

## ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΤΑ ΙΟΝΙΑ ΝΗΣΙΑ ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΑΘΗΣΗΣ, ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Σταυρίδης Γεώργιος<sup>1,2\*</sup>, Ξόφης Παντελής<sup>3</sup>, Αποστολόπουλος Παντελής<sup>1</sup>, Κεφαλάς Γεώργιος<sup>4,3</sup>, Γαβριηλάτος Νίκος<sup>1</sup>, Ποϊραζίδης Κώστας<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Τμήμα Περιβάλλοντος, Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Μ. Μινώτου Γιαννοπούλου 26, 29100, Ζάκυνθος

<sup>2</sup>Systems Dynamics Τεχνική Εταιρία, Γαϊτάνι, 29100, Ζάκυνθος

<sup>3</sup>Τμήμα Δασολογίας & Φυσικού Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 1<sup>ο</sup> χλμ Δράμας Μικροχωρίου 66100, Δράμα

<sup>4</sup>Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Ελ. Βενιζέλου 70, 176 76 Καλλιθέα, Αττική

\*αλληλογραφία: geo.stavridis@lesd.gr

**Λέξεις-κλειδιά:** Τηλεπισκόπηση, random forest, δασικές πυρκαγιές, μηχανική μάθηση, μετρικές τοπίου

Οι φυσικοί βιότοποι αλλάζουν δραστικά από τις πυρκαγιές, ειδικά στα μεσογειακά οικοσυστήματα. Από την άλλη πλευρά, η υψηλή συχνότητα και ένταση των πυρκαγιών μπορεί να προκαλέσει αξιοσημείωτες διακυμάνσεις στα τοπία μετά την πυρκαγιά καθώς και στην αναγέννηση της βλάστησης, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει τη συνοχή και τις υπηρεσίες που παρέχονται από το οικοσύστημα. Η μελέτη αυτή επιχειρεί να αξιολογήσει πώς τα πρότυπα βλάστησης πριν από την πυρκαγιά επηρεάζουν τις δασικές πυρκαγιές στην περιοχή, εστιάζοντας στην έκταση της καμένης περιοχής και στην ένταση της καύσης. Επιλέχθηκε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα 20 σημαντικών καμένων περιοχών χρησιμοποιώντας εικόνες Landsat από το 1985 έως σήμερα. Αρχικά, το περίγραμμα κάθε καμένης περιοχής προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας μια αντικειμενοστραφή τεχνική ταξινόμησης και η δριμύτητα καύσης κάθε πολυγώνου πυρκαγιάς, χρησιμοποιώντας τον δείκτη dNBR, ταξινομήθηκε ως άκαυστο, χαμηλή, μέτρια ή υψηλή δριμύτητα.

Η μελέτη χρησιμοποίησε μοτίβα τοπίου πριν από την πυρκαγιά, δείκτες βλάστησης και γεωμορφολογικούς παράγοντες για να ερμηνεύσει τη συνολική έκταση και τις κατηγορίες δριμύτητας εντός της καμένης περιοχής. Με βάση δορυφορικές εικόνες και τον δείκτη NDBI, χρησιμοποιώντας μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση, δημιουργήθηκαν τρεις τύποι πυκνότητας δασών: πυκνή, μέτρια και ανοιχτή περιοχή. Υπολογίστηκαν τρεις μετρικές συνολικού τοπίου, μαζί με έξι μετρικές για κάθε κατηγορία πυκνότητας, συμπεριλαμβανομένων των Patch Density, Edge Density, Shape Index, Fractal Dimension Index, Percentage of Class Type, και Total (Class) Area. Το πακέτο R "landscapemetrics" χρησιμοποιήθηκε σε περιβάλλον R 4.3.3 για να υπολογιστούν οι μετρικές τοπίου (Hesselbarth et al., 2019).

Η μελέτη χρησιμοποίησε μηχανική μάθηση Random Forest (RF) για να εξετάσει τη σχέση μεταξύ των προτύπων δριμύτητας της πυρκαγιάς και των χαρακτηριστικών του τοπίου πριν από την πυρκαγιά (Liaw & Wiener, 2002). Οι επεξηγηματικές μεταβλητές περιελάμβαναν μετρικές τοπίου, δείκτες βλάστησης και γεω-τοπογραφικές μεταβλητές. Οι μεταβλητές απόκρισης περιελάμβαναν τη συνολική καμένη περιοχή και την έκταση κάθε κατηγορίας δριμύτητας καύσης. Για τον Variance Inflation Factor χρησιμοποιήθηκε (VIF) < 10 προκειμένου να αποτραπεί η πολυσυγγραμμικότητα και ελήφθησαν υπόψη μόνο μεταβλητές με VIF < 10.

