεια των δασοπροσβεστών και υποστηρίζοντας τη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα.

## Ευχαριστίες

Η παρούσα ερευνητική εργασία αποτελεί τμήμα της διδακτορικής διατριβής του πρώτου 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. Η συμμετοχή του δεύτερου συγγραφέα υποστηρίχθηκε από δύο ερευνητικά έργα του Ινστιτούτου Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων (ΙΜΔΟ) του Ελληνικού Γεωργικού Οργανισμού «ΔΗΜΗΤΡΑ»: α) το έργο με τίτλο «Τυποποίηση και μεθοδολογία διαχείρισης δασικών καυσίμων στην Αττική» που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του περιφερειακού επιχειρησιακού προγράμματος Αττικής και συγχρηματοδοτήθηκε, μέσω της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας (έργο ΑΤΤ\_63), κατά 70% από την Ευρωπαϊκή Ένωση - Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης (ΕΤΠΑ), και β) το έργο του ΙΜΔΟ με τίτλο «Διερεύνηση της σχέσης του υδατικού δυναμικού των δασικών φυτών με τις δασικές πυρκαγιές».

## WILDFIRES IN MEDITERRANEAN SHRUBLANDS, PHRYGANA AND GRASSLANDS, IN GREECE: COMPARISONS OF OBSERVED FIRE BEHAVIOUR TO BEHAVEPLUS PREDICTIONS

Miltiadis Athanasiou<sup>1</sup>, Gavriil Xanthopoulos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>“Environmental Impact Assessment Studies”

8 Thoma Paleologou st., 13673 Acharnes, Greece

Phone: +30 210 2447366, E-mail: [info@m-athanasiou.gr](mailto:info@m-athanasiou.gr)

<sup>2</sup>Hellenic Agricultural Organization “DEMETER”

Institute of Mediterranean Forest Ecosystems

Terma Alkmanos, 11528, Athens, Greece

Phone: +30 210 7793142, Fax: +30 210 7784602, E-mail: [gxnrta@fria.gr](mailto:gxnrta@fria.gr)

### Abstract

This paper presents a comparison of ninety five (95) Rate Of Spread ( $ROS_{observed}$ ) and seventy(70) Flame Length ( $FL_{observed}$ ) observations of surface wildfire behavior in Greece with predictions from the BehavePlus fire behavior prediction system for tall and short Mediterranean shrublands (maquis), phrygic lands dominated by the small xeric shrub *Sarcopoterium spinosum*, and grass.

Four fuel models, which had been developed for Greece, were used to describe the four fuel types: a) “Evergreen-sclerophyllous shrublands (1.5 - 3 m)” for tall maquis, b) “Evergreen sclerophyllous shrublands (up to 1.5 m)” for short maquis, c) “Phrygana II (*Sarcopoterium spinosum*)” for phrygic areas dominated by *Sarcopoterium spinosum* and d) “Mediterranean grasslands” for grass. The pairs of  $ROS_{observed}$  values and BehavePlus  $ROS_{predicted}$  values, were correlated via linear regression for each of the data subsets. The resulting four linear regression equations, with  $ROS_{observed}$  as the dependent variable and  $ROS_{predicted}$  as the independent, are statistically significant ( $p < 0.001$ ) and can be used for adjusting BehavePlus ROS predictions to “real world” ROS estimates.

More specifically, BehavePlus ROS predictions were close to  $ROS_{observed}$  so adjustment is not considered as necessary. On the other hand, in the case of grasslands, BehavePlus under-predicts ROS by approximately 50%. As the grass adjustment equation is statistically significant and its adjusted  $R^2$  value is high ( $R^2_{adjusted} = 0.847$ ), it should be used for adjusting BehavePlus ROS predictions in these fine fuels.

The analysis also shows that the equations for short maquis and *Sarcopoterium spinosum* phrygana should also be used to adjust  $ROS_{predicted}$  values to the lower expected values, but this should be done with caution due to weaknesses of the equations.

In regard to flame length (FL) predictions from BehavePlus significant deviations were found for all four fuel types. The most important finding of this analysis was that BehavePlus consistently under predicted flame length for the *Sarcopoterium spinosum* dominated phrygana. The under prediction was significant and its importance is even greater because the underestimation takes place in a band of FL values that includes the threshold value of 1.2 m which is considered as the limit for direct attack on the flames with hand tools. In ten (10) out of  $N=26$  cases, the prediction was for  $FL < 1.2$  m while the observed FL value was well above this threshold. This is an important result that can be very useful for the safety of firefighters and it should be seriously taken into consideration in operational firefighting in the country.



