



CIPOP - CENTAR ZA ISTRAŽIVANJE
POŽARA OTVORENOG PROSTORA

FIREURISK – RAZVOJ HOLISTIČKE STRATEGIJE ZA UPRAVLJANJE POŽARNIM RIZICIMA

Broj ugovora: 101003890	
Identifikator poziva: H2020-LC-CLA-2018-2019-2020	
Tema:	LC-CLA-15-2020 Smanjenje rizika od požara raslinja: korak prema pristupu integriranog upravljanja požarima raslinja u EU
Instrument:	RIA

Priručnik sa smjernicama za vatrogasce za suočavanje s ekstremnim požarima, požarima u graničnom području naseljenih i divljih (prirodnih) područja i požarima na velikim geografskim širinama i visinama

Identifikator dokumenta:	Diseminacija rezultata projekta FirEUrisk za području Republike Hrvatske.
Rok za izradu dokumenta:	31.03.2025.
Datum izrade dokumenta:	01.11.2024.
Verzija:	1.0
Glavni dokument:	D2.6 Handbook with guidelines for fire fighters to face to extreme fires, fires in WUI and fires in high latitudes/ altitudes
Autor glavnog dokumenta i glavni partner ovih istraživanja:	Sébastien Lahaye, Domingos Xavier Viegas, Luis Mario Ribeiro, Miguel Almeida, Tiago Rodrigues, Antonio Jorge Ferreira, Ana Isabel Miranda, Diogo Lopes, Tobias Osswald, Johan Sjöström, Rick McRae, Kiki Yunianti, Fanny Verhilac
Prijevod, obrada slika i prilagodba za Hrvatsku:	Darko Stipaničev, Maja Braović, Damir Krstinić, Ljiljana Šerić, Marin Bugarić, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, Split, Hrvatska
Radni paket:	WP2 - Smanjenje rizika od požara radi poboljšanja zaštite
Zadatak:	Zadatak 2.3. Smanjenje rizik od ekstremnih požara
Razina širenja:	<input checked="" type="checkbox"/> PU: Javno <input type="checkbox"/> CO: Povjerljivo, samo za članove Konzorcija (uključujući Službe Komisije)



FIREURISK - DEVELOPING A HOLISTIC, RISK-WISE STRATEGY FOR EUROPEAN WILDFIRE MANAGEMENT

Grant Agreement Number: 101003890	
Call identifier: H2020-LC-CLA-2018-2019-2020	
Topic:	LC-CLA-15-2020 Forest Fires risk reduction: towards an integrated fire management approach in the E.U.
Instrument:	RIA

D2.6 Handbook with guidelines for fire fighters to face to extreme fires, fires in WUI and fires in high latitudes/ altitudes

Deliverable Identifier:	D2.6.
Deliverable Due Date:	30/03/2024
Deliverable Submission Date:	29/05/2024
Deliverable Version:	final
Lead partner:	SAFE
Authors of Main Deliverable:	Sébastien Lahaye, Domingos Xavier Viegas, Luis Mario Ribeiro, Miguel Almeida, Tiago Rodrigues, Antonio Jorge Ferreira, Ana Isabel Miranda, Diogo Lopes, Tobias Osswald, Johan Sjöström, Rick McRae, Kiki Yunianti, Fanny Verhilac
Translation, image preparation and Adaptation for Croatia:	Darko Stipaničev, Maja Braović, Damir Krstinić, Ljiljana Šerić, Marin Bugarić, Faculty of Electrical Engineering, Machine Engineering and Naval Architecture, University of Split, Split, Croatia
Work Package:	WP2 - Fire risk reduction to improve protection
Task:	Task 2.3 Improve response to reduce risk of high-impact fires
Dissemination Level:	<input checked="" type="checkbox"/> PU: Public <input type="checkbox"/> CO: Confidential, only for members of the Consortium (including the Commission Services)

Sažetak

Rizik od požara raslinja u Europi se znatno povećao posljednjih godina, uzrokujući nove izazove za spasioce pojavom:

- ekstremnih požara i ekstremnog ponašanja požara,
- požara u graničnim područjima naseljenih i šumskih područja (engl. WUI – Wildland/Urban Interface),
- požara na višim nadmorskim visinama i geografskim širinama koje prije nisu bile toliko pogođene.

Promatrajući i predviđajući takve razvojne događaje, znanstvenici stalno dolaze do novih saznanja o rizicima ovakvih požara. Međutim, prijenos tih saznanja do vatrogasaca i pretvaranje u smjernice je nedovoljno zbog relativno slabe suradnje između istraživačke i operativne zajednice. Osim toga, zajednica vatrogasaca u Europi je vrlo fragmentirana – s lokalnim, odjelnim, regionalnim i nacionalnim vlastima – što čini razinu obuke vrlo neujednačenom. Kao rezultat, vatrogasci su nedovoljno informirani i pripremljeni za suočavanje s novim izazovima povezanim s požarima raslinja, što smanjuje njihovu učinkovitost i sigurnost.

Ovaj dokument prikuplja rezultate istraživanja o ponašanju požara koje su proveli FirEURisk partneri. Istraživanje je predstavljeno u pojednostavljenom obliku kako bi bilo dostupno praktičarima. Prva poglavlja detaljno objašnjavaju osnove ponašanja požara, a zatim i ekstremna ponašanja požara. Sljedeća poglavlja opisuju požare u specifičnim područjima kao što je granično područje naseljenih i divljih (prirodnih) područja, visoke nadmorske visine i geografske širine, te mehanizam emisije i širenja dima. Završna poglavlja analiziraju metodologije gašenja požara u različitim kontekstima te pružaju sigurnosne preporuke i studije slučaja.

Kako bi se postigli najbolji rezultati nakon dostavljanja ovog dokumenta, FirEURisk konzorcij potiče prevođenje dokumenta na lokalne jezika, kako bi se olakšalo prenošenje ovih saznanja u nacionalne priručnike i obuke. Ovaj dokument je primjer takve diseminacije na hrvatski jezik.

Odricanje od odgovornosti

Sadržaj ove publikacije isključiva je odgovornost izdavača i ne predstavlja nužno stavove Europske komisije ili njenih službi. Iako se informacije sadržane u dokumentima smatraju točnima, autori ili bilo koji drugi sudionik FirEURisk konzorcija ne daju nikakva jamstva u vezi s ovim materijalom, uključujući, ali ne ograničavajući se na implicirana jamstva prikladnosti za određenu svrhu. Ni FirEURisk konzorcij niti bilo koji od njegovih članova, službenika, zaposlenika ili agenata neće biti odgovorni za nemar ili bilo kako drugačije zbog bilo kakve netočnosti ili propusta u ovom dokumentu. Bez umanjivanja općenitosti prethodno navedenog, ni FirEURisk konzorcij niti bilo koji od njegovih članova, službenika, zaposlenika ili agenata neće biti odgovorni za bilo kakve izravne ili neizravne ili posljedične gubitke ili štete uzrokovane ili proizašle iz bilo koje informacije, savjeta ili netočnosti ili propusta u ovom dokumentu.

Copyright poruka

© FirEURisk konzorcij, 2021.-2025. Ovaj tekst sadrži originalni neobjavljeni rad, osim gdje je to jasno navedeno. Priznanje prethodno objavljenim materijalima i rada drugih napravljeno je putem odgovarajućeg citiranja, navođenja ili oboje. Reprodukcija je dopuštena uz navođenje izvora:

Sébastien Lahaye, Domingos Xavier Viegas, Luis Mario Ribeiro, Miguel Almeida, Tiago Rodrigues, Antonio Jorge Ferreira, Ana Isabel Miranda, Diogo Lopes, Tobias Osswald, Johan Sjöström, Rick McRae, Kiki Yunianti, Fanny Verhilac, Del. D2.6 Handbook with guidelines for fire fighters to face to extreme fires, fires in WUI and fires in high latitudes/ altitudes, FirEURisk H2020 EU project, 2024. (hrvatski prijevod i prilagodba Darko Stipaničev, Maja Braović, Damir Krstinić, Ljiljana Šerić, Marin Bugarić, FESB Sveučilište u Splitu, 2024.)

Sadržaj

Sažetak	3
Sadržaj	4
1. Uvod	9
1.1. Budući trendovi rizika od požara u Europi	9
1.2. Potreba za smjernicama za gašenje ekstremnih požara	9
1.3. Doprinosi	10
2. Osnove ponašanja požara	12
2.1. Faktori koji utječu na širenje požara	12
2.2. Požarna meteorologija	12
2.2.1. Meteorološki faktori	12
2.2.1.1. Uvjetni faktori	12
2.2.1.2. Određujući faktori	13
2.2.2. Opasnost od požara	14
2.2.3. Opasnost od požara i sadržaj vlage mrtvog goriva	16
2.3. Svojstva goriva	17
2.3.1. Gorive čestice	17
2.3.1.1. Veličina čestice	17
2.3.1.2. Oblik	18
2.3.1.3. Kemijski sastav	18
2.3.1.4. Gustoća	18
2.3.1.5. Sadržaj vlage	18
2.3.2. Gorivi slojevi i tipovi goriva	19
2.3.2.1. Količina goriva	20
2.3.2.2. Visina goriva	20
2.3.2.3. Zbijenost	20
2.3.2.4. Kontinuitet	21
2.3.2.5. Vlažnost izumiranja	21
2.3.3. Gorivi modeli	21
2.4. Uloga terena (topografija)	22
2.4.1. Nagnutost terena	23
2.4.2. Ekspozicija padine: izloženost suncu i vjetru	23
2.4.3. Nadmorska visina: promjene temperature i uzorci vjetra	23
2.4.4. Zakrivljenost terena	23
2.4.5. Grebeni	24

2.4.6. Složena topografija	24
2.5. Vrste i načini širenja požara	24
2.5.1. Vrste požara.....	24
2.5.2. Načini širenja površinskih požara	25
3. Ekstremno ponašanje požara.....	26
3.1. Karakterizacija ekstremnog ponašanja požara	26
3.1.1. Dinamično ponašanje požara	26
3.1.2. Intenzitet požara.....	26
3.2. Nepovoljan razvoj ekstremnog ponašanja požara	27
3.2.1. Spot požari	27
3.2.2. Požari u krošnjama	28
3.2.3. Eruptivni požari.....	30
3.2.4. Spojeni požari	31
3.2.5. Jako veliki požari	32
3.2.6. Vatrene vrtlozi	32
3.2.7. Naglo rasplamsavanje požara (eksplozivna požarna događanja)	32
4. Specifični požari – kako njihovi izazovi utječu na gašenje.....	35
4.1. Požari u graničnom području naseljenih i divljih (prirodnih) područja	35
4.1.1. Prirodna goriva – vegetacija	35
4.1.2. Umjetna goriva	36
4.1.3. Ljudi	36
4.2. Požari na velikim nadmorskim visinama	37
4.2.1. Ponašanje vođeno topografijom	37
4.2.2. Sigurnosni problemi.....	37
4.2.3. Izazovi pristupa i odgovora	37
4.2.4. Utjecaj požara na velikim nadmorskim visinama.....	38
4.3. Požari u visokim geografskim širinama	38
4.3.1. Goriva i pejzaži.....	38
4.3.2. Demografski čimbenici	39
4.3.3. Izazovi i poboljšanja uočena tijekom posljednjih desetljeća	39
4.3.4. Čimbenici za budućnost.....	40
5. Emisija i raspršivanje dima	41
5.1. Emisija dima	41
5.2. Raspršivanje dima	42
6. Metodologije gašenja požara.....	45

6.1. Strategije i tehnike gašenja požara	45
6.1.1 Strategija gašenja požara.....	46
6.1.2. Tehnike gašenja požara	46
6.2. Gašenje požara u graničnom području naseljenih i divljih (prirodnih) područja (WUI)	47
6.2.1. Gašenje požara u graničnom području divljih i urbanih zona.....	47
6.2.2. Zaštita ljudi i zgrada	48
6.3. Gašenje ekstremnih požara.....	49
7. Sigurnost pri gašenju požara	51
7.1. Zdravstveno stanje i višestruka učinkovitost.....	51
7.2. Utjecaji dima na vidljivost i zdravlje	52
7.2.1. Mehanizmi razvoja i nastanka bolesti (etiopatogeneza)	52
7.2.2. Dijagnostika	53
7.2.3. Liječenje.....	55
7.2.4. Zaključci	55
7.3. Pravila sigurnosti	55
7.3.1. Standardna pravila za gašenje požara i situacije na oprezu	55
7.3.2. LCES – LACES koncepti	57
7.3.3. Dodatne preporuke za požare na padinama	60
8. Analiza slučajeva	61
8.1. Veliki požari	61
8.1.1. Požar Pedrógão Grande, Portugal	61
8.1.2. Požar Garrocho (Serra da Estrela), Portugal	63
8.2. Nesreće.....	65
8.2.1. Nesreća u Freixo de Espada-à-Cinta, Portugal.....	65
8.2.2. Nesreća u Famalicão da Serra, Portugal	68
9. Literatura	70

Tablica kratice

KRATICA	ORIGINALNA DEFINICIJA	HRVATSKI PRIJEVOD
ABC	Airway, Breathing, Circulation	dišni putevi, disanje, cirkulacija
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry	Agencija za registar otrovnih tvari i bolesti
BMI	Body Mass Index	indeks tjelesne mase
BUFE	Blow-Up Fire Event	dogadjaj eksplozivnog požara
CDC	Centers for Disease Control and Prevention	Centri za kontrolu i prevenciju bolesti
CFWIS	Canadian Fire Weather Index System	Kanadski sustav meteorološkog indeksa požara
DC	Drought Code	pokazatelj vlažnosti krupnog goriva
DMC	Duff Moisture Code	pokazatelj vlažnosti srednjeg goriva
EFB	Extreme Fire Behaviour	ekstremno ponašanje požara
EFB	Eruptive Fire Behaviour	eruptivno ponašanje požara
EFFIS	European Forest Fire Information System	Europski informacijski sustav o šumskim požarima
EMC	Equilibrium Moisture Content	ravnotežni sadržaj vlage
EPA	Environmental Protection Agency	Agencija za zaštitu okoliša
EWE	Extreme Wildfire Event	ekstremni požar raslinja
FDI	Fire Danger Index	indeks opasnosti od požara
FFDI	Forest Fire Danger Index	indeks opasnosti od šumskih požara
FFMC	Fine Fuel Moisture Code	pokazatelj vlažnosti finog goriva
FWI	Fire Weather Index	indeks meteorološke opasnosti od požara
GFDI	Grassland and Forest Fire Danger Index	indeks opasnosti od požara travnjaka i šuma
HR	Heart Rate	otkucaji srca
IAP	Incident Action Plan	akcijski plan za slučaj incidenta
ISI	Initial Spread Index	indeks početnog širenja
LCES	Lookouts, Communications, Escape routes, and Safety zones	vidikovci, komunikacije, rute za bijeg i sigurnosne zone
LSC	Land Surface Curvature	zakrivljenost terena
MSDS	Material Safety Data Sheet	sigurnosno-tehnički list materijala
NFDRS	National Fire Danger Rating System	Nacionalni sustav ocjenjivanja opasnosti od požara
NFFL	Northern Forest Fire Laboratory	Sjeverni laboratorij za šumske požare
NIH	National Institute of Standards and Technology	Nacionalni institut za standarde i tehnologiju
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health	Nacionalni institut za sigurnost i zdravlje na radu
NPR	National Public Radio	Nacionalni javni radio
NWCG	National Wildfire Coordination Group	Nacionalna koordinacijska skupina za šumske požare
OSHA	Occupational Safety and Health Administration	Uprava za zaštitu na radu
PM	Particulate Matter	čestice
ROS	Rate of Spread	brzina širenja

SAV	Surface Area to Volume	odnos površina prema volumenu
SDS	Safety Data Sheet	sigurnosno-tehnički list
SSD	Safe Separation Distance	sigurna udaljenost razdvajanja
TOS	Time of Spread	vrijeme širenja
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization	Organizacija Ujedinjenih naroda za obrazovanje, znanost i kulturu
USDA	United States Department of Agriculture	Ministarstvo poljoprivrede Sjedinjenih Država
US	United States	Sjedinjene Države
UFI	Urban forest interface	granično područje naseljenog i šumskog područja
UTC	Coordinated Universal Time	koordinirano univerzalno vrijeme
WUI	Wildland Urban Interface	Granično područje naseljenog i divljeg (prirodnog) područja

1. Uvod

1.1. Budući trendovi rizika od požara u Europi

Povećanje učestalosti i ozbiljnosti šumskih požara u posljednjih nekoliko godina dovelo je do razornih posljedica za zajednice i ekosustave. Ovaj će se trend nastaviti i pogoršavati u nadolazećim godinama, posebno analiziranim u okviru aktivnosti provedenih u radnom paketu 3 projekta FirEURisk (FIREURISK, 2024).

Nedavna istraživanja pokazala su slijedeće:

- rizik će se proširiti po širem teritoriju Europe i zahvatiti veća područja (Jones et al., 2022.)
- najizloženije područje je mediteranska regija koja će se suočiti sa sve ekstremnijim požarima (Turco et al., 2018.).

Istodobno, sve ranjivija granična područja naseljenih i divljih područja (WUI) izložena su pojačanom riziku (Almeida et al., 2023.; Zikeloglou et al., 2023.).

Na europskoj razini svi ti trendovi ukazuju na nove izazove za vatrogasce kojima treba odgovarajuće znanje, adekvatne strategije i taktike za suočavanje s požarima u novim požarno ugroženim područjima, ekstremnim ponašanjima požara i požarima u WUI zonama.

1.2. Potreba za smjernicama za gašenje ekstremnih požara

S operativne perspektive, agencije zadužene za odgovor na šumske požare čine fragmentiran ekosustav u Europi i šire (Lahaye et al., 2018a.). Ovisno o državama, nacionalne, regionalne ili lokalne službe za šume i požare upravljaju svojim resursima prema vlastitim procedurama. Te procedure mogu biti usklađene s nacionalnim standardima, ali su uglavnom utemeljene na lokalnim kontekstima i iskustvima s požarima. To iskustvo varira od jedne regije do druge. Ekonomski i ljudski resursi također variraju, pa se razina znanja i formalnosti razlikuje od jedne službe do druge.

S istraživačke perspektive, već nekoliko timova u Europi i svijetu radi na razvoju najboljih spoznaja i razumijevanju ponašanja požara i cijelog ciklusa upravljanja rizikom od požara. Snaga projekta FirEURisk leži u okupljanju brojnih istraživačkih timova koji rade u tom području i pružanju mosta između njih i operativnih službi.

Svrha ovog dokumenta je prikupiti skup koncepata i smjernica koje bi trebale biti dio kurikuluma za obuku vatrogasaca i drugih agenata koji se moraju nositi s problemom šumskih požara kako bi se upravljalo rizikom od požara u svim njegovim komponentama. S obzirom na hitnost i važnost osposobljavanja vatrogasaca u vezi s pojavom požara raslinja, poseban naglasak bit će stavljen na suzbijanje požara u slučaju ekstremnih požara. Poboljšana obuka i bolja svijest o situaciji ključni su aspekti sigurnosti, što značajno doprinosi smanjenju smrtnosti i ljudskih gubitaka povezanih s požarima.

Gašenje ekstremnih požara nosi iznimne opasnosti za vatrogasce. Ove situacije često su obilježene visokim temperaturama, intenzivnim plamenom, masovnim širenjem iskri i brzim, neočekivanim ponašanjem požara, stvarajući opasne uvjete za osoblje koje sudjeluje u gašenje požara. Požari u WUI zonama također stvaraju izazovne situacije. Vatrogasci se moraju rasporediti kako bi zaštilili živote, bez obzira na razinu rizika i ponašanje požara, koje je često nepredvidljivo. To ponašanje uvelike ovisi o rasporedu vegetacije i ljudskih naselja, uključujući plinske spremnike, automobile i druge vrlo zapaljive ili eksplozivne materijale.

Koncept požara koji pogađa sučelje urbanih i divljih područja (WUI) široko je istraženo u projektu FirEURisk: analizirane su prošle pojave, procijenjena izloženost stanovništva i imovine te navedena

ranjivost zajednica, kuća i infrastrukture. Stoga ovaj dokument također izvlači rezultate ovog istraživanja kako bi olakšao vođenje operativnih postupaka u WUI zonama.

Autori su također kontaktirali brojne operativce, kako bi istražili koje specifične tehnike najbolje odgovaraju različitim situacijama, uključujući kontekst širenja rizika prema višim geografskim širinama u Europi i većim nadmorskim visinama.

Sadržaj ovog dokumenta temelji se na kurikulumu koji su neki od njegovih autora koristili u obuci vatrogasaca i drugih operativnih agenata u vezi s gašenjem požara pod ekstremnim uvjetima ponašanja požara, kako bi se postigla bolja sigurnost.

Glavni doprinosi ovog dokumenta koristit će se za izradu „Europskog priručnika za vatrogasce“ na kojem se radi. Ovaj priručnik mogao bi biti ključan za podizanje svijesti, koristeći pojednostavljeni pristup, ali istražujući ključne aspekte požara raslinja. Svi uključeni u vatrogastvo i civilnu zaštitu imali bi koristi od ovih koncepata i tema. To je posebno važno s aspekta sigurnosti jer su mnogi inovativni uvidi o ekstremnom ponašanju požara, ovdje prikazani, proizašli iz analize stvarnih nesreća i velikih požara koji su prouzročili značajan gubitak života.

1.3. Doprinosi

Ovaj dokument temelji se na doprinosima brojnih timova projekta. Rad se najprije temelji na opsežnom iskustvu tima ADAI u istraživanju nesreća povezanih s požarima u kojima su nastradali i civili i vatrogasci (Viegas et al., 2001.; Viegas et al., 2005.; Viegas et al., 2008.; Viegas, 2004., 2009., 2013., 2017.; Ribeiro et al., 2020.), te na proučavanju velikih požara koje su naručile nacionalne vlasti (Viegas et al., 2012.; Viegas et al., 2013.; Viegas et al., 2017.; Viegas et al., 2019.). Istraživanje o ekstremnom ponašanju požara obuhvaća neke inovativne koncepte o ponašanju požara, koji su prikazani i spomenuti u nastavku, ali su ovdje sažeti radi dosljednosti:

- (i) koncept dinamičkog ponašanja požara (engl. *Dynamic Fire Behaviour*) (Viegas, 2004.; Viegas & Pita, 2004.)
- (ii) koncept eruptivnog požara (engl. *Eruptive Fire*) (Viegas, 2006.; Viegas & Simeoni, 2011.)
- (iii) koncept spojenih požara (engl. *Junction Fire*) (Raposo et al., 2018.) i
- (iv) oscilatorno ponašanje požara (engl. *Oscillatory Fire Behaviour*) (Viegas et al., 2021).

Prvi autor ovog dokumenta također je prenio i materijale iz svojih studija o sigurnosti vatrogasaca (Lahaye et al., 2018b.; Lahaye et al., 2018c.) i iz postojećih obuka i treninga za analitičare ponašanja požara u Francuskoj. Poglavlje o metodologijama gašenja požara temelji se na rezultatima intervjua i upitnika provedenih među europskim vatrogascima koje su proveli mlađi istraživači SAFE Clustera. Konačno, stariji istraživači iz RISE instituta (Švedska), Sveučilišta u Aveiru (Portugal) i Sveučilišta New South Wales (Australija) dali su specifične doprinose ovom dokumentu.

.....

Napomena prevodilaca: Izvorni dokument je u pojedinim dijelovima prilagođen lokalnom području Hrvatske, a dodali smo i neka naša iskustva do kojih smo došli tijekom 25 godina bavljenja simuliranjem požara u okviru aktivnosti Centra za istraživanje požara otvorenog prostora (CIPOP, 2024.). Komentare smo uglavnom unijeli u fusnotama ili smo posebno naglasili da se radi o našem dodatku. Za određene izraze smatrali smo korisnim navesti i njihov engleski naziv u zagradama uz kraticu engl.

Na početku bismo prije svega željeli precizno definirati tri osnovna pojma koji se u hrvatskom govornom području često krivo koriste:

- požar otvorenog područja

- požar raslinja (požar vegetacije) i
- šumski požar.

Požar otvorenog prostora je svaki požar koji se ne događa unutar zatvorenog prostora. Požari otvorenog prostora uključuju požare vegetacije, ali i požare građevina i drugih struktura koje su se cijele zapalile, pa nije potrebno kod gašenja požara ući u unutrašnji prostor. Fizikalna događanja kod požara otvorenog prostora vezana su s izgaranjem u slobodnoj atmosferi gdje je dotok kisika neograničen, za razliku od požara zatvorenog prostora kada se izgaranje javlja u prostoru ograničenom plohamama (zidovima) što može rezultirati i posebnim pojavama (na primjer povratni plameni udar).

Požar kod kojeg je primarna goriva tvar isključivo vegetacija, a ne ljudske tvorevine (koja mogu i izgorjeti u požaru ukoliko su okružene vegetacijom, ali nisu primarna goriva tvar koja prenosi požar), u engleskoj se literature uobičajava nazivati **Wildfire**. Uz pojam Wildfire bitno je i to da je gorenje nekontrolirano, pa se najčešće definira kao požar koji gori nekontrolirano u prirodnom okružju (na primjer u šumi, na travnjaku, itd). Direktni prijevod ovog naziva bio bi **požar u divljini**. On strogo uzevši ne bi uključivao kontrolirano gorenje na poljoprivrednim površinama, već isključivo gorenje divlje vegetacije (trave, grmova, šibljaka, šume), ali i poljoprivrednih kultura ako se nađu na putu takvog požara. **Miše Miloslavić**, nekadašnji vatrogasni zapovjednik Dubrovačko-neretvanske županije i autor edukativne literature o požarima predložio je za ovu pojavu hrvatski naziv **požar raslinja** što smatramo da je najprimjereniji pojam pojmu Wildfire. Ponekad se koristi i pojam **požar vegetacije**, s obzirom da su riječi vegetacija i raslinje sinonimi, s tim da je naziv vegetacija pojam latinskog porijekla i više se koristi u znanstvenom kontekstu, a raslinje je pojam slavenskog porijekla koji se više koristi u svakodnevnom životu, pa se zbog toga u našim tekstovima i mi priklanjamo pojmu raslinje.

Šumski požar je po samom značenju riječi požar u kojem gori šuma, dok **požar raslinja** uključuje i ostale prevladavajuće oblike raslinja (trava, grmlje, šibljaci), ali i poljoprivrednih kultura ako se nađu na putu takvog požara. Iako se pojam šumski požar najčešće pojavljuje u svakodnevnoj komunikaciji, smatramo da je ispravnije koristiti pojam požar raslinja ili požar vegetacije.

.....

2. Osnove ponašanja požara

2.1. Faktori koji utječu na širenje požara

Širenje požara ovisi o različitim faktorima koje, prema (Viegas, 2004.), možemo pojednostavljeno grupirati u četiri skupine:

1. topografija (teren)
2. vegetacija (gorivi materijal)
3. meteorologija i
4. vrijeme.

Iako ovi faktori nisu međusobno neovisni, moguće je analizirati svaki od njih posebno kako bismo bolje razumjeli njihovu ulogu u širenju požara. U nastavku će detaljno biti obrađene topografija, vegetacija i meteorologija. Faktor „vrijeme” odnosi se na kronološko vrijeme i naglašava dinamički karakter procesa širenja požara, posebno u slučaju ekstremnih požara.

U poglavljima 3 do 6 ovi će faktori biti analizirani kako bi se pružila zajednička podloga konceptata i ideja za bolje razumijevanje ekstremnog ponašanja požara (engl. *EFB – Extreme Fire Behavior*).

U ovom pristupu gašenje požara nije uzeto u obzir, no kao što ćemo vidjeti, što su uvjeti povoljniji za odgovor, to su veće šanse da će gašenje požara ograničiti njegovo širenje.

2.2. Požarna meteorologija

2.2.1. Meteorološki faktori

Meteorologija je stanje atmosfere koja okružuje Zemlju, a opisuje se nizom parametara ili svojstava koja se stalno mijenjaju u vremenu i prostoru. Ta svojstva, kada se opisuju s obzirom na njihov utjecaj na požar raslinja, čine **požarnu meteorologiju**. Meteorološki faktori koji izravno ili neizravno utječu na ponašanje požara mogu se podijeliti u dvije skupine:

- i) uvjetni faktori i
- ii) određujući faktori.

2.2.1.1. Uvjetni faktori

Uvjetni faktori su određujući i direktno vezani sa zapaljenjem požara raslinja jer određuju količinu i sadržaj vlage u sitnom (finom) gorivu s kojim požar počinje. U ovu skupinu utjecajnih faktora prije svega spadaju:

- oborine (precipitacija)
- temperatura zraka i
- relativna vlažnost zraka.

Oborine, izražene u milimetrima (litri kiše po četvornom metru), utječu na vlažnost tla i na vlažnost goriva (živog i mrtvog). Trajnost oborina na početku hidrološke godine (listopad na sjevernoj hemisferi) potiče rast sitne vegetacije koja podržava širenja požara tijekom ljeta. Međutim, izostanak oborina tijekom mjeseci koji prethode ljetu, uz vrijednosti znatno niže od klimatskog prosjeka (prosječne količine oborina koje karakteriziraju regiju tijekom razdoblja od 30 godina), može dovesti do sušnog razdoblja ili manjka vode, što pogoduje suhoći šumskih goriva, koja su tada dostupna za širenje požara i pridonose većim spaljenim površinama tijekom ljetnih požara (Viegas & Viegas, 1994.).

Temperatura zraka mijenja se tijekom dnevnog ciklusa zbog učinka sunčevog zračenja, ali se može mijenjati i zbog ulaska toplijih ili hladnijih zračnih masa. Tipično, temperatura raste tijekom dana, a opada na kraju dana. Ovaj dnevni ciklus od velike je važnosti za šumske požare jer izravno utječe na zapaljivost šumskih goriva s obzirom na to da količina topline potrebna za podizanje temperature goriva do točke zapaljenja ovisi o njihovoj početnoj temperaturi, o temperaturi okolnog zraka i o sadržaju vlage u gorivu, koji uvelike ovisi o temperaturi zraka (Schroeder & Buck, 1970.).

Relativna vlažnost zraka (RH) je postotak mase vodene pare u zraku u odnosu na masu pare potrebnu za zasićenje kada zrak ne može više apsorbirati vodenu paru. Vrijednost RH jednaka 100% odgovara zasićenoj atmosferi, u kojoj dolazi do kondenzacije, dok vrijednost od 30% ili manje odgovara vrlo suhom zraku, što također pogoduje sušenju goriva. RH također ima dnevni ciklus, ali ima tendenciju smanjivanja tijekom dana i povećanja na kraju dana, tako da se mijenja obrnuto od temperaturnog ciklusa.

2.2.1.2. Određujući faktori

Određujući faktori su oni koji izravno utječu na širenje požara. Ova skupina uključuje:

- vjetar i
- stabilnost atmosfere.

Vjetar se općenito definira kao horizontalno kretanje atmosferskog zraka (atmosferski vjetar) koje karakteriziraju sljedeće komponente:

- brzina vjetra (ili intenzitet) u m/s i
- smjer (odakle vjetar dolazi), izražen u stupnjevima u odnosu na sjever.

Brzina vjetra i smjer mijenjaju se od jedne točke do druge, a u određenom trenutku kontinuirano se mijenjaju tijekom vremena (spora varijacija). Postoji i varijacija zbog turbulencije vjetra, koja se očituje naglim promjenama brzine vjetra u kratkom vremenskom razdoblju (udari). Ove varijacije imaju izravan utjecaj na uvjete širenja požara.

Profil brzine vjetra raste s visinom (na tlu je nula i raste dok ne dosegne maksimalnu vrijednost na vrhu sloja). Međutim, u slučaju šumskog požara, ovaj profil može se promijeniti **zbog vjetra izazvanog požarom**, što može dovesti do brzog razvoja požara čak i ako je atmosferski vjetar slab. Dakle, u šumskom požaru vjetar se može definirati kao zbroj atmosferskog vjetra i vjetra izazvanog požarom.

Stabilnost atmosfere karakterizira promjena temperature zraka u vertikalnom smjeru, izmjerena njezinim temperaturnim gradijentom ili stopom promjene, dT/dz [$^{\circ}\text{C}/\text{m}$], što određuje je li atmosfera:

- stabilna
- neutralna ili
- nestabilna.

Stabilnost atmosfere može poticati ili potiskivati vertikalno kretanje zraka. Toplina požara generira vertikalno gibanje, barem blizu površine, ali tako uspostavljena konvektivna cirkulacija izravno je pod utjecajem stabilnosti zraka (Schroeder & Buck, 1970.). Usisavanje zraka u požar na nižim razinama ima izrazit učinak na intenzitet požara. Također, na mnoge neizravne načine, stabilnost atmosfere utječe na ponašanje požara, na primjer, vjetrovi imaju tendenciju biti turbulentni i isprekidani kada je atmosfera nestabilna, a ovaj tip strujanja zraka uzrokuje nepredvidljivo ponašanje požara (Schroeder & Buck, 1970.) koje je detaljnije objašnjeno u poglavlju 3 ovog Priručnika.

2.2.2. Opasnost od požara

Opasnost od požara¹ (engl. *Fire Danger*) označava fizičku vjerojatnost da će požar započeti i širiti se (UNISDR, 2009.). Opasnost od požara izražava se kao **indeks opasnosti od požara** (engl. *Fire Danger Index*) koji se procjenjuju u meteorološkim sustavima za prognozu požara ili sustavima opasnosti od požara. Ti se sustavi temelje na meteorološkim čimbenicima i njihovom utjecaju na sadržaj vlage u šumskim gorivima.

U svijetu se koriste različiti sustavi procjene opasnosti od požara kojima se integriraju meteorološke i informacije o gorivoj materiji u jednu ili manji broj mjera (Dowdy et al., 2009.). Te se mjere mogu primijeniti na regije radi izdavanja upozorenja ili lokalno kako bi se procijenila težina suzbijanja pojedinačnog požara ili kompleksa požara (Dowdy et al., 2009.).

Primarni sustavi opasnosti od požara koji se obično koriste u planovima prevencije i procjene rizika od požara diljem svijeta su:

- **Australski McArthurov indeks opasnosti od šumskih požara (FFDI)** (McArthur, 1967.) - u Australiji se FFDI široko koristi za prognozu utjecaja vremenskih prilika na ponašanje požara, a Australski meteorološki ured redovito izdaje prognoze za Indeks opasnosti od požara u travnjacima i šumama (GFDI i FFDI) za potrebe vatrogasnih službi (Dowdy et al., 2009.).
- **Američki Nacionalni sustav ocjene opasnosti od požara (NFDRS)** (Deeming et al., 1978.; Bradshaw et al., 1984.) - prvi put uveden 1964., ažuriran je 1972., 1978., 1988. i 2016. kako bi integrirao novija istraživanja i poboljšao obradu podataka (NWCG, 2021a.); kombinira učinke postojećih i očekivanih stanja odabranih čimbenika opasnosti od požara u jedan ili više kvalitativnih ili numeričkih indeksa koji odražavaju potrebe za zaštitom područja (USDA/Forest Service, 2023.).
- **Kanadski meteorološki indeks opasnosti od požara (CFWIS)** (Van Wagner, 1987.); rezultat je godina primijenjenih istraživanja provedenih u Kanadi. Razvijen je 1970. godine s revidiranim verzijama izdanima 1976., 1984. i 1987. (Dowdy et al., 2009.). CFWIS je sveobuhvatan sustav alata dizajniran za procjenu čimbenika okoliša koji utječu na zapaljenje, širenje i ponašanje šumskih požara (NWCG, 2021a.) i dovoljno je prilagodljiv da se može primijeniti u zemljama s vrlo različitim klimatskim uvjetima u odnosu na Kanadu (Dowdy et al., 2009.).

Kratko ćemo predstaviti CFWIS jer on čini zajednički jezik za europsku operativnu zajednicu za pristup opasnosti od požara.

CFWIS, temeljen na verziji iz 1987. (Van Wagner, 1987.), procjenjuje sadržaj vlage mrtvih goriva pomoću kombinacije dnevnih meteoroloških podataka u 12 sati po lokalnom vremenu (temperatura, relativna vlažnost, oborine i vjetar). Sustav računa tri koda vlage goriva, svaki s različitim stopama sušenja, nominalnom dubinom goriva i nominalnim količinama goriva:

- i) **FFMC – pokazatelj vlažnosti finog goriva** (engl. *Fine Fuel Moisture Code*) predstavlja sadržaj vlage sitnog goriva i lišća na šumskom tlu
- ii) **DMC – Pokazatelj vlažnosti srednjeg krupnog goriva** (engl. *Duff Moisture Code*) predstavlja sadržaj vlage rastresitog razgrađenog organskog materijala i

¹ Pojam **opasnost** (engl. *Danger*) je apstraktni pojam vezan s percepcijom. Opasnost sama za sebe ne postoji. Definira se kao subjektivna i socijalna percepcija i procjena fizikalnih i ne-fizikalnih faktora koji mogu imati negativni utjecaj. Opasnost nastaje kao rezultat sinergije konstantnih i promjenjivih faktora temeljenih na ljudskoj percepciji. U odnosu na požare raslinja opasnost od požara raslinja je rezultat konstantnih i promjenjivih faktora vezanih s zapaljenjem, širenjem, teškoćom gašenja i utjecaja vatre na okolinu.

- iii) **DC – Pokazatelj vlažnosti krupnog goriva** (engl. *Drought Code*) predstavlja sadržaj vlage dubokog kompaktnog organskog materijala umjerene dubine.

Ti se pokazatelji izračunavaju u dnevnim koracima i uključuju vrijednost iz prethodnog dana kao ulaz u vrijednost tekućeg dana (Dowdy et al., 2009.).

Kombinacija ovih kodova proizvest će meteorološki indeks opasnosti od šumskih požara:

- i) **ISI – Indeks početnog širenja vatre** (engl. *Initial Spread Index*) procjenjuje kombinirani utjecaj brzine vjetra i FFMC-a na širenje požara
- ii) **BUI – indeks prikladnosti materijala za gorenje ili kako se češće naziva indeks ukupnog goriva** (engl. *Build-Up Index*) je kombinacija DMC-a i DC-a, koji predstavljaju raspoloživost dubljih ili većih goriva i
- iii) **FWI – meteorološkog indeksa opasnosti od šumskih požara** (engl. *Fire Weather Index*) glavni je produkt sustava. FWI je kombinacija ISI-a i BUI-a, što predstavlja vršni dnevni intenzitet širenja požara izraženu kao brzinu oslobađanja energije po jedinici duljine linije požara (Van Wagner, 1987.).

Povećanje FWI-a odgovara povećanju opasnosti od požara, a obično se klasificira prema pet klasa: vrlo mala, mala, umjerena, velika i vrlo velika.

U mnogim europskim zemljama FWI je prihvaćen jer je pokazao dobru učinkovitost kao reprezentativan sustav opasnosti od požara u usporedbi s drugim sustavima opasnosti od požara (Viegas et al., 1999.). Međutim, usvajanje FWI-a ponekad zahtijeva prilagodbu postojećih praksi (npr. Alexander, 2008.) pa ga je potrebno kalibrirati ga prema lokalnim podacima, što se obično postiže analizom povijesnih podataka o vremenskim uvjetima i povijesnim zapisima o požarima (npr. De Groot et al., 2005.; Viegas et al., 2004.; Alves et al., 2018.).

Tablica 1 prikazuje FWI klase definirane mrežom EFFIS (Europski sustav informacija o šumskim požarima) kao metodu za procjenu razine opasnosti od požara na usklađen način diljem Europe (EFFIS/JRC, 2023.)². Međutim, s obzirom na različite klimatske uvjete u Europi, EFFIS objavljuje dva indikatora koja pružaju informacije o lokalnoj/privremenoj varijabilnosti FWI-a u usporedbi s povijesnim nizom od približno 30 godina (EFFIS/JRC, 2023.).

Tablica 1. Klase opasnosti od požara za FWI u Europi definirane od strane EFFIS-a. Izvor: EFFIS: EFFIS/JRC (2023).

Klase opasnosti od požara	FWI
mala	< 11.2
umjerena	11.2 - 21.3
velika	21.3 – 38.0
vrlo velika	38.0 – 50.0
ekstremna	50.0 – 70.0
Vrlo ekstremna	> 70.0

Klasa "vrlo ekstremna" uvedena je 2021. godine kako bi se bolje razlikovao stupanj opasnosti od požara u mediteranskoj regiji tijekom ljetnih mjeseci (EFFIS/JRC, 2023.).

² FWI u Hrvatskoj računa DHMZ (https://meteo.hr/podaci.php?section=podaci_agro¶m=pozarind), ali se njegove klase razlikuju od EFFIS klasa i temelje na FWI i BUI: (FWI < 5, BUI < 49) = vrlo mala, (4 < FWI < 9, 48 < BUI < 86) = mala, (8 < FWI < 17, 85 < BUI < 119) = umjerena, (16 < FWI < 33, 118 < BUI < 159) = velika, (32 < FWI, 158 < BUI) = vrlo velika.

2.2.3. Opasnost od požara i sadržaj vlage mrtvog goriva

Promjene vremena snažno utječu na sadržaj vlage mrtvog goriva (materijali koji leže na šumskom tlu) jer se mijenjaju u skladu s atmosferskim uvjetima (Chuvieco et al., 2010.). Ako mrtva goriva postaju suša sklonija su zapaljenju. Sadržaj vlage u mrtvom gorivu ključni je element ponašanja požara i jedan od najčešće korištenih te najstarijih pokazatelja u predviđanju opasnosti od požara (Carmo et al., 2022.). Sadržaj vlage u živim vrstama obično se ne uključuje u sustave opasnosti od požara jer ga je teže procijeniti na temelju meteoroloških podataka u usporedbi s vlagom mrtvih goriva (Chuvieco et al., 2014.). Promjena vlažnosti goriva koja utječe na razvoj ozbiljnih požara može se najjednostavnije uočiti na promjeni pokazatelja vlažnosti finog goriva (FFMC) (Carmo et al., 2022.). FFMC je izravno povezan sa sadržajem vlage u sitnom mrtvom gorivu kao što su mrtve iglice bora (m_f) prema Jednadžbi 1 koju je definirao Van Wagner (1987.):

$$FFMC = 59.5 \times \frac{250.0 - m_f}{147.2 + m_f} \quad (1)$$

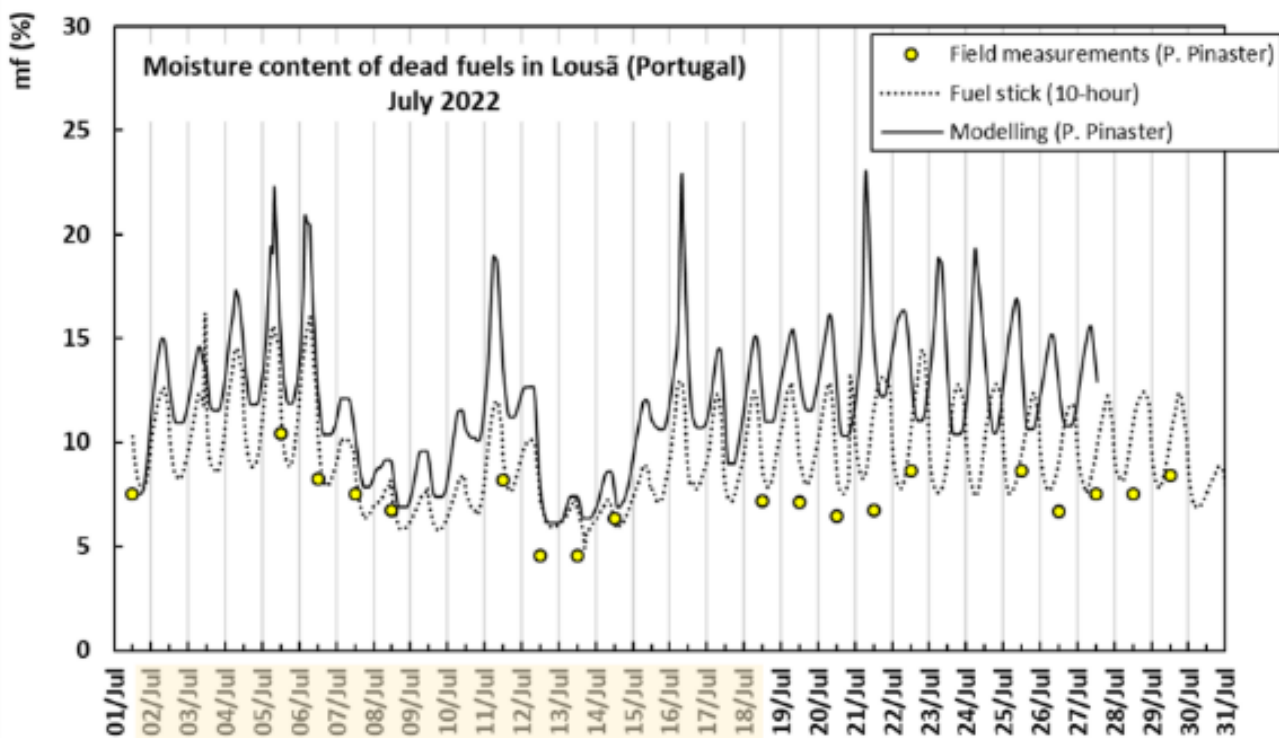
Sadržaj vlage u sitnom mrtvom gorivu mijenja se obrnuto proporcionalno s FFMC-om. Te promjene FFMC-a uključene su u ISI i, posljedično, u FWI, koji je konačni izlazni parametar sustava povezan s procjenom potencijale opasnosti od požara. Kada je sadržaj vlage u mrtvom gorivu nizak (a FFMC visok), požari lako započinju, a vjetar i drugi čimbenici mogu uzrokovati brzo i intenzivno širenje požara (što odgovara visokom FWI-u). Vlažnost mrtvog goriva obično se kreće između 3% i 30% (Ribeiro, 2011.). Nedavna istraživanja pokazala su da niska vlaga sitnog goriva može odrediti kada se mogu pojaviti veliki požari, što sugerira bliske odnose između pragova vlage i prijelaza ponašanja požara (Carmo et al., 2022.). Kada je vrijednost vlage niža od 5%, postoji velika vjerojatnost da će šumski požar pokazati ekstremna obilježja ponašanja požara (Viegas et al., 2017.). Promjena vlage tijekom velikih požara ključna je za razumijevanje ekstremnih događaja (Viegas et al., 2017.). Čak i tijekom noći, kada se učinkovitost gašenja požara tradicionalno poboljšava povećanjem relativne vlažnosti i smanjenjem temperature zraka, korisno je znati da li sadržaj vlage raste ili opada. Rastući trend sve sušijih i toplijih noći (uzrokovanih na primjer toplinskim valovima) i, posljedično, izostanak oporavka vlage, može dovesti do intenzivnijih požara tijekom noći, čije ponašanje može biti podcijenjeno u tom razdoblju.

Sadržaj vlage u mrtvom gorivu može se:

- mjeriti na terenu (npr. MCFIRE/ADAI, 2022.; NWCG, 2021b.)
- procijeniti pomoću štapića za vlagu goriva (npr. van der Kamp et al., 2017.) i
- procijeniti neizravno pomoću različitih modela (Viney, 1991.).

Sitna mrtva goriva mogu biti u približnoj ravnoteži s neposrednim okolišem (npr. Lopes et al., 2014.). Ravnotežni sadržaj vlage (engl. *EMC - Equilibrium Moisture Content*) gorivog elementa u određenim stalnim uvjetima okoliša je sadržaj vlage koji će element postići ako ostane dovoljno dugo u tim uvjetima (Viney, 1991.). Osim nakon kiše, razumno točna procjena njihove vlažnosti i, stoga, njihove zapaljivosti može se dobiti iz EMC-a koji odgovara neposrednoj temperaturi zraka i vlažnosti u okolini (Schroeder & Buck, 1970.).

Na **slici 1** prikazana je promjena sadržaja vlage u sitnim mrtvim gorivima u Lousã – središnjoj regiji Portugala – tijekom srpnja 2022. godine. Ovo razdoblje obilježio je opsežan toplinski val koji je zahvatio Portugal (2. srpnja - 18. srpnja) i zemlje zapadne Europe, te iznimno djelovao na sezonu šumskih požara. Kao primjer promjene vlage za različite metode, slika prikazuje: vlagu iglica bora izmjerenu na terenu gravitacijskom metodom, vlagu izmjerenu senzorom za vlagu goriva (CS506 - senzor za vlagu štapića od 10 sati) te vlagu procijenjenu za iglice *Pinus pinaster* prema modelu koji je predložio (Lopes et al., 2014.) pomoću meteoroloških podataka (temperatura i relativna vlažnost zraka).



Slika 1. Sadržaj vlage u mrtvom gorivu (mf) u Lousã tijekom srpnja 2022.

Legenda: Mjerenja na terenu: mf iglica bora (*Pinus pinaster*) na terenu; Štapić za gorivo: mf izmjeren senzorom za vlagu goriva (CS506 10-satni); Modeliranje: mf procijenjen za iglice bora prema (Lopesu, 2014.). Označeno razdoblje (2.srpnja-18.srpnja 2022.): toplinski val. (Ilustracija autora)

2.3. Svojstva goriva

Kod požara raslinja, prirodna vegetacija obično se smatra “gorivom” potrebnim za procese izgaranja. Fizička i kemijska svojstva svakog specifičnog goriva određuju njegovu lakoću zapaljenja i održavanje izgaranja. U ovom poglavlju opisana su glavna svojstva koja karakteriziraju prirodna goriva. Specifičnosti goriva koja se mogu pronaći u sučelju urbanih i divljih područja bit će detaljnije opisana u poglavlju 4.1.

Goriva materija se obično klasificira prema 2 parametra:

- Prema **vegetacijskom stanju**, dijeleći gorivu materiju na živa goriva (bilje, grmlje, stabla) i mrtva goriva (suho ili otpalo lišće, suha trava, otpale grane, itd.). Smatra se da mrtva goriva imaju veći utjecaj na širenje površinskih požara.
- Prema **vertikalnim slojevima goriva** koji se često nazivaju i 'stratum', dijeleći gorivi materijal na podzemna goriva, površinska goriva i goriva u krošnjama.

2.3.1. Gorive čestice

Pojedinačne gorive čestice, koje tvore bilo koju vrstu goriva, imaju nekoliko različitih karakteristika koje različito pridonose procesima zapaljenja i izgaranja. Na razini čestice, najvažnija svojstva šumskih goriva su veličina čestice, oblik, kemijski sastav, gustoća i sadržaj vlage.

2.3.1.1. Veličina čestice

Veličina čestica (engl. *Particle Size*) je svojstvo goriva koje možda i najviše utječe na izgaranje i ponašanje požara (Byram, 1959.), zato što manjim česticama treba manje energije ili vremena da se zapale. Veza između veličine čestica i sadržaja vlage u gorivu je također vrlo izražena. Prema izvornoj, neobjavljenoj klasifikaciji Georgea Byrama iz 1963. (Byram & Nelson, 2015.), koja je kasnije usvojena za

Nacionalni sustav ocjene opasnosti od požara SAD-a (Bradshaw et al., 1984.), goriva su podijeljena prema njihovom "vrijednosnom intervalu sušenja". Vrijednosni interval definira se kao "vrijeme potrebno da gorivo izgubi približno dvije trećine svog početnog sadržaja vlage". U jednostavnim terminima, ako je vlaga gorive čestice u ravnoteži s okolišem (EMC, već spomenut u prethodnom dijelu), tj. nema dobitaka ili gubitaka, vrijednosni interval te čestice odgovara prosječnom vremenu koje bi joj trebalo da ponovno postigne tu ravnotežu ako bi došlo do promjene uvjeta okoliša.

Kategorije koje se uzimaju u obzir nazvane su prema prosječnom vremenskom intervalu potrebnom za postizanje ravnoteže:

- 1 sat – čestice manje od 6 mm (iglice, lišće, trave)
- 10 sati – čestice veličine 6-25 mm (tanke grane i stabljike grmlja)
- 100 sati – čestice veličine 25-75 mm (grane) i
- 1000 sati – čestice veće od 75 mm (debele grane i debla).

2.3.1.2. Oblik

Oblik (engl. *Shape*) se najčešće izražava kao omjer površine i volumena (engl. *SAV – Surface area-to-volume*) koji predstavlja omjer između vanjske površine čestice i njezinog volumena, obično u cm^2/cm^3 (cm^{-1}) ili m^2/m^3 (m^{-1}). Omjer površine prema volumenu određuje prikladnost čestice za izgaranje, jer količina energije koju može primiti po jedinici vremena raste s povećanjem izložene površine (Rothermel, 1972.). Čestice goriva s velikim omjerom SAV brže se zapale od onih s relativno malim omjerom SAV. Na primjer, veliki trupci imaju niske vrijednosti SAV, dok iglice borova ili trave imaju visoke vrijednosti SAV.

2.3.1.3. Kemijski sastav

Proces izgaranja može biti u manjoj ili većoj mjeri pod utjecajem kemijskog sastava goriva, koji može ubrzavati ili usporavati izgaranje. Pri tome su važna tri kemijska svojstva goriva (Bradshaw et al. 1984.):

- a) toplinski sadržaj (engl. *Heat Content*) ili energija koju gorivi materijal može osloboditi tijekom izgaranja po jedinici mase goriva,
- b) ukupni sadržaj minerala (engl. *Total Mineral Content*), koji predstavlja udio mase goriva koji je sastavljen od anorganskih minerala (samo organski minerali mogu održavati izgaranje), i
- c) učinkovit sadržaj minerala (engl. *Effective Mineral Content*) ili aktivni mineralni sadržaj u gorivim česticama koji utječe na kemijske procese izgaranja, posebno na oslobađanje hlapljivih plinova.

2.3.1.4. Gustoća

Gustoća (engl. *Density*) utječe na zapaljenje i brzinu širenja (Countryman, 1982.). Zajedno sa sadržajem vlage, snažno utječe na toplinsku vodljivost goriva (Chandler et al., 1983.). Goriva s nižom gustoćom brže se zapale za istu količinu topline ili zahtijevaju manje topline u istom vremenu.

2.3.1.5. Sadržaj vlage

Sadržaj vlage (engl. *Moisture Content*) predstavlja količinu vode po suhoj masi goriva i izravno utječe na mogućnost zapaljenja i izgaranja goriva. U procjeni ponašanja požara potrebno je razlikovati vlagu živog i mrtvog goriva. Vlaga mrtvog goriva (engl. *DFMC – Dead Fuel Moisture Content*) uglavnom ovisi o uvjetima okoliša (Bradshaw et al., 1984.), a različite kategorije veličina čestica mogu imati različit sadržaj vlage u istom trenutku. Kao što se očekuje, brzina širenja požara (Viegas et al., 2013.) i vjerojatnost zapaljenja (Viegas et al., 2014.) povećavaju se s padom sadržaja vlage u gorivu. Vrlo nizak sadržaj vlage u

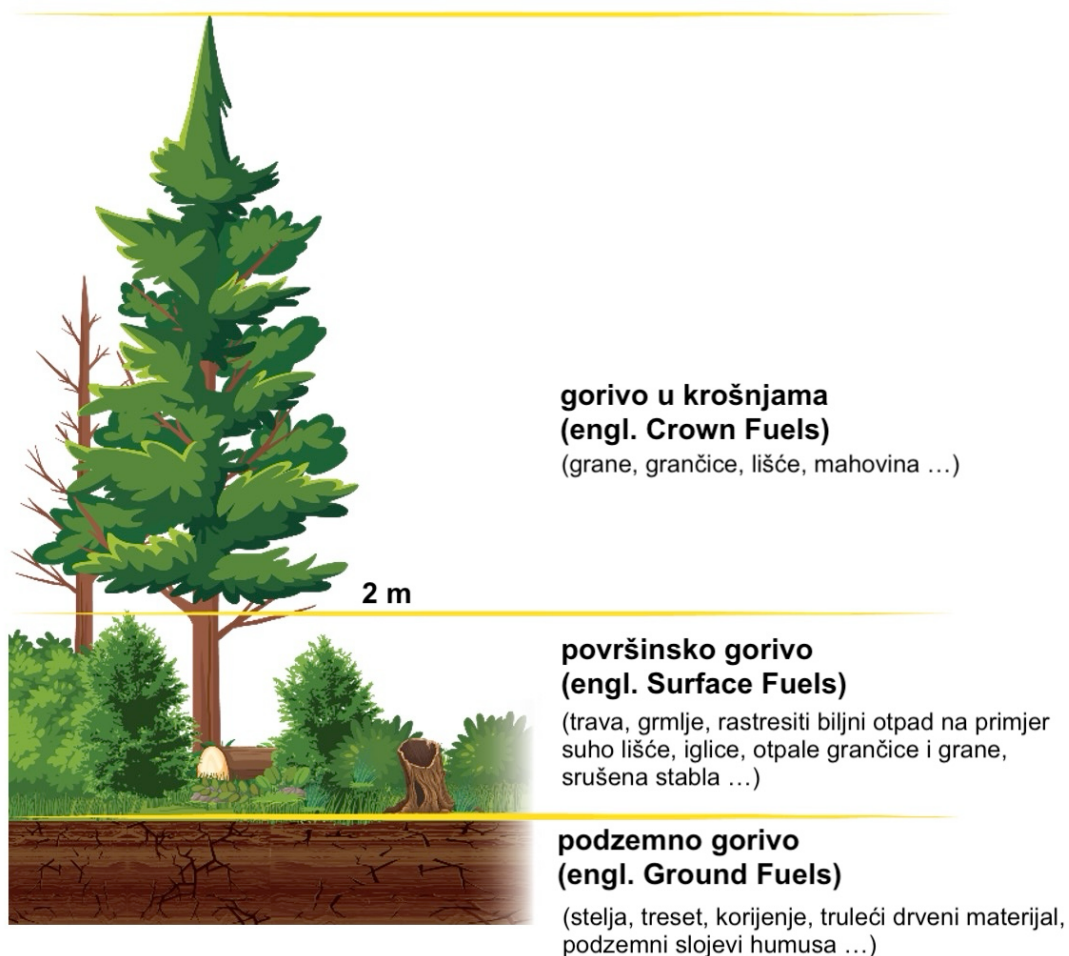
sitnom mrtvom gorivu (ispod 5-7%) ukazuje na visoku vjerojatnost pojave ekstremnog ponašanja požara (požari u krošnjama, spot požari, vrlo velika brzina širenja i visoki intenzitet linije požara). Više informacija o ovom parametru može se naći u prethodnim dijelovima.

Vlaga živog goriva (engl. *LFMC – Live Fuel Moisture Content*) rezultat je interakcije fizičkih i fizioloških procesa (Pyne et al., 1996.), stoga je njihova vremenska varijabilnost vrlo različita od vlage mrtvog goriva (Rego et al., 2021.). Sadržaj vlage živog goriva općenito je veći od sadržaja vlage mrtvog goriva, u istim uvjetima okoliša, često prelazeći 100%.

2.3.2. Gorivi slojevi i tipovi goriva

Raspored gorivih čestica u različitim vertikalnim slojevima – stratumima koje smo podijelili u podzemna, površinska i goriva u krošnjama u određenom području naziva se gorivim slojevima (engl. *Fuelbed*). Svaki vertikalni sloj može sadržavati različite vrste prirodnih goriva. Na pojedinim područjima gorivi sloj može sadržavati jedan, dva ili sva tri stratuma. Na primjer, travnjaci obično sadrži samo jedan sloj i to samo površinskog goriva, a razvijena šuma može imati sva tri sloja (podzemni sloj humusa, površinski sloj otpad, trava i grmlje i gorivo u krošnjama stabala).

Razgraničenje svakog sloja u vertikalnom profilu donekle je subjektivno, ali obično slijedi shematski prikaz sa **slike 2** na način da se dijelovi stabala iznad 2 metra smatraju kao gorivo u krošnjama koje uključuje sve što se nalazi u krošnjama kao što su grane, grančice, lišće, mahovina na deblu, itd. Površinsko gorivo je od tla do 2 m i uključuje travu, grmlje i rastresiti biljni otpad (suho lišće, iglice, otpale grane i grančice, srušena debbla). Podzemno gorivo je ispod površine tla, a čini ga stelja, treset, korijenje, truleći drveni materijal, podzemni slojevi humusa i slično.



Slika 2. Shematski prikaz gorivih slojeva (autor: ADAI)

Ova značajka izravno je povezana s modelom ponašanja požara, pri čemu svaki sloj može podržavati specifičan način širenja požara: podzemni požar, površinski požar i požar u krošnji. Više detalja u dijelu vezanom uz modeliranje širenja požara.

Davnih 1930-ih godina, Hornby (1936.) je uveo pojam **tip goriva** (engl. *Fuel Type*), i to na temelju kvalitativnih, opisnih kriterija. Definirao je četiri tipa goriva prema njihovom potencijalu za širenje požara i teškoćama pri gašenju požara. Danas se ovaj pojam koristi za opći opis dominantne vegetacije u gorivom sloju ili čak u svakom pojedinom sloju. Na primjer, gorivi sloj može biti borova šuma, ako su borovi dominantni u cjelokupnom sloju, ali površinskim stratumom može se smatrati i grmlje ili otpad ako prevladavaju u površinskom specifičnom sloju. Kod modeliranja ponašanja požara posebno je važan ovaj odabir sloja odgovornog za širenje požara.

U vezi s upravljanjem i gašenjem požara, sama vrste vegetacije nije toliko važna, budući da ista vrsta može pokazivati vrlo različito ponašanje pri požaru ukoliko su karakteristike gorivog sloja i gorivih čestica različite (Anderson, 1982.; Riaño et al., 2002.).

Najvažnije karakteristike gorivih slojeva koje treba uzeti u obzir u procjeni ponašanja požara su: količina goriva, visina goriva, zbijenost, kontinuitet, i vlažnost izumiranja.

2.3.2.1. Količina goriva

Količina goriva (engl. *Fuel Load*) iskazuje masu zapaljivog biljnog materijala po jedinici površine i obično se izražava u kg/m^2 ili t/ha . Ovisno o potrebama modeliranja ponašanja požara, ovaj se parametar može prikazati kao ukupna vrijednost ili podijeliti prema sloju (podzemni, površinski, krošnje), veličini čestica (sitne, redovne, srednje i teške) ili vegetacijskom stanju (živo i mrtvo).

Za određeni gorivi sloj, količina goriva i sadržaj vlage određuju količinu goriva koje će se potrošiti i količinu topline koja će se osloboditi tijekom izgaranja.

Količina goriva koja se potroši izravno utječe na učinke požara na vegetaciju i tlo (Rego et al., 2021.), širenje i intenzitet požara (Alexander & Cruz, 2020.), te na potencijalne emisije požara i utjecaj dima (Miranda, 2004.; Fernandes et al., 2022.).

2.3.2.2. Visina goriva

Visina goriva (engl. *Fuel Height*), koja se ponekad naziva i dubinom (engl. *Depth*), predstavlja procjenu vertikalne dimenzije zone izgaranja. Potrebna je za procjenu zbijenosti gorivog sloja (Cruz & Viegas, 1995.). Iako može biti potrebno neko iskustvo u određivanju gornjeg dijela gorivog sloja, ovaj se parametar može jednostavno i brzo izmjeriti te se stoga često koristi u metodama dvostrukog uzorkovanja za procjenu količine goriva.

2.3.2.3. Zbijenost

Zbijenost gorivog sloja (engl. *Compactness*), odnosi se na količinu raspoloživog goriva po jedinici volumena i uključena je u predikciju ponašanja požara kao gustoća gorivog sloja (kg/m^3).

Stupanj zbijenosti odražava raspoloživost zraka za pojedinačne čestice tijekom izgaranja i način prijenosa topline na čestice neposredno ispred požara (Chandler et al., 1983.). U podzemnim gorivima, zbijenost značajno utječe na promjene sadržaja vlage jer vrlo zbijena goriva ograničavaju isparavanje.

Manja zbijenost znači više kisika dostupnog za izgaranje. Međutim, ako su gorive čestice predaleko jedna od druge, nema dovoljno blizine za prijenos topline i posljedično zapaljenje susjednih čestica. Sve kategorije veličina čestica imaju idealnu točku zbijenosti koja maksimizira prijenos topline i prisutnost kisika, a time i izgaranje.

2.3.2.4. Kontinuitet

Kontinuitet goriva (engl. *Continuity*) izražava: „*stupanj ili razinu neprekinutog ili neprestanog rasporeda gorivih čestica u gorivom sloju, čime se utječe na sposobnost požara da održava izgaranje i širi se.*” (Drury, 2020.). Kontinuitet postoji kada su goriva unutar zona međusobnog sagorijevanja, tj. kada izgaranje jedne čestice ima učinak zagrijavanja na drugu. Ovaj se izraz koristi za površinska goriva (horizontalni kontinuitet) i za goriva koja djeluju kao „ljestve“ (vertikalni kontinuitet). Pojam **etažna goriva** (engl. *Ladder Fuels*) označavaju gorivi sloj koji može podržavati širenje požara s površinskih goriva prema krošnjama.

2.3.2.5. Vlažnost izumiranja

Vlažnost izumiranja (engl. *Moisture of Extinction*) predstavlja sadržaj vlage u gorivom sloju pri kojem se požar prestaje širiti. To je ključni parametar za primjenu Rothermelovog modela, koji je prvotno smatran konstantnim među svim tipovima goriva (30%). Kasnije je utvrđeno da može varirati s obzirom na zbijenost gorivog sloja, veličinu gorivih čestica, brzinu vjetra i nagib (Bradshaw et al., 1984.) ili čak ovisno o mjestu na liniji požara (Fernandes et al., 2008.). Vrijednosti vlažnosti izumiranja korištene u modelima goriva ponašanja požara (vidi u nastavku) mogu se kretati od 12% do 40%, a kod živih goriva, te vrijednosti mogu biti i veće.

2.3.3. Modeli goriva

Objavom Rothermelovog modela širenja požara 1972. godine pojavila se potreba za kvantitativnim opisom šumskih goriva pomoću relativno malog broja parametara koji bi omogućili predviđanje površinskog ponašanja požara. Pretpostavlja se da je vegetacija homogena u određenom području, kao i vremenski uvjeti i topografija, omogućujući požaru da održava konstantne karakteristike koje se tada mogu predvidjeti (Ribeiro et al., 2021.).

Rothermel je definirao model goriva kao „*cjeloviti skup ulaznih podataka za matematički model širenja požara*” i naveo parametre za 11 gorivih modela. Albini (Albini, 1976.) je dodatno poboljšao te modele i dodao još dva, stvarajući ono što se sada naziva **izvornih 13 modela goriva** ili **13 NFFL (Northern Forest Fire Laboratory) modela goriva**. Ovaj set, koji se široko koristi diljem svijeta, grupira goriva u 4 klase (travnata, grmolika, drvenasta i otpadna goriva), prema glavnom vektoru širenja požara, i detaljno je opisan u Andersonu (1982.), pa se model često zove i **Albini-Anderson model** (AA model).

Druga dva istraživača, Scott i Burgan, su 2005. godine (Scott & Burgan, 2005.) proširili ovaj skup na 40 modela goriva kako bi, karakterizirali veći broj situacija i bolje prikazali učinke upravljanja gorivima korištenjem alata za simulaciju ponašanja požara.

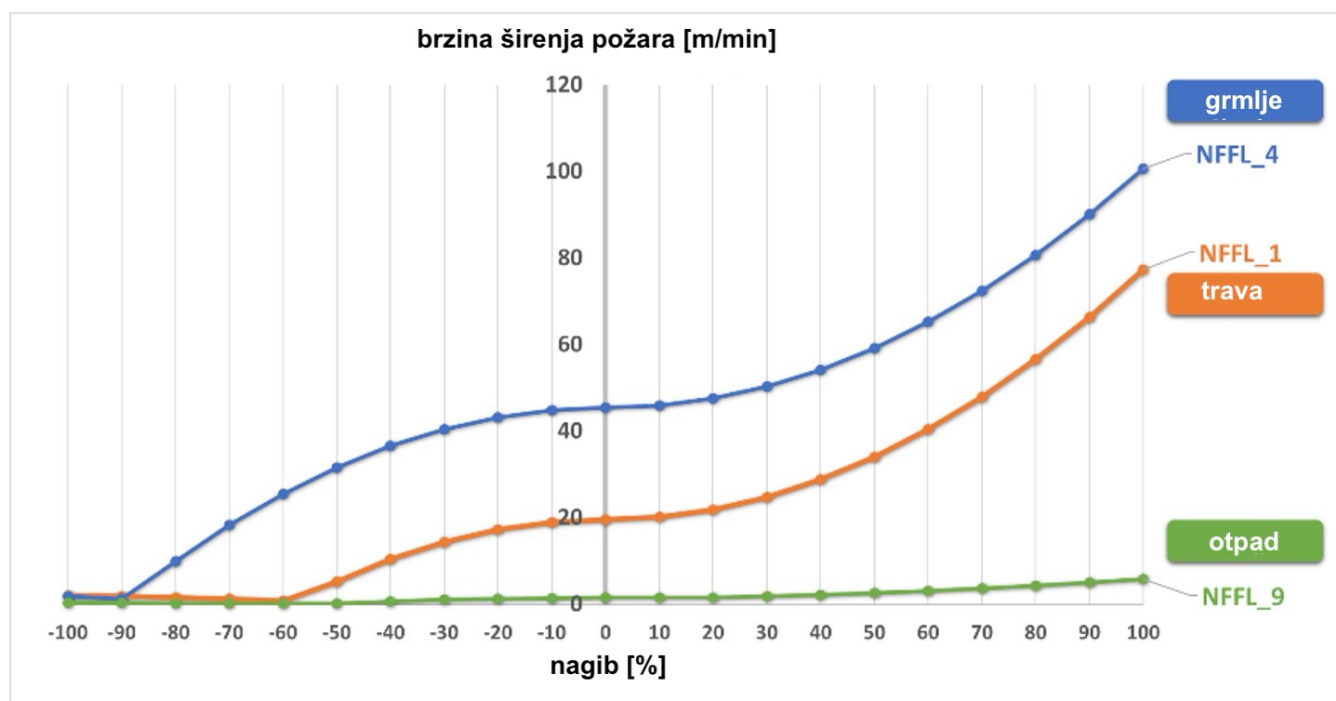
U Europi su postojali pokušaji stvaranja prilagođenih modela goriva, poput **sustava Prometheus** (PROMETHEUS, 2000.) projekta **FUELMAP** (FUELMAP, 2011.), koji je razvio klasifikaciju europskih goriva koju koristi Europski sustav informacija o šumskim požarima (EFFIS, 2017.), ili projekta FirEURisk, koji je razvio klasifikaciju gorivih tipova s povezivanjem na Scott & Burgan modele goriva (Aragoneses et al., 2023.).

Rothermelov model (Rothermel, 1972.) računa širenje površinskih požara, pa modeli goriva obično opisuju samo površinski gorivi sloj. Karakteristike koje su kvantitativno opisane u modelu goriva već su prethodno objašnjene i uključuju:

- količinu goriva prema vegetacijskom stanju (živo ili mrtvo) i veličini čestica (1 sat, 10 sati, 100 sati)
- visinu gorivog sloja
- omjer površine prema volumenu gorivih čestica prema vegetacijskom stanju (živo ili mrtvo)
- sadržaj topline i

- vlažnost izumiranja mrtvih goriva.

Alati za simulaciju ponašanja požara, poput **BehavePlus** (Andrews, 2014.) ili **FlamMap** (Finney, 2006.), već imaju ugrađene skupove od 13 Albini-Anderson i 40 Scott-Burgan modela goriva, omogućujući korisnicima jednostavnu simulaciju ponašanja požara. **Slika 3** prikazuje rezultate izračuna stope širenja požara pomoću **BehavePlus 6** za različite nagibe, s vjetrom koji puše uzbrdo brzinom od 20 km/h u tri različita modela goriva iz NFFL seta.



Slika 3. Primjer simulacija ponašanja požara pomoću BehavePlus 6 za 3 različita gorivna modela, pri različitim nagibima i s vjetrom od 20 km/h uzbrdo.

Prilagođeni modeli goriva često su definiraju za specifične regije, kao što je set od 14 modela goriva razvijen za središnji Portugal od strane Cruza (2005.) ili set od 18 modela razvijen od strane Fernandesa i suradnika (Ferenandes et al., 2009.) za kontinentalni Portugal. Ovaj razvoj uključuje kvantifikaciju svojstava gorivog sloja i gorivih čestica identificiranih ranije, ali što je još važnije, kalibraciju gorivih modela prema opaženom ponašanju požara (Rego et al., 2021.).

U praktičnoj primjeni, osim korištenja alata za simulaciju požara, modeli goriva obično su popraćeni procjenama širenja požara na terenu, često uz foto-vodiče kako bi se omogućila vizualna poveznica modela goriva s promatranim gorivim slojevima (Anderson, 1982.; Cruz, 2005.; Patrick, 2009.).

2.4. Uloga terena (topografija)

Topografija je jedan od ključnih čimbenika koji utječe na intenzitet i ponašanje širenja požara. Topografija uključuje nekoliko aspekata terena. Ovdje ćemo iznijeti neke opće uvide kao i posebne dijelove koji značajno mijenjaju ponašanje požara. U određenim uvjetima širenje požara može biti dominantno pod utjecajem topografije, uključujući specifične načine konvekcije³. Topografija može utjecati na nekoliko važnih aspekata ponašanja požara, uključujući:

³ Pojam **konvekcija** u meteorologiji predstavlja proces podizanja toplog zraