

**UTICAJ ŠUMSKIH POŽARA NA SVOJSTVA ZEMLJIŠTA SA POSEBNIM OSVRTOM NA
SAVREMENE METODE UBLAŽAVANJA POSLEDICA**

**THE IMPACT OF FOREST FIRES ON SOIL PROPERTIES WITH A SPECIAL FOCUS ON MODERN MITIGATION
METHODS**

dr Tatjana GOLUBOVIĆ, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Fakultet zaštite na radu u Nišu, Republika
Srbija, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6725-752X>, tatjana.golubovic@znrfak.ni.ac.rs
Petar SIMONOVIĆ, Akademija strukovnih studija kosovsko metohijska, odsek Zvečan, Republika Srbija,
petar.simonovic@akademijakm.edu.rs

APSTRAKT

Šumski požari postaju sve učestaliji i intenzivniji, predstavljajući značajan problem za ekosisteme širom sveta, uključujući i Srbiju. Imajući u vidu klimatske promene i rast prosečnih godišnjih temperatura vazduha, problematika šumskih požara sve više dobija na značaju. U radu je dat pregled najznačajnijih uticaja požara na hemijska, fizička i biološka svojstva zemljišta, u zavisnosti od intenziteta, trajanja požara i vrste vegetacije. Pri požarima visokog intenziteta dolazi do gubitka organskog ugljenika i hranljivih materija, promene pH vrednosti, razgradnje stabilnih zemljišnih agregata, povećanja gustine zemljišta, povećanja njegove hidrofobnosti, što za posledicu ima smanjene infiltracije vode, povećanu eroziju i uništavanja biote zemljišta. U radu su prikazane i tehnologije značajne za predikciju i detekciju šumskih požara, sa posebnim naglaskom na potencijal novih tehnologija (npr. pametne senzorske mreže sa veštačkom inteligencijom) za rano otkrivanje u ruralnim područjima. Imajući u vidu značaj pravovremene primene stabilizacionih mera, u svrhu smanjenja gubitka hranljivih materija i erozije opožarenih površina, u radu su obrađene neke od najefikasnijih, poput malčiranja, postavljanja barijera, sadnje i konzervacione poljoprivrede.

Ključne reči: šumski požari, klimatske promene, degradacija zemljišta

ABSTRACT

Forest fires are becoming more frequent and intense, representing a significant problem for ecosystems around the world, including Serbia. Bearing in mind climate changes and the growth of average annual air temperatures, the problem of forest fires is gaining more importance. This paper provides an overview of the most significant effects of fire on the chemical, physical and biological properties of the soil, depending on the intensity, duration of the fire and the type of vegetation. During high-intensity fires, there is a loss of organic carbon and nutrients, a change of pH value, the breakdown of stable soil aggregates, an increase in soil density, an increase in its hydrophobicity, which results in reduced water infiltration, increased erosion and the destruction of soil biota. The paper also presents technologies important for the prediction and detection of forest fires, with special emphasis on the potential of new technologies (e.g. smart sensor networks with artificial intelligence) for early detection in rural areas. Bearing in mind the importance of the timely application of stabilization measures, in order to reduce the loss of nutrients and erosion of burnt areas, the paper deals with some of the most effective ones, such as mulching, barrier placement, planting and conservation agriculture.

Key words: forest fires, climate change, land degradation

UVOD

Šumski požari oduvek su bili prirodni faktori promene ekosistema, ali u poslednjim decenijama njihova učestalost, intenzitet i razmere značajno su porasle (1), što ih čini destruktivnim faktorom na globalnom nivou. Povećani rizik od požara direktno je povezan sa klimatskim promenama, odnosno sa višim temperaturama i ekstremnim sušama (1,2). Ove promene stvaraju sve pogodnije uslove za izbijanje i širenje požara, čineći ih

češćim i intenzivnijim. Stručnjaci predviđaju da će trajanje, intenzitet i učestalost požara nastaviti da se povećava, posebno u tropskim područjima (2,3).