## Βιβλιογραφία

- Albini, F.A., 1976. Estimating wildfire behavior and effects. Gen. Tech. Rep. INT-30. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 92 p.
- Albini, F.A., Alexander, M.E.; Cruz, M.G. 2012 A mathematical model for predicting the maximum potential spotting distance from a crown fire.. *International Journal of Wildland Fire* 21(5):609-627.
- Alexander M.E. and Thomas D.A. 2003a, 'Wildland Fire Behavior Case Studies and Analyses: Value, Approaches and Practical Uses', *Fire Management Today*, 63 (3): 4-8.
- Alexander M.E. and Thomas D.A. 2003b, 'Wildland Fire Behavior Case Studies and Analyses: Other Examples, Methods, Reporting Standards, and Some Practical Advice', *Fire Management Today*, 63 (4): 4-12.
- Alexander M. E., Cruz M. G. 2013. Limitations on the accuracy in model predictions of wildland fire behavior: A state-of-the-knowledge overview. *The Forestry Chronicle* Vol. 89, No 3 May/June 2013
- Andrews, P.L., Bevins, C.D., Seli, R.C., 2005. BehavePlus fire modeling system, Version 3.0: User's Guide. General Technical Report RMRS-GTR-106WWW revised. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 132 p.
- Αθανασίου Μ. και Ξανθόπουλος Γ. 2009. Η συμπεριφορά των μεγάλων δασικών πυρκαγιών του 2007 στην Ελλάδα. Σελ. 591-602. Στα πρακτικά του 14ου Πανελληνίου Δασολογικού Συνεδρίου, 1-4 Νοεμβρίου 2009, Πάτρα. Ελληνική Δασολογική Εταιρεία, Θεσσαλονίκη. 1101 σελ.
- Athanasίου, M. and G. Xanthopoulos 2010. Fire behaviour of the large fires of 2007 in Greece. In proceedings of the 6th International Conference on Forest Fire Research, 15-18 November 2010, Coimbra, Portugal. D.G. Viegas, Editor. ADAI/CEIF, University of Coimbra, Portugal. Abstract p. 336, full text on CD.
- Αθανασίου Μ. και Ξανθόπουλος Γ. 2013. Παρατηρήσεις μετάδοσης δασικών πυρκαγιών με καύτρες στην Ελλάδα Σελ. 30-40. Στα πρακτικά του 16ου Πανελληνίου Δασολογικού Συνεδρίου, 6-9 Οκτωβρίου 2013, Θεσσαλονίκη. Ελληνική Δασολογική Εταιρεία, Θεσσαλονίκη. 1144 σελ.
- Athanasίου, M., and G. Xanthopoulos. 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. 99, full text on CD.
- Αθανασίου, Μ. 2015. Συμβολή στην επιλογή της καλύτερης μεθόδου πρόβλεψης της συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών για την Ελλάδα. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Εθνικού & Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, σελ 408. (έχει κατατεθεί, εκκρεμεί η υποστήριξή της).
- Burgan, R.E., Rothermel, R.C. 1984. BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modelling system—FUEL subsystem. Gen. Tech. Rep. INT-167. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 126 p.
- Clements, H., D. Ward, and C. Adkins. 1983. Measuring fire behaviour with photography. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing: Series II*, vol. 49: 213-217.
- Cruz, M.G., Alexander, M.E., and Wakimoto, R.H. 2003a. 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.
- Deeming, J.E.; Burgan, R.E.; Cohen, J.D. 1977. The National Fire-Danger Rating System -1978. United States Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report INT -39, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden Utah.
- Δημητρακόπουλος, Α.Π., Mateeva, V., Ξανθόπουλος, Γ., 2001. Μοντέλα καύσιμης ύλης Μεσογειακών Τύπων βλάστησης της Ελλάδος. *Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα ΓΕΩΤΕΕ*. Σειρά VI, Τόμος 12(3): 192-206.

- Dimitrakopoulos, A.P., 2002. 'Mediterranean fuel models and potential fire behaviour in Greece', *International Journal of Wildland Fire* 11(2) 127 – 130.
- Gould, J., McCaw, L., Cruz, M., Anderson, W., 2011. How good are fire behavior models? Validation of eucalypt forest fire spread. Paper Presented at WILDFIRE 2011 e 5th International Wildland Fire Conference. [http://www.wildfire2011.org/material/papers/Jim\\_Gould.pdf](http://www.wildfire2011.org/material/papers/Jim_Gould.pdf).
- Hirsch KG, Martell DL (1996) A Review of Initial Attack Fire Crew Productivity and Effectiveness. *International Journal of Wildland Fire* 6, 199–215.
- Jolly W. M. 2005. Sensitivity of a fire behavior model to changes in live fuel moisture USDA Forest Service, RMRS, Fire Sciences Laboratory, Missoula, MT Presented at the Sixth Symposium on Fire and Forest Meteorology, Oct. 25-27, 2005, Canmore, AB, Canada.
- Lawson, B.D. and O.B. Armitage. 2008. Weather guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System. *Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton, AB.* 73 p.
- Norum, R.A. and M. Miller. 1984. Measuring fuel moisture content in Alaska: Standard methods and procedures. USDA For. Serv., Pac. Northwest For. Range Exp. Stn., Portland, OR. Gen. Tech. Rep. PNW-171. 34 p.
- Rothermel, R.C. 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. Gen. Tech. Rep. INT-143. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 161 p.
- Van Wagner, C. E. 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research*. 7: 23–34.
- Xanthopoulos, G. 2007. Forest fire related deaths in Greece: confirming what we already know. p. 339. In book of abstracts of the "IV International Wildland Fire Conference", May 13-17, 2004, Seville, Spain. Full paper on the CD accompanying the book of abstracts.
- Ξανθόπουλος, Γ., 1990. Δυνατότητες πρόβλεψης συμπεριφοράς της πυρκαγιάς στα δάση της Ελλάδας. Σελ. 199-203. Στα πρακτικά του Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Δασολογικής Εταιρείας, με θέμα "Δασοπονία και Περιφερειακή Ανάπτυξη", 7-9 Νοεμβρίου 1990, Καρπενήσι. 417 σελ.