

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/354523298>

# Αξιοποίηση δορυφορικών δεδομένων & λογισμικών ανοικτού κώδικα για την προσομοίωση της χωρικής εξάπλωσης δασικής πυρκαγιάς – Utilizing satellite imagery and open-source software for...

Conference Paper · October 2021

CITATIONS

0

READS

160

3 authors, including:



**Fotis Bouras**

University of Patras

1 PUBLICATION 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**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:



Μελέτη και επιχειρησιακό σχέδιο για την πρόληψη πυρκαγιών για την περιοχή GR2330005 του Ευρωπαϊκού οικολογικού δικτύου Natura 2000 στην Ηλεία, Έργο Interreg IV "NAT-PRO", Αναπτυξιακή Εταιρεία Περιφέρειας Δυτικής Ελλάδος Α.Ε. Ο.Τ.Α., Σελ. 175. [View project](#)



Μελέτη για την αντιδιαβρωτική και αντιπυρική προστασία των οικοσυστημάτων του Σκοπού και των Σεκανίων - Ζακύνθου, WWF Ελλάς, Τ.Ε.Ι. Ιονίων Νήσων, Σελ.75 [View project](#)



## **ΠΡΑΚΤΙΚΑ**

**20ου Πανελλήνιου Δασολογικού Συνεδρίου**

**«Σύγχρονες προκλήσεις του δάσους στην Ελληνική Δασοπονία και  
προστασία του φυσικού περιβάλλοντος,  
200 χρόνια μετά την Επανάσταση του '21»**

**Επιμέλεια Έκδοσης: Στέφανος Τσιάρας, Μαρίνα Χαβενετίδου,  
Ιωάννης Σπανός, Θεοχάρης Ζάγκας,  
Διονύσιος Γαϊτάνης, Ηλίας Κουλουκούρας**

**Τρίκαλα, 3-6 Οκτωβρίου 2021**

**ΔΙΟΡΓΑΝΩΤΗΣ**

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΑΣΟΛΟΓΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ

**ΑΙΓΙΑ**

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

**ΣΥΝΔΙΟΡΓΑΝΩΤΕΣ**

ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΔΗΜΟΣ ΤΡΙΚΚΑΙΩΝ

ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ-ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ (ΓΕΩΤΕΕ)

ΕΛΓΟ -ΔΗΜΗΤΡΑ (ΙΔΕ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΙΜΔΟ ΑΘΗΝΩΝ)

ΤΜΗΜΑ ΔΑΣΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ (ΑΠΘ)

ΤΜΗΜΑ ΔΑΣΟΛΟΓΙΑΣ, ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΞΥΛΟΥ & ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ (ΠΘ)

ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ (ΠΘ)

ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΑ ΕΝΩΣΗ ΔΑΣΟΛΟΓΩΝ ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΥΠΑΛΛΗΛΩΝ (ΠΕΔΔΥ)

**ΧΟΡΗΓΟΙ**

ΠΡΑΣΙΝΟ ΤΑΜΕΙΟ

ΣΤ' ΚΥΝΗΓΕΤΙΚΗ ΟΜΟΣΠΟΝΔΙΑ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ-ΘΡΑΚΗΣ (ΚΟΜΑΘ)

**ISBN: 978-618-84551-2-2**

Θεματική Ενότητα: Προστασία Δασών-Δασικές Πυρκαγιές

## ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΕΞΑΠΛΩΣΗΣ ΔΑΣΙΚΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Μπούρας, Φώτιος<sup>1</sup>; Αθανασίου, Μιλτιάδης<sup>2</sup>; Λαγγούσης, Ανδρέας<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών, 26504, Πάτρα, fotbou95@gmail.com, andlag@upatras.gr

<sup>2</sup>Wildfire Management Consulting and Training, Θωμά Παλαιολόγου 8, 13673 Αχαρνές, info@m-athanasiou.gr

### Περίληψη

Η χωρική εξάπλωση δασικής πυρκαγιάς στην ημιορεινή Αρκαδία στις 11 Σεπτεμβρίου 2017, προσομοιώθηκε μέσω του συστήματος FARSITE 4. Για την περιγραφή της τοπογραφίας της περιοχής, μεταφορτώθηκε ψηφιακό μοντέλο εδάφους (AsterGDEM) και εισήχθη στο QuantumGIS. Για την χαρτογράφηση της καύσιμης ύλης, δορυφορικές εικόνες Landsat 8 OLI ταξινομήθηκαν με την μέθοδο της αντικειμενοστραφούς ανάλυσης και χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από τον κοντινό μετεωρολογικό σταθμό της Μεγαλόπολης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Με βάση τα τελευταία, δοκιμάστηκαν μικρές παραλλαγές στις διευθύνσεις και τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου, για την λεπτομερή περιγραφή των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούσαν στην περιοχή κατά την εξάπλωση της δασικής πυρκαγιάς και δημιουργήθηκαν έξι διαφορετικά σενάρια. Για κάθε σενάριο, εκτιμήθηκαν α) οι θέσεις της περιμέτρου της δασικής πυρκαγιάς σε δεδομένες χρονικές στιγμές, β) ο ρυθμός εξάπλωσης (ROS, m/min), γ) η έντασή της (I, kW/m), δ) ο στατιστικός δείκτης συσχέτισης Sorensen- Dice (SD) και ε) ο ποσοστιαίος δείκτης απόκλισης της εκτιμώμενης καμένης έκτασης από την πραγματική. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συζητήθηκαν και επισημάνθηκαν πιθανοί τρόποι αξιοποίησής τους κατά τη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών.

*Λέξεις κλειδιά: Δασική πυρκαγιά, Δορυφορικά δεδομένα, Αντικειμενοστραφής ανάλυση, FARSITE.*

### Εισαγωγή

Σε ένα πολύ μεγάλο τμήμα του πλανήτη, οι δασικές πυρκαγιές εμφανίζονται ως σημαντικό πρόβλημα εκτός από φυσικό φαινόμενο. Όταν η συχνότητα εμφάνισής τους είναι υψηλή μπορεί να οδηγήσουν κάποιες περιοχές στην ερημοποίηση ενώ, υπό κάποιες προϋποθέσεις, δασικές πυρκαγιές σχετικά χαμηλής έντασης μπορεί να έχουν θετική επίδραση σε δασικά οικοσυστήματα, προκαλώντας τη φυσική αναγέννηση και την αύξηση της βιοποικιλότητας. Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν μέρος της οικολογίας των Μεσογειακών δασικών οικοσυστημάτων και η πλήρης εξάλειψή τους είναι όχι μόνο αδύνατη αλλά και μη επιθυμητή.

Η πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους ή/και η δυνατότητα αξιόπιστης προσομοίωσης της χωρικής εξάπλωσής τους, μπορούν να υποστηρίξουν σημαντικά την πρόληψη των δασικών πυρκαγιών. Όμως, διάφοροι ενδογενείς περιορισμοί των συστημάτων πρόβλεψης που συχνά οδηγούν στην αδυναμία τους να αποδώσουν την πραγματική εξέλιξη των δασικών πυρκαγιών, συχνά εγείρουν ερωτήματα σχετικά με τις δυνατότητες και τα περιθώρια πρακτικής εφαρμογής τους. Τα μοντέλα πρόβλεψης της συμπεριφοράς και προσομοίωσης της χωρικής εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών μπορεί να είναι εμπειρικά, ημι-εμπειρικά, φυσικά ή ημι-φυσικά (Sullivan 2009a,b,c). Τα φυσικά και ημι-φυσικά μοντέλα προσεγγίζουν καλύτερα τη φυσική και χημική διάσταση του φαινομένου της καύσης αλλά είναι πολύ δύσκολο να αξιοποιηθούν ως επιχειρησιακά εργαλεία, κάτι που δεν ισχύει για κάποια εμπειρικά και ημι-εμπειρικά μοντέλα τα οποία έχουν επίσης σημαντικές αδυναμίες αλλά απαιτούν λιγότερα δεδομένα εισόδου, επιτυγχάνουν μικρότερους υπολογιστικούς χρόνους και είναι πιο εύχρηστα.

Πολλές προσπάθειες προσομοίωσης της χωρικής εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών πραγματοποιούνται μέσω του γνωστού συστήματος FARSITE (Finney 1998, 2004) το οποίο έχει

προσομοιώσει με επιτυχία ιστορικές πυρκαγιές (Sullivan 2009c) και είναι πλέον ενσωματωμένο στο πρόγραμμα FlamMap (Finney 2006). Το FARSITE μπορεί να προσομοιώσει - σε δύο διαστάσεις - τη χωρική εξάπλωση πυρκαγιών επιφανείας σε βλάστηση ύψους έως 2 μέτρων περίπου, αν η τελευταία περιγραφεί από κάποιο αντιπροσωπευτικό Μοντέλο Καύσιμης Ύλης (M.K.Y.). Ως M.K.Y. ορίζεται το σύνολο των τιμών των παραμέτρων της καύσιμης ύλης που απαιτούνται ως δεδομένα για τη χρησιμοποίηση του μαθηματικού μοντέλου διάδοσης της πυρκαγιάς (Rothermel 1972). Οι Albini (1976), Anderson (1982) και Scott και Burgan (2005) έχουν αναγνωρίσει, δημιουργήσει ή/και βελτιώσει M.K.Y. στις Η.Π.Α. Στην Ελλάδα έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες μέτρησης και μοντελοποίησης χαρακτηριστικών δασικών τύπων που κατέληξαν στη δημιουργία ενός μικρού αριθμού αντιπροσωπευτικών M.K.Y. για όλη τη χώρα με βάση στατιστικές μεθόδους (Dimitrakopoulos κ.α. 1999, Δημητρακόπουλος κ.α. 2001, Dimitrakopoulos 2002, Ξανθόπουλος κ.α. 2009, Αθανασίου κ.α. 2017), κατά το πρότυπο των ΗΠΑ. και έχουν αναφερθεί τα δυνητικά οφέλη από την αξιοποίησή τους (Ξανθόπουλος 1990).

Στα μεσογειακά οικοσυστήματα η βλάστηση εμφανίζει σημαντική ετερογένεια οπότε για την περιγραφή της πρέπει να γίνεται προσεκτική επιλογή των M.K.Y. που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στα συστήματα πρόβλεψης. Η αντιστοίχιση των κλάσεων της βλάστησης με τα εκάστοτε αντιπροσωπευτικά M.K.Y., ακολουθεί την χαρτογράφηση της που μπορεί να υλοποιηθεί μέσω της ταξινόμησης δορυφορικών εικόνων. Η αντικειμενοστραφής ανάλυση είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την ταξινόμηση της βλάστησης και υπάρχουν πολλοί σχετικοί δείκτες (Prabhakara κ.α. 2015). Ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης (NDVI) (Tucker 1979) είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος. Για τις προσομοιώσεις με το Farsite απαιτούνται και άλλα δεδομένα εισόδου, όπως η τιμή της περιεχόμενης στα δασικά καύσιμα υγρασίας, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) και οι λοιπές μετεωρολογικές συνθήκες όπως το πεδίο (ταχύτητα και διεύθυνση) του ανέμου.

Η παρούσα εργασία είναι τμήμα της διπλωματικής εργασίας του πρώτου συγγραφέα. Η χωρική εξάπλωση της δασικής πυρκαγιάς που ήταν κυρίως πυρκαγιά επιφανείας, ξέσπασε στις 14:27 της 11ης Σεπτεμβρίου 2017 κοντά στο χωριό Βουτσαράς Αρκαδίας, εκτιμάται ότι προσέγγισε τον ορεινό όγκο της Τσεμπερούς περίπου στις 18:30 της ίδιας ημέρας, και προσομοιώθηκε μέσω του συστήματος FARSITE για έξι σενάρια παρεμφερών μετεωρολογικών συνθηκών. Συζητούνται πιθανά οφέλη που μπορεί να αποκομίσει ο χρήστης από μια τέτοια προσπάθεια αλλά και οι δυσκολίες τις οποίες θα συναντήσει καθώς και οι περιορισμοί που θα χρειαστεί να κατανοήσει, κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου.

### Υλικά και Μέθοδοι

Χρησιμοποιήθηκε το Quantum GIS ή QGIS (<http://www.qgis.org>) που είναι ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών και λειτουργεί σε περιβάλλον Linux, Unix, Mac OSX και Windows. Το QGIS έχει τη δυνατότητα επικοινωνίας με το GRASS και άλλες βιβλιοθήκες εργαλείων. Για την περιγραφή των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής αξιοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Aster GDEM) που προέρχεται από δωρεάν δορυφορικά δεδομένα του αισθητήρα ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) του Ιαπωνικού Υπουργείου Οικονομικών, Εμπορίου και Βιομηχανίας [Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry (METI)] που είναι τοποθετημένος στον δορυφόρο Terra (EOS AM-1) της NASA (<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>).

Κατά την εισαγωγή του στο πρόγραμμα QGIS, επιλέχθηκε η περιοχή ενδιαφέροντος (Αρκαδία), αφαιρέθηκαν οι αρνητικές τιμές και κατόπιν εξήχθησαν τα στοιχεία του υψομέτρου, των μορφολογικών κλίσεων και της έκθεσης (προσανατολισμού) των κλίσεων.

Η βλάστηση ταξινομήθηκε μέσω αντικειμενοστραφούς ανάλυσης με τη βοήθεια του δείκτη NDVI, στο περιβάλλον του λογισμικού QGIS και στη συνέχεια, με βάση τα δεδομένα που είχαν συλλεχθεί κατά τις εργασίες πεδίου, περιγράφηκε από τρία M.K.Y.: α) το M.K.Y. (1) του Anderson (1982) για τα χόρτα, β) το SH2 (142) των Scott & Burgan (2005) για τους θάμνους και γ) το NB1 (91) των ίδιων συγγραφέων για τις αστικές περιοχές / τεχνητές επιφάνειες στις οποίες δεν διαδίδεται η φωτιά. Αναλύθηκαν διαθέσιμες δωρεάν δορυφορικές εικόνες Landsat 8 OLI που μεταφορτώθηκαν από τον ιστότοπο του Earthexplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Με βάση τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες οι οποίες καταγράφηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό της Μεγαλόπολης (μ.σ.Μ.) του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών που απέχει περίπου 10 km

(σε ευθεία γραμμή) από τον Βουτσαρά, κατά την ώρα έναρξης της δασικής πυρκαγιάς [θερμοκρασία (T) = 34°C, σχετική υγρασία (RH) = 31% και ουρανός χωρίς νέφη] καθώς και βάσει των χαρακτηριστικών του τοπίου, η περιεχόμενη υγρασία στα λεπτά νεκρά δασικά καύσιμα (δηλαδή τα νεκρά καύσιμα με διάμετρο από 0 έως 0,63 cm που καλούνται και καύσιμα της 1-hr) εκτιμήθηκε ίση με 6% εφαρμόζοντας την μεθοδολογία του Rothermel (1983). Η ίδια τιμή αποδόθηκε στα καύσιμα των 10-hr (τα νεκρά καύσιμα με διάμετρο από 0,64 έως 2,5 cm) που είναι μια αποδεκτή παραδοχή η οποία εφαρμόζεται συχνά (Andrews κ.α. 2005) ενώ για τα καύσιμα των 100-hr (νεκρά καύσιμα με διάμετρο από 2,51 έως 7,62 cm) η περιεχόμενη υγρασία εκτιμήθηκε ίση με 8% και για τα ζωντανά λεπτά καύσιμα (Live Woody) ίση με 85%. Η ένταση του ανέμου, κατά την εξάπλωση της δασικής πυρκαγιάς, κυμάνθηκε μεταξύ τεσσάρων (4) και πέντε (5) Beaufort, με διεύθυνση νότια - νοτιοδυτική. Για αυτό δημιουργήθηκαν έξι (6) σενάρια με παραλλαγές στην ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου, με σκοπό την περιγραφή του πεδίου του ανέμου, στην περιοχή εξάπλωσης της δασικής πυρκαγιάς (Πίνακας 1) και με βάση αυτά, υλοποιήθηκαν οι αντίστοιχες προσομοιώσεις από το FARSITE.

Πίνακας 1. Περιγραφή των έξι σεναρίων με βάση τα οποία έγιναν οι προσομοιώσεις. Όπου μ.σ.Μ.: τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού της Μεγαλόπολης.

Table 1. Description of the six discrete scenarios used for the wildfire spread simulations. "m.s.M." is for Megalopolis meteorological station original recorded data.

Σενάρια	1	2	3	4	5	6
Επιλογή του "Acceleration" στην προσομοίωση	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι
Ταχύτητα ανέμου (wind speed) [Beaufort (km·h <sup>-1</sup> )]	μ.σ.Μ. (m.s.M.)	4 (24)	4 (24)	μ.σ.Μ. (m.s.M.)	4 (24)	5 (34)
Διεύθυνση ανέμου (wind direction) [μοίρες (χρονικό διάστημα)]	μ.σ.Μ. (m.s.M.)			180°(14:00-16:30) 225°(16:30-22:00)	180°(14:00-16:30) 225°(16:30-22:00)	180°(14:00-16:30) 210°(16:30-21:00) 225°(21:00-22:00)

Το σημείο έναρξης της δασικής πυρκαγιάς (x = 340706, y = 4132068, ΕΓΣΑ87), εισήχθη ως σημειακό διανυσματικό (vector) αρχείο και για όλα τα σενάρια ορίστηκαν: α) η συνολική χρονική διάρκεια της προσομοίωσης της χωρικής εξάπλωσης της πυρκαγιάς, στις 7h και 33 min δηλαδή από τις 14:27 έως τις 22:00, β) το χρονικό βήμα παρουσίασης των θέσεων της περιμέτρου (60 λεπτά) και γ) η ανάλυση της περιμέτρου (25 μέτρα).

Η πραγματικά καμένη έκταση (2,83 km<sup>2</sup>) ψηφιοποιήθηκε με βάση χάρτη του Εθνικού Παρατηρητηρίου Δασικών Πυρκαγιών (<http://fmrsvm.for.auth.gr/>) για να συγκριθεί με τις προβλέψεις για την εκτιμώμενη τελική καμένη έκταση από κάθε σενάριο, μέσω του στατιστικού δείκτη συσχέτισης Sorensen- Dice ή SD (Dice 1945, Sorensen 1948) (βλ. σχέση 1) και μέσω του ποσοστιαίου δείκτη απόκλισης της εκτιμώμενης καμένης έκτασης από την πραγματική (βλ. σχέση 2).

Πιο συγκεκριμένα:

$$SD = \frac{2 \cdot a}{2 \cdot a + b + c} \quad (1)$$

όπου  $a$  είναι η έκταση της πρόβλεψης που ταυτίζεται με την πραγματική,  $b$  η υποεκτίμηση της πρόβλεψης, και  $c$  η υπερεκτίμηση της πρόβλεψης.

$$\text{Δείκτης απόκλισης} = \frac{a-b}{b} \cdot 100 \quad (2)$$

όπου  $a$  είναι η πρόβλεψη της καμένης έκτασης, και  $b$  η πραγματικά καμένη έκταση. Στο FARSITE, δεν ενεργοποιήθηκαν επιλογές σχετικές με την μετάδοση της πυρκαγιάς με καύτρες και με τη συμπεριφορά πυρκαγιάς κόμης.

### Αποτελέσματα

Για κάθε σενάριο δημιουργήθηκαν: α) πολυγωνικό vector αρχείο με τις εκτιμώμενες θέσεις της περιμέτρου, β) αρχείο πλεγματού τύπου (raster) του ρυθμού εξάπλωσης της δασικής πυρκαγιάς (ROS, m/min) και γ) raster αρχείο της έντασής της (I, kW/m) (Πίνακας 3). Υπολογίστηκαν, επίσης, ο στατιστικός δείκτης SD και ο ποσοστιαίος δείκτης απόκλισης, για κάθε σενάριο (Πίνακας 2).

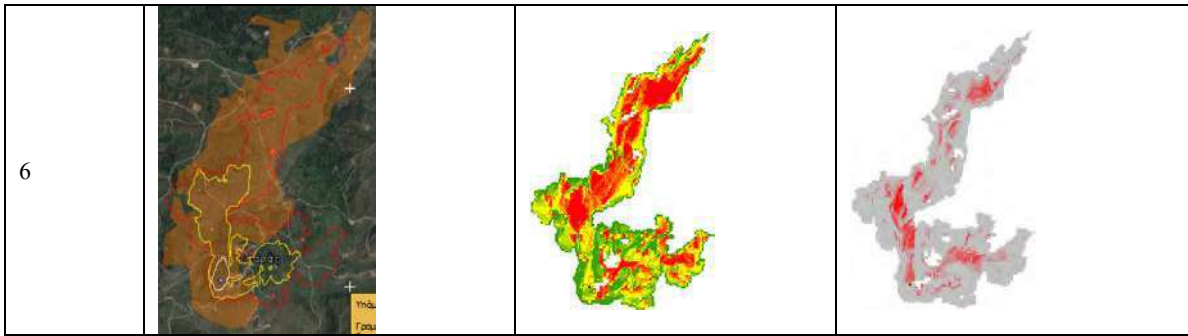
Πίνακας 2. Δείκτης απόκλισης και δείκτης Sorensen – Dice (SD) για τα 6 σενάρια.  
Table 2. Relative change and Sorensen – Dice (SD) coefficient for the six scenarios.

	Πραγματική	Σενάριο					
		1	2	3	4	5	6
Καμένη Έκταση [km <sup>2</sup> (ha)]	2,83 (283)	1,83 (183)	1,20 (120)	1,02 (102)	1,50 (150)	1,27 (127)	1,87 (187)
Δείκτης απόκλισης (%)		-35,38	-57,49	-63,86	-47,12	-55,07	- 33,92
Δείκτης SD		0,19	0,16	0,13	0,21	0,28	0,53

Πίνακας 3. Προβλέψεις ποσοτικών χαρακτηριστικών της πυρκαγιάς για τα έξι σενάρια. Στην δεύτερη στήλη, παρουσιάζονται οι εκτιμώμενες θέσεις της περιμέτρου στις 15:00 (άσπρο), 17:00 (κίτρινο) και 20:00 (κόκκινο).

Table 3. Wildfire behaviour prediction for the six scenarios. In the second column, estimated perimeter at 15:00 (white), 17:00 (yellow) and 20:00 (red).

Σενάριο (Scenario)	Στο σενάριο 6, με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται η πραγματικά καμένη έκταση The orange polygon at scenario 6, represents the actual burned area	Ρυθμός Εξάπλωσης (m/min) Rate of spread (m/min)	Ένταση πυρκαγιάς (kW/m) Fireline Intensity (kW/m)
1			
2			
3			
4			
5			



### Συζήτηση – Συμπεράσματα

Η πυρκαγιά που εξετάστηκε ήταν κατά κύριο λόγο, μια πυρκαγιά επιφανείας (Σχήμα 1). Κατά την έναρξη και εξάπλωσή της, η διεύθυνση του ανέμου ήταν νότια - νοτιοδυτική, οπότε η κεφαλή της καθοδηγήθηκε προς τα βόρεια - βορειοανατολικά. Η μέση τιμή του πραγματικού ρυθμού εξάπλωσης, στην κεφαλή της πυρκαγιάς προς τα ΒΒΑ, υπολογίστηκε περίπου στα  $7 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Επιπλέον, λόγω και της τοπογραφίας της περιοχής, τμήμα της ανατολικής πλευράς της πυρκαγιάς (κοντά στην πτέρνα της) εξαπλώθηκε και προς το χωριό Βουτσαράς, απειλώντας κατοίκους, σπίτια και υποδομές. Στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όλων των σεναρίων, παρατηρείται η χωρική εξάπλωση της πυρκαγιάς προς τα ανατολικά του χωριού Βουτσαράς αλλά στην πραγματικότητα η πυρκαγιά αντιμετωπίστηκε από τις πυροσβεστικές δυνάμεις στο δυτικό όριο του χωριού. Η πραγματική συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών μαζί με την επίδραση της επίγειας και εναέριας δασοπυρόσβεσης, διαμορφώνουν την τελικά καμένη έκτασή τους αλλά για την υπό μελέτη πυρκαγιά, η δασοπυρόσβεση (Σχήμα 2) δεν ελήφθη υπόψη κατά τις προσομοιώσεις.



Σχήμα 1. Η δασική πυρκαγιά εξαπλώνεται σε θαμνώδη βλάστηση [στιγμιότυπο από μαγνητοσκοπημένο υλικό, πηγή (source): [https://www.youtube.com/watch?v=RWWk209pjMI&fbclid=IwAR0\\_maSU\\_UQg\\_5wp1e\\_XVR\\_0Ca7BPgfzk\\_LeAhYN\\_O5HG\\_WfT6dVZ\\_hkZtqU\\_ovOx0EJ](https://www.youtube.com/watch?v=RWWk209pjMI&fbclid=IwAR0_maSU_UQg_5wp1e_XVR_0Ca7BPgfzk_LeAhYN_O5HG_WfT6dVZ_hkZtqU_ovOx0EJ)]

Figure 1. The wildfire spreads through Mediterranean shrublands



Σχήμα 2. Στην καταστολή της πυρκαγιάς, συνέβαλαν και προωθητές γαιών [στιγμιότυπο από μαγνητοσκοπημένο υλικό, πηγή (source): [https://www.youtube.com/watch?v=RWWk209pjMI&fbclid=IwAR0\\_maSU\\_UQg\\_5wp1e\\_XVR\\_0Ca7BPgfzk\\_LeAhYN\\_O5HG\\_WfT6dVZ\\_hkZtqU\\_ovOx0EJ](https://www.youtube.com/watch?v=RWWk209pjMI&fbclid=IwAR0_maSU_UQg_5wp1e_XVR_0Ca7BPgfzk_LeAhYN_O5HG_WfT6dVZ_hkZtqU_ovOx0EJ)]

Figure 2. Dozers were used for Fireline construction

Για τη διευκόλυνση της κατανόησης και της περιγραφής της εξάπλωσης της πυρκαγιάς σε σχέση με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, δημιουργήθηκαν μηκοτομές (επιμήκη προφίλ της επιφάνειας του εδάφους) σε περιοχές ενδιαφέροντος. Παρουσιάζεται το επίμηκες προφίλ κατά μήκος των διευθύνσεων διάδοσης της κεφαλής της πυρκαγιάς (Σχήμα 3).

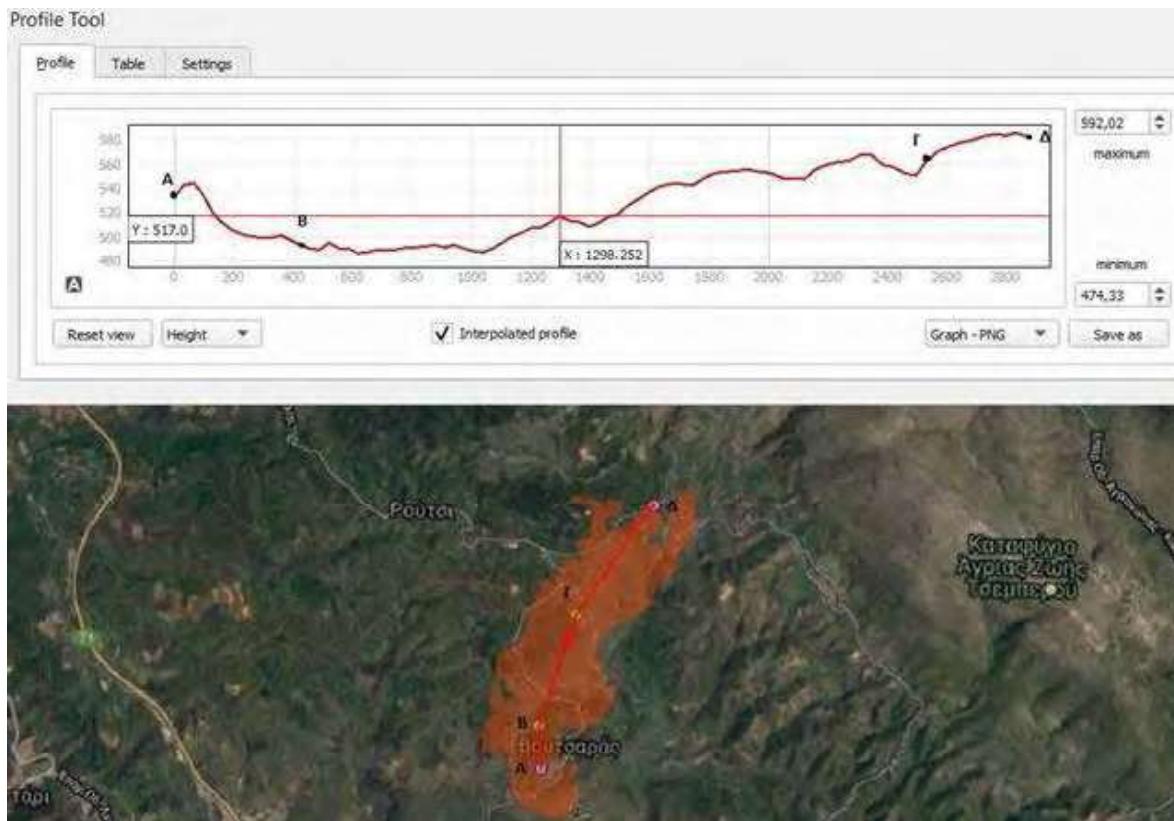
Εκτός από το σενάριο 6 ( $SD = 0,53$ , Δείκτης απόκλισης =  $33,92\%$  και καμένη έκταση =  $1,87 \text{ km}^2$  ή  $187 \text{ ha}$ ), οι προσομοιώσεις των υπόλοιπων σεναρίων είναι ιδιαίτερα ανακριβείς και οι δείκτες τους ιδιαίτερα χαμηλοί (Πίνακες 2 & 3). Βεβαίως, για τον έλεγχο της ακρίβειας και της αξιοπιστίας προσομοιώσεων της χωρικής εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών δεν αρκούν οι δείκτες απόκλισης και  $SD$ . Ακόμη κι αν η τιμή του  $SD$  είναι υψηλή και η εκτιμώμενη καμένη έκταση ταυτίζεται σημαντικά με την πραγματική, πάλι ο εκτιμώμενος  $ROS$  μπορεί να είναι πολύ πιο χαμηλός από τον πραγματικό και να έχει χρειαστεί πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα «για να καεί η έκταση» στην προσομοίωση, από ό,τι



στην πραγματικότητα. Η χωρική διακύμανση των εκτιμώμενων τιμών ROS και I, δίδονται στον Πίνακα 3.

Δημιουργώντας σενάρια με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα του μ.σ.Μ. και υποθέσεις που υιοθετήθηκαν για τις τοπικές συνθήκες οι οποίες πιθανά επικρατούσαν στην περιοχή του Βουτσαρά Αρκαδίας, παρήχθησαν ενδιαφέρουσες προβλέψεις. Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ της πραγματικά καμένης έκτασης και των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, σε ένα βαθμό οφείλονται στην αντικειμενική αδυναμία των Μ.Κ.Υ. να αποδώσουν την ετερογένειά της βλάστησης της περιοχής. Το FARSITE, ως ελεύθερο λογισμικό ανοικτού κώδικα, είναι ελεύθερο προς χρήση και ανάπτυξη και μπορεί να παρέχει χρήσιμες προσομοιώσεις χωρικής εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών, αν τα Μ.Κ.Υ. που χρησιμοποιούνται είναι τα κατάλληλα (Papadopoulos and Pavlidou 2011). Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων του FARSITE εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια της περιγραφής των δασικών καυσίμων (Finney and Ryan 1995) και στις περιπτώσεις που τα καύσιμα είναι ασυνεχή, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δεν είναι ακριβή (Finney 1998). Η μελλοντική επιλογή κατάλληλων ελληνικών Μ.Κ.Υ. των Δημητρακόπουλος κ.α. (2001) ή η δημιουργία τοπικών Μ.Κ.Υ., θα μπορούσε να μετριάσει αυτό το πρόβλημα (Αθανασίου και Ξανθόπουλος 2015).

Επίσης, η ακριβής περιγραφή του πεδίου του ανέμου είναι απαραίτητη για την παραγωγή ρεαλιστικών προσομοιώσεων της εξάπλωσης και της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών στη Μεσογειακή βλάστηση (Arca κ.α. 2007). Εκτός από τα σφάλματα και τις αβεβαιότητες στα δεδομένα εισόδου, υπάρχουν και οι ενδογενείς αδυναμίες και οι περιορισμοί των συστημάτων. Παρόλα αυτά, κάποιες προβλέψεις της συμπεριφοράς και εξάπλωσης των δασικών πυρκαγιών μπορούν να αξιοποιηθούν και να βοηθήσουν σημαντικά στην αντιμετώπισή τους, αν ο χρήστης κατανοεί τους λόγους για τους οποίους γίνονται ορισμένες παραδοχές, το πώς αυτές αναμένεται να επηρεάσουν τις προβλέψεις και αν μπορεί να αναγνωρίζει χονδροειδή σφάλματα που ίσως προκύψουν στα αποτελέσματα του συστήματος είτε από λανθασμένη εισαγωγή δεδομένων είτε από δεδομένα εισόδου χαμηλής ποιότητας.



Σχήμα 3. Μηκοτομή κατά μήκος των διευθύνσεων διάδοσης της κεφαλής της πυρκαγιάς (Σημεία A: έναρξη πυρκαγιάς, B & Γ: αλλαγής διεύθυνσης, Δ: πέρασ μηκοτομής)

Figure 3. Profile along the main axis of the head fire spread. A: eruption point, B & Γ: significant change of head spread direction, Δ: end of profile

Αν και διαφορετικές προσεγγίσεις και αλγόριθμοι άλλων συστημάτων (όπως του FlamMap) που επιτρέπουν την εκτέλεση χιλιάδων προσομοιώσεων, μπορεί να είναι πολύ πιο αποδοτικές μέθοδοι για την ανάλυση της επικινδυνότητας σε μια περιοχή (Kalabokidis κ.α. 2013), προσομοιώσεις σαν κι εκείνες του Πίνακα 3 μπορούν επίσης να υποστηρίξουν σημαντικά τη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών αλλά και την εκπαίδευση στελεχών υπηρεσιών σε θεωρητικά θέματα για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους.

### Abstract

FARSITE (now included in FlamMap6) was used to simulate the spread and behavior of a wildfire that had been documented in Arcadia, Greece, in 2017. A Digital Elevation Model (Aster GDEM), available at no cost from a remote sensing instrument operating aboard NASA's Terra satellite [Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) radiometer], was downloaded from <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> and processed using Quantum GIS (<http://www.qgis.org>). Satellite images Landsat 8 OLI were classified by an object-oriented analysis method, supporting fuel mapping, and data from an adjacent meteorological station of National Observatory of Athens allowed a detailed description of the wind field. Fire spread simulations were run for six discrete wind field scenarios, and the obtained results are presented along with a thorough discussion of strengths, potential benefits as well as weaknesses of the applied method.

### Βιβλιογραφία

- Αθανασίου Μ. και 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. 408 σελ.
- Αθανασίου Μ., Ξανθόπουλος Γ., Μαρτίνης Α., Φούκης Θ. και Γαϊτάνη Σ., 2017. Δημιουργία Μοντέλου Καύσιμης Ύλης για τη λαδανιά (*Cistus* spp.) στην Ελλάδα. Σελ. 698-705. Στα πρακτικά του 18ου Πανελλήνιου Δασολογικού Συνεδρίου & International Workshop, 8-11 Οκτωβρίου 2017, Έδεσσα Πέλλας. Ελληνική Δασολογική Εταιρεία. 1742 σελ.
- Albini, F.A., 1976. Estimating wildfire behavior and effects. Gen. Tech. Rep. INT-30. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 92 p.
- Anderson, H. E., 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. USDA For. Serv., Research Note RM - 354. 4 pp.
- Andrews P.L., Bevins C.D. and 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.
- Arca B., Duce P., Pellizzaro G., Bacciu V., Salis, M. and Spano., D., 2007. Evaluation of FARSITE Simulator in a Mediterranean Area, The 4th International Wildland Fire Conference, Seville, Spain.
- Dice, Lee R., 1945. Measures of the Amount of Ecologic Association Between Species. *Ecology*. 26 (3): 297-302. doi:10.2307/1932409. JSTOR 1932409.
- Dimitrakopoulos, A. P., G. Xanthopoulos, and Mateeva., V., 1999. Statistical classification of mediterranean fuel types in Greece. pp. 125-131. In proceedings of the International Symposium on "Forest Fires: Needs and Innovations". November 18-19, 1999, Athens, Greece. Published by CINAR S.A., Athens, Greece, under the auspices of the European Commission DG XII. 419 p.
- Δημητρακόπουλος, Α.Π., V. Mateeva, και 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.

Finney M.A. and Ryan, K.C., 1995. Use of the FARSITE fire growth model for fire prediction in US National Parks. Proc. The International Emergency Mgt. and Engineering Conf. May 1995 Sofia Antipolis, France. p. 183-189.

Finney, M.A., 1998. FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation. Res. Pap. RMRS-RP-4, Ogden, UT: USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 47 p.

Finney, M.A., 2004. FARSITE: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation (revised). Res. Paper RMRS-RP-4 revised. UT: USDA, Rocky Mountain Research Station, Ogden, 52 p.

Finney, M. A., 2006. An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In: Fuels management—how to measure success: conference proceedings. 2006 March 28-30; Portland, Oregon. Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: 213-220. (647 KB; 13 pages).

Kalabokidis, K., Palaiologou, P., Finney, M. A., 2013. Fire behavior simulation in Mediterranean forests using the minimum travel time algorithm. In: Fourth Fire Behavior and Fuels Conference Proceedings - At The Crossroads: Looking Toward the Future in a Changing Environment; July 1-4, 2013; St. Petersburg, Russia. Missoula, MT: International Association of Wildland Fire. p. 468-492.

Papadopoulos, G. and F.N. Pavlidou. 2011. A comparative review on wildfire simulators. IEEE Systems Journal 5, 233-243.

Prabhakara, K., Hively, W. D., & McCarty, G. W., 2015. Evaluating the relationship between biomass, percent groundcover and remote sensing indices across six winter cover crop fields in Maryland, United States. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 88-102.

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.

Ξανθόπουλος Γ., Δόσης, Σ., Καρπή, Α., Παναγιωτίδου, Ε. και Σουφλής, Δ., 2009. Αντιπροσωπευτικά μοντέλα δασικής καύσιμης ύλης για την περιφέρεια της Αττικής: Δημιουργία και λογισμικό αξιοποίησης. Σελ. 615-626. Στα πρακτικά του 14ου Πανελληνίου Δασολογικού Συνεδρίου, 1-4 Νοεμβρίου 2009, Πάτρα. Ελληνική Δασολογική Εταιρεία, Θεσσαλονίκη. 1101 σελ.

Rothermel, R.C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 p.

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. Predicting Behavior and Size of Crown Fires in the Northern Rocky Mountains 1991.

Scott, J. E. and Burgan, R. E., 2005. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. 72 p.

Sorensen, T., 1948. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content and its application to analyses of the vegetation on Danish commons. Videnski Selsk. Biol. Skr. 5: 1-34.

Sullivan, A. L., 2009a. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models. International Journal of Wildland Fire , 349-368.

Sullivan, A. L., 2009b. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. International Journal of Wildland Fire , 369-386.

Sullivan, A. L., 2009c. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. Int. J. Wildland Fire , 387-403.

Tucker, C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8, 127-150. doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0.