Κάθε μεταβλητή απόκρισης είχε διαφορετική απόδοση στα μοντέλα RF. Με ολόκληρο το σύνολο δεδομένων ως επεξηγηματική ομάδα η συνολική καμένη έκταση ως κατηγορία απόκρισης, έδειξε μέτριο επίπεδο απόδοσης, στο 56,66% ενώ το  $R^2$  ανέβηκε με χρήση μόνο της ομάδας των μετρικών τοπίου (στο 65,54%, Συγκριτικά, η κατηγορία «υψηλής δριμύτητας» ξεπέρασε τις άλλες δύο ομάδες ( $R^2$ : 73% και 80,39%, αντίστοιχα για σύνολο δεδομένων και μετρικές τοπίου), με τη «μέτρια δριμύτητα» να φτάνει το 43,01% και 43,15% και την «χαμηλή δριμύτητα» να φτάνει το 17,29% και 25,4%. Μόνο λίγες από τις μεταβλητές του μοντέλου ήταν σημαντικές για την πρόβλεψη της έκτασης των καμένων περιοχών. Η ανάλυση των μοντέλων RF μόνο με τα άλλα σύνολα μεταβλητών (δείκτες βλάστησης και γεωτοπογραφικές μεταβλητές) έδειξε πολύ χαμηλή απόδοση στην ερμηνεία των πληροφοριών.

Η μετρική "Patch Richness Density" (PRD) αναδείχθηκε ως η πιο κομβική μεταβλητή σε όλα τα μοντέλα RF, παρουσιάζοντας σταθερή αρνητική επίδραση στην καμένη περιοχή. Σημειωτέον, αυτή η μετρική εμφάνισε πολύ υψηλή σημαντικότητα στην «συνολική έκταση» ( $r = -0,752, p < 0,01$ ), δεν είχε σημαντικότητα στην «υψηλή δριμύτητα» ( $r = -0,442$ ), ωστόσο διατήρησε πολύ υψηλή σημαντικότητα στη «μέτρια δριμύτητα» ( $r = -0,569, p < 0,01$ ) και ήταν σημαντική στη «χαμηλή δριμύτητας» ( $r = -0,530, p < 0,05$ ). Η «συνολική έκταση», σε συνδυασμό με την τυπική απόκλιση του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DTM), εμφάνισε μια εξαιρετικά σημαντική θετική συσχέτιση ( $r = 0,591, p < 0,01$ ), ενώ έδειξε αρνητική μη σημαντική συσχέτιση με τις ελάχιστες τιμές του δείκτη υγρασίας κανονικοποιημένης διαφοράς (NDMI) ( $r = -0,348$ ). Επιπλέον, η μετρική «Patch Density» αποδείχθηκε σημαντική και στα μοντέλα RF «υψηλής δριμύτητας» και «μέτριας δριμύτητας».

Η περιοχή που επηρεάστηκε από την υψηλή δριμύτητα παρουσίασε ισχυρή αρνητική συσχέτιση με την πυκνότητα των κατατμημάτων (PD) της «πυκνής βλάστησης» ( $r = -0,526, p < 0,05$ ), ενώ η μέση τιμή της κλίσης του εδάφους έδειξε σημαντικά θετική συσχέτιση ( $r = 0,522, p < 0,05$ ). Η περιοχή που επηρεάστηκε από υψηλή δριμύτητα έδειξε επίσης θετική συσχέτιση, αλλά όχι στατιστικά σημαντική, με την πολυπλοκότητα του fractal shape ( $r = 0,156$ ) και την πυκνότητα των ακμών (ED) των «πυκνών κατατμημάτων» ( $r = 0,285$ ). Ομοίως, στο μοντέλο RF «μέτριας δριμύτητας», η περιοχή μέτριας δριμύτητας, έδειξε μια εξαιρετικά σημαντική αρνητική συσχέτιση τόσο με την πυκνότητα του αραιού δάσους ( $r = -0,707, p < 0,01$ ) όσο και με την πυκνότητα ακμών της ανοιχτής περιοχής ( $r = -0,596, p < 0,01$ ). Στο μοντέλο RF «χαμηλής δριμύτητας», εκτός από το προαναφερθέν PRD, δύο άλλες μεταβλητές έδειξαν θετική συσχέτιση (αν και όχι

σημαντική) με την πολυπλοκότητα του fractal shape της πυκνής βλάστησης ( $r = 0,2$ ) και τη μέση τιμή του εδάφους με κλίση ( $r = 0,279$ ).

Οι μετρικές τοπίου, ιδιαίτερα το PRD, έχουν αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματικές στην εκτίμηση της έκτασης και της δριμύτητας των δασικών πυρκαγιών. Η αύξηση της πυκνότητας των διαφορετικών κατηγοριών βλάστησης σε μια περιοχή μειώνει τη συνολική καμένη έκταση όσο και τις αντίστοιχες κατηγορίες δριμύτητας. Η κατανόηση του αντίκτυπου αυτών των μετρικών στην ένταση καύσης της πυρκαγιάς βοηθά στην ανάπτυξη στρατηγικών μετριασμού του κινδύνου, όπως βελτιωμένες στρατηγικές πυρόσβεσης και στοχευμένη διαχείριση της βλάστησης.

Benson, N., & Key, C. H. (2006). *Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT. <https://www.researchgate.net/publication/241687027>

Hesselbarth, M. H. K., Sciaini, M., With, K. A., Wiegand, K., & Nowosad, J. (2019). *landscapemetrics*: an open-source R tool to calculate landscape metrics. *Ecography*, 42(10), 1648–1657. <https://doi.org/10.1111/ecog.04617>

Kolarik, N. E., Shrestha, N., Caughlin, T., & Brandt, J. S. (2024). Leveraging high resolution classifications and random forests for hindcasting decades of mesic ecosystem dynamics in the Landsat time series. *Ecological Indicators*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111445>

Liaw, A., & Wiener, M. (2002). *Classification and Regression by randomForest* (Vol. 2, Issue 3). <http://www.stat.berkeley.edu/>