Mehanizmi koji povezuju klimu i požare su složeni i međusobno povezani. Produžena suša je posebno značajan prediktor velikih šumskih požara, jer dugotrajni periodi bez padavina isušuju vegetaciju, stvarajući stanje u kojem je gorivo u šumama suvlje i lakše zapaljivo (2,4). Ovo je posebno problematično, jer visokointenzivni požari uništavaju svojstva zemljišta, dovodeći do isparavanja hranljivih materija, gubitka organske materije, promene strukture tla i povećane hidrofnosti (2). Na taj način dolazi do izražene degradacije zemljišta i gubitak hranljivih materija. Degradacija zemljišta, s druge strane, smanjuje njegovu sposobnost da zadrži vlagu, čineći ga još podložnijim budućim sušama i požarima, čime se stvara negativna povratna sprega.

Požari ostavljaju dubok trag na ekosistem, sa širokim spektrom ekoloških posledica. Vazduh je direktno zagađen emisijom štetnih gasova, dok kvalitet vode opada zbog oticanja pepela i zagađujućih materija (5). Istovremeno, požar utiče na ekologiju šuma promenom sastava vrsta i ukupnog biodiverziteta (2). Važno je naglasiti da je taj uticaj izuzetno složen. Na primer, nakon australskih megapožara 2019-2020. godine, zabeležen je kratkoročni porast broja vrsta (3), ali je ekstremna ozbiljnost požara ipak dovela do značajnog smanjenja raznolikosti među svim grupama. Ovo je posebno zabrinjavajuće za ekosisteme koji retko doživljavaju požare, kao što su prašume, jer su ranjivi na povećanu učestalost i intenzitet vatre, što može dovesti do trajne transformacije staništa i lokalnog izumiranja vrsta (3).

Nažalost, porast broja šumskih požara i površina zahvaćenih vatrom nije trend koji zaobilazi Srbiju, gde se broj požara značajno povećava tokom letnjih meseci (6). Iako su u periodu od 1990. do 2005. godine uništene velike površine šuma, alarmantne godine bile su 2007. i 2012. (6) Te 2007. godine zabeleženo je čak 28.546 požara na površini od 22.161 hektara (7), dok je 2012. godina, obeležena najdužim toplotnim talasima i najgorom sušom (preko 1.000 požara). Noviji podaci pokazuju da se ovaj problem nastavlja, sa ukupno 69.179 mapiranih požara od 2013. do 2023. godine (8). Posebno je zabrinjavajuće to što su ugrožena i zaštićena područja, kao što su Park prirode Golija, kao i nacionalni parkovi Tara, Đerdap i Kopaonik (6,9).

UTICAJ ŠUMSKIH POŽARA NA SVOJSTVA ZEMLJIŠTA

Šumski požari predstavljaju značajan izazov za ekosisteme jer menjaju biološke, hemijske i fizičke karakteristike šumskog zemljišta. Stepenn ovog poremećaja u velikoj meri zavisi od intenziteta, trajanja i učestalosti požara, kao i od količine raspoloživog goriva i samih svojstava zemljišta (2).

PROMENE HEMIJSKIH SVOJSTAVA ZEMLJIŠTA

Uticaj požara na svojstva zemljišta je složen i višeslojan, dajući različite rezultate u zavisnosti od intenziteta, trajanja, i učestalosti požara, kao i karakteristika samog zemljišta i goriva (2). Intenzitet požara, koji se meri kao oslobođena toplota po površini i vremenu, može imati niski (<100°C), srednji (do 250°C) ili visoki (>350°C) stepen (2,10). Treba istaći da sporo kretanje intenzivnog požara rezultira većom štetom na zemljištu (2,11). Ovo navodi na zaključak da nije samo temperatura odlučujuća, već i dužina izlaganja zemljišta toploti. Temperature od 850°C i više, koje nastaju u prisustvu velikih količina suvog goriva, mogu imati destruktivne efekte na svojstva zemljišta. Svaka izmena svojstava zemljišta je direktan pokazatelj stepena poremećaja ekosistema, a pored već navedenih faktora, značajnu ulogu igraju i količina goriva, kao i same karakteristike zemljišta, uključujući njegov tip i sadržaj vode i organske materije (2).

Hemijske promene u zemljištu spadaju među najznačajnije posledice požara, jer mogu imati dugoročne efekte na plodnost i funkcionisanje ekosistema. Jedan od najvažnijih pokazatelja kvaliteta zemljišta je sadržaj organskog ugljenika (SOC), koji se intenzivno proučava (2).

Promene u količini SOC-a variraju i zavise od faktora kao što su trajanje, vrsta biomase i količina vlage, kao i intenzitet požara. Gubitak SOC-a počinje na temperaturama od 200–250°C, dok se potpuno sagorevanje dešava na 460–500°C. Interesantno je da niskointenzivni požari mogu dovesti do kratkotrajnog povećanja SOC-a, jer nepotpuno sagorevanje organske materije dovodi do stvaranja pirogenog ugljenika, kao i zbog dodavanja pepela i razgradnje delimično izgorele biomase, dok visokointenzivni požari gotovo uvek rezultiraju značajnim

smanjenjem SOC-a, što može biti posledica sagorevanja organske materije, povećane mineralizacije, isparavanja i rastvaranja ugljenika usled visoke pH vrednosti (2).

Požari često dovode do promene pH vrednosti zemljišta. Niskointenzivni požari, praćeni taloženjem pepela, obično dovode do povećanja pH vrednosti. Do ovog fenomena dolazi kada lokalizovane temperature zemljišta iznad 200°C sagorevaju organsku materiju, čime se oslobađa ugljenik koji dovodi do formiranja pepela i povećanja alkalnosti (2). Step en ovog povećanja može biti značajan, ali njegov uticaj zavisi od početne pH vrednosti, sadržaja hranljivih materija u zemljištu i količine deponovanog pepela, što su sve faktori koji se moraju uzeti u obzir prilikom procene štete.

Hranljive materije su izuzetno osetljive na visoke temperature tokom požara. Azot (N) počinje da isparava već na 200°C (12), što nagoveštava da je gubitak azota, kao vitalne hranljive materije, gotovo neizbežan prilikom požara. Visokointenzivni požari značajno smanjuju rezerve hranljivih materija isparavanjem, što može dovesti do gubitka od 50–75% azota (N), 35–50% fosfora (P) i 25–50% magnezijuma (Mg). Međutim, niskointenzivni požari mogu dovesti do kratkotrajnog povećanja dostupnih hranljivih materija poput kalijuma (K^+), kalcijuma (Ca^{2+}), magnezijuma (Mg^{2+}), fosfata (PO_4^{3-}) i amonijuma (NH_4^+). Čak se i sadržaj ukupnog azota može povećati nakon niskointenzivnih požara, usled taloženja pepela bogatog azotom i veće stope mineralizacije (2).

PROMENE FIZIČKIH SVOJSTAVA ZEMLJIŠTA

Pored hemijskih, požari značajno utiču i na fizička svojstva zemljišta, što direktno menja njegovu strukturu, hidrološki režim i podložnost eroziji. Iako tekstura zemljišta nije lako podložna promenama, jer pesak, mulj i glina imaju visok temperaturni prag (13), visokointenzivni požari mogu je modifikovati.

Naime, prag temperature za glinu (400–800°C) je znatno niži nego za pesak i mulj (1414°C), zbog čega su čestice glinene osetljivije na promene u teksturi (14). Stoga, visokointenzivni požari mogu uticati na smanjenje sadržaja gline i povećanje udela peska i mulja, što je posledica uništenja kristalne strukture gline.

Ipak, većina istraživanja nije ukazala na značajne promene u teksturi zemljišta, uprkos destrukciji čestica gline (2). To se dešava zbog razaranja kristalne gline, što dovodi do agregacije finijih čestica i formiranja većih, grubljih čestica peska i mulja (2). Dakle, umesto da se sadržaj gline jednostavno smanji, njene čestice se grupišu i ponašaju kao veće čestice, što objašnjava zašto ukupna tekstura često ostaje nepromenjena, iako se sama struktura menja. Stabilnost agregata zemljišta određuje otpornost zemljišta na raspadanje. Temperature između 30 i 60°C mogu pozitivno uticati na stabilnost agregata usled termičke transformacije seskvioksida koji drže zajedno čestice gline, i organske materije koje deluju kao vezivni agensi sa česticama zemljišta. Međutim, kada temperature pređu 200°C, dolazi do sagorevanja organske materije i promene strukture zemljišta (2). Ipak, i u ovom slučaju se mogu uočiti kontradiktorni rezultati, pri čemu u nekim istraživanjima nije primećena značajna promena nakon požara niskog intenziteta, dok je u drugim zabeleženo povećanje stabilnosti agregata (2). Ovakva neslaganja i kontradiktornosti u istraživanjima ukazuju na to da uticaj požara na zemljište nije jednostavan proces koji prati određeni obrazac, već zavisi od mnogih faktora koji se teško kontrolišu, stoga je neophodno sagledati širu sliku sa svim njenim kontradiktornostima, umesto da se zaključci donose na osnovu pojedinačnih primera.

Šumski požari takođe negativno utiču na zapreminsku gustinu zemljišta. Iako većina studija pokazuje da visokointenzivni požari povećavaju zapreminsku gustinu usled raspada agregata i uništenja organske materije, neki istraživači su zabeležili suprotne rezultate, uključujući smanjenje gustine nakon požara ili odsustvo značajnog uticaja (2). Ovo povećanje gustine dovodi do smanjenja poroznosti i slabije infiltracije vode (2), što ima direktne posledice na hidrološki režim i podložnost zemljišta eroziji.

Hidrofobnost zemljišta je važna fizička osobina koja utiče na kretanje vode. Uticaj požara na hidrofobnost zemljišta je promenljiv, može se intenzivirati ili ublažiti (2). Visokointenzivni požari povećavaju hidrofobnost, što dovodi do smanjene infiltracije vode, a hidrofobnost se potpuno smanjuje na temperaturama iznad 300°C. Kada je hidrofobnost visoka, smanjuje se infiltracija vode, što dovodi do povećanog površinskog oticanja i povećane erozije zemljišta (2). Erozija zemljišta je ozbiljan ekološki problem koji se može pogoršati klimatskim promenama i požarima (5,10). Iako su i drugi faktori bitni, može se zaključiti da su šumski požari jedan od glavnih uzročnika gubitka hranljivih materija putem erozije (2).

PROMENE BIOLOŠKIH SVOJSTAVA ZEMLJIŠTA

Biološka svojstva zemljišta, uključujući mikroorganizme i enzimsku aktivnost, izuzetno su osetljiva na toplotu i promene izazvane požarima. Zagrevanje tla tokom požara utiče na ove procese na dva načina: može direktno da uništi organizme ili da indirektno utiče na njih kroz izmene organske materije i regeneraciju biljaka (2). Dakle, požar ne utiče samo na biljke koje gore, već i na čitav podzemni ekosistem, čiji je oporavak dug i kompleksan proces.

Visoko zagrevanje zemljišta ($>120^{\circ}\text{C}$) je štetno za ekosistem, jer temperatura potrebna za uništavanje većine biološke materije varira od 50 do 120°C . Zbog toga je nakon šumskih požara zabeležen drastičan pad mikrobne biomase (2). Smanjenje mikrobne biomase može se objasniti gubitkom samih mikroorganizama, manjom dostupnošću hranljivih materija i prisustvom jedinjenja koja inhibiraju rast gljivica (2).

Međutim, neke studije su pokazale i povećanje mikrobne biomase, što se pripisuje taloženju mineralnog pepela i obilju labilnog ugljenika (2). Ovo još jednom potvrđuje da je uticaj požara na ekosistem kompleksan, te se ne mogu izvoditi jednostavni i linearni zaključci.

Požar može da izazove značajnu promenu u mikrobnoj zajednici, gde dominacija bakterija može zameniti zajednicu gljivica (2). Ova promena je verovatno rezultat povećanja pH vrednosti i dostupnosti hranljivih materija nakon požara, što direktno utiče na uslove za život i razvoj različitih vrsta mikroorganizama.

Pored toga, požar utiče i na enzimsku aktivnost u izgorelim zemljištima, što se vidi kroz smanjenje aktivnosti β -glukozidaze i kisele fosfataze (2). Smanjena aktivnost enzima β -glukozidaze povezana je sa samim požarom i obilnim prisustvom hranljivih materija iz pepela (2). Sa druge strane, smanjenje aktivnosti kisele fosfataze može biti posledica oštećenja ili smanjenja mikrobne biomase, kao i visokog sadržaja dostupnog fosfora koji se taloži na zemljište putem pepela. Uticaj požara, dakle, ne ogleda se samo kroz sastav vrsta, već i kroz ključne biološke procese u zemljištu, što ima dugoročne posledice na njegovu plodnost i ekosistem u celini.

INOVATIVNI PRISTUPI U PREVENCIJI ŠUMSKIH POŽARA

Glavni element u smanjenju destruktivnog uticaja požara jeste njihova prevencija, koja se bazira na ranom otkrivanju i smanjenju rizika od širenja. Iako postoje brojne široko poznate metode prevencije požara (poput izgradnje protivpožarnih puteva, kontrolisanog paljenja i edukacije stanovništva), u radu će biti prikazane novije metode prevencije koje imaju sve veći značaj i efikasnost.

Pametne senzorske mreže, posebno one opremljene CO_2 senzorima, postaju sve važnije za rano upozoravanje. Ovi sistemi skupljaju podatke i šalju ih na udaljene računarske sisteme radi brze obrade i analize (15). Istraživanja su pokazala da eksperimenti sa mrežama CO_2 senzora i modelima veštačke inteligencije mogu značajno da poboljšaju brzinu i tačnost detekcije požara u odnosu na jednostavnije metode (15). Razvoj IoT tehnologija u okviru 6G infrastrukture obećava značajno unapređenje mehanizama ranog upozoravanja, naročito u ruralnim područjima (16), koja su i najveći izazov za detekciju zbog svoje nepristupačnosti i manjka nadzora. Ipak, izazovi u efikasnom otkrivanju požara pomoću distribuiranih senzora i dalje postoje, a tekuće analize realnih podataka se rade u cilju da se na osnovu njih formulišu praktične smernice za razvoj budućih IoT Sistema (16).

SANACIJA I RESTAURACIJA ZEMLJIŠTA NAKON POŽARA

Brza primena stabilizacionih mera je izuzetno važna za ublažavanje erozije i gubitka plodnosti zemljišta nakon požara (17). Na osnovu pregleda velikog broja istraživanja potvrđeno je da svi tretmani za umanjeње erozije, kao što su pokrivanje površine malčem, postavljanje barijera, sadnja biljaka i hemijski tretmani, značajno utiču na smanjenje erozije nastale nakon požara (18). Uopšteno govoreći, primena ovih mera pokazala se efikasnijom od netretiranja, posebno na lokacijama gde je stopa erozije visoka (18).

Jedna od najefikasnijih metoda za ublažavanje posledica požara jeste malčiranje, odnosno pokrivanje zemljišta organskim ostacima poput slame ili drveta (5). Ova tehnika je pokazala značajan uticaj na smanjenje oticanja vode i gubitka sedimenta. Istraživanja ukazuju da malčiranje slamom može smanjiti oticanje vode za 20%, a

eroziju zemljišta za 60% zahvaljujući poboljšanoj infiltraciji vode (19). Modeli su pokazali da se oticanje može smanjiti i do 7%, dok gubitak sedimenta može biti manji za 40%, zavisno od konkretnih uslova i perioda nakon požara (5).

Primena ostataka seče šume značajno je smanjila gubitak organske materije (91%), azota (94%) i fosfora (95%) tokom pet godina nakon požara (17). Iako su dugoročni efekti na vegetaciju suptilni, malčiranje nema negativan uticaj na raznovrsnost i brojnost biljnih vrsta, kao ni na pokrivenost tla (20). Sadnice drveća su, međutim, rasle brže i bile više na tretiranim površinama, uz nešto veću pokrivenost travama. Iako nije uticao na ukupnu gustinu sadnica, malč je pokazao specifične efekte na različite vrste, pa su tako neke vrste borova bile manje zastupljene, dok su duglazije bile brojnije na malčiranim područjima (20). Iako je malčiranje veoma efikasno, ono nije jedina dostupna metoda.

Pored malčiranja, postoje i druge tehnike za očuvanje zemljišta. Jedna od njih je postavljanje fizičkih barijera, kao što su trupci ili žbunje, koje pomažu u sprečavanju erozije. Takođe, skarifikacija ili oranje zemljišta mogu da poboljšaju infiltraciju vode (5). Održavanje i obnova vegetacije u priobalnim područjima posebno su značajni, jer ove biljne trake efikasno zadržavaju sediment (5). Na kraju, primena konzervacione poljoprivrede sa smanjenim intenzitetom obrade zemljišta takođe doprinosi smanjenju erozije (5).

Ekološka restauracija predstavlja skup aktivnosti namenjenih obnovi degradiranih ekosistema, što uključuje i ponovnu sadnju autohtonih i endemičnih biljnih vrsta (5). Iako je prevencija požara osnovna, ona se može posmatrati i kao alat za smanjenje erozije, smanjujući je za 33%. Konačno, kombinovanje različitih metoda sanacije daje najbolje rezultate. Udruženi uticaj malčiranja, održavanja priobalne vegetacije i smanjena obrada zemljišta, pokazao se kao veoma efikasan u ublažavanju erozije zemljišta, smanjujući je do 50% u uslovima klimatskih promena i povećane učestalosti požara (5).

ZAKLJUČAK

Šumski požari, čija se učestalost i intenzitet povećavaju zbog klimatskih promena, predstavljaju značajnu pretnju za ekosisteme na globalnom i lokalnom nivou, što je evidentno i u Srbiji. Ovi požari pokreću složenu i višeslojnu degradaciju zemljišta, koja obuhvata hemijske, fizičke i biološke promene.

Promene u hemijskim svojstvima, poput gubitka organskog ugljenika i hranljivih materija, direktno utiču na plodnost tla. Ipak, važno je imati na umu da niskointenzivni požari mogu imati i suprotan efekat, što ukazuje na složenost ovog fenomena. Fizičke promene, kao što su promene u teksturi, stabilnosti agregata i zapreminskoj gustini, utiču na hidrološki režim i podložnost zemljišta eroziji, što vodi do dalje degradacije. Konačno, biološka svojstva, uključujući mikroorganizme i enzimsku aktivnost, izuzetno su osetljiva na toplotu, što ima dugoročne posledice na ekosistem u celini.

Da bi se ublažile ove destruktivne posledice, neophodan je multidisciplinarni pristup. To podrazumeva inovativne metode prevencije, kao što su pametne senzorske mreže i veštačka inteligencija, koje omogućavaju rano otkrivanje požara, posebno u nepristupačnim ruralnim područjima. Pored prevencije, ključna je i brza primena stabilizacionih mera nakon požara. Kombinovanje tehnika poput malčiranja, postavljanja barijera i obnove priobalne vegetacije, pokazalo se najdelotvornijim u smanjenju erozije i gubitka plodnosti.

Na kraju, može se reći da uticaj požara na zemljište nije jednostavan proces, već složena pojava koja zahteva holistički pristup. Kombinujući moderne tehnologije za prevenciju, kao i proverene metode sanacije, mogu se efikasno zaštititi ekosistemi od sve veće pretnje i osigurati njihov dugoročni opstanak i održiv razvoj.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije na osnovu sporazuma br. 451-03-137/2025-03/200148 g13 sa Univerzitetom u Nišu, Fakultetom zaštite na radu u Nišu.

LITERATURA

1. Jolly WM, Cochrane MA, Freeborn PH, et al. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nat Commun*. 2015;6(1):7537. doi:10.1038/ncomms8537
2. Agbeshie AA, Abugre S, Atta-Darkwa T, Awuah R. A review of the effects of forest fire on soil properties. *J For Res*. 2022;33(5):1419-1441. doi:10.1007/s11676-022-01475-4
3. Gorta SBZ, Callaghan CT, Samonte F, et al. Multi-taxon biodiversity responses to the 2019–2020 Australian megafires. *Glob Change Biol*. 2023;29(23):6727-6740. doi:10.1111/gcb.16955
4. Živanovic S, Gocic M. THE INFLUENCE OF CLIMATIC CONDITIONS ON THE OCCURRENCE OF LARGE FOREST FIRES: A CASE STUDY OF STARA PLANINA NATURE PARK IN 2007 AND 2019. *J Appl Life Sci Environ*. 2023;56(2(194)/2023):195-209. doi:10.46909/alse-562095
5. Pastor AV, Nunes JP, Ciampalini R, et al. Projecting Future Impacts of Global Change Including Fires on Soil Erosion to Anticipate Better Land Management in the Forests of NW Portugal. *Water*. 2019;11(12):2617. doi:10.3390/w11122617
6. Novkovic I, Markovic GB, Lukic D, et al. GIS-Based Forest Fire Susceptibility Zonation with IoT Sensor Network Support, Case Study—Nature Park Golija, Serbia. *Sensors*. 2021;21(19):6520. doi:10.3390/s21196520
7. Tošić I, Mladjan D, Gavrilov MB, et al. Potential influence of meteorological variables on forest fire risk in Serbia during the period 2000–2017. *Open Geosci*. 2019;11(1):414-425. doi:10.1515/geo-2019-0033
8. Vranić P, Mišić N. SPATIAL DISTRIBUTION PATTERNS OF WILD-FIRES INCIDENTS IN SERBIA BASED ON VIIRS 375 M DATA FOR THE PERIOD 2013–2023. *Facta Univ Ser Work Living Environ Prot*. 2024;(0):087-096. doi:10.22190/FUWLEP240605008V
9. Živanović S, Gocić M, Tošić I. Vulnerability of Central Serbian national parks to wildfires. *Időjárás*. 2024;128(1):99-120. doi:10.28974/idojaras.2024.1.6
10. Caon L, Vallejo VR, Ritsema CJ, Geissen V. Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. *Earth-Sci Rev*. 2014;139:47-58. doi:10.1016/j.earscirev.2014.09.001
11. Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*. 2005;143(1):1-10. doi:10.1007/s00442-004-1788-8
12. Knicker H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. *Biogeochemistry*. 2007;85(1):91-118. doi:10.1007/s10533-007-9104-4
13. Alcañiz M, Outeiro L, Francos M, Farguell J, Úbeda X. Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgrí Massif, Catalonia, Spain). *Sci Total Environ*. 2016;572:1329-1335. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.01.115
14. Neary DG, Ryan KC, DeBano LF. *Wildland Fire in Ecosystems: Effects of Fire on Soils and Water*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station; 2005:RMRS-GTR-42-V4. doi:10.2737/RMRS-GTR-42-V4
15. De Rango A, Furnari L, Cortale F, Senatore A, Mendicino G. Wildfire Early Warning System Based on a Smart CO₂ Sensors Network. *Sensors*. 2025;25(7):2012. doi:10.3390/s25072012
16. Anthony B, A EM, Anthea L, et al. Assessing the Efficacy of IoT-based Forest Fire Detection: a Practical Use Case. Published online July 12, 2024. doi:10.48550/arXiv.2407.09117
17. Prats SA, Serpa D, Santos L, Keizer JJ. Effects of forest residue mulching on organic matter and nutrient exports after wildfire in North-Central Portugal. *Sci Total Environ*. 2023;885:163825. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.163825
18. Girona-García A, Vieira DCS, Silva J, Fernández C, Robichaud PR, Keizer JJ. Effectiveness of post-fire soil erosion mitigation treatments: A systematic review and meta-analysis. *Earth-Sci Rev*. 2021;217:103611. doi:10.1016/j.earscirev.2021.103611
19. Lucas-Borja ME, Parhizkar M, Zema DA. Short-Term Changes in Erosion Dynamics and Quality of Soils Affected by a Wildfire and Mulched with Straw in a Mediterranean Forest. *Soil Syst*. 2021;5(3):40. doi:10.3390/soilsystems5030040
20. Bontrager JD, Morgan P, Hudak AT, Robichaud PR. Long-term vegetation response following post-fire straw mulching. *Fire Ecol*. 2019;15(1):22. doi:10.1186/s42408-019-0037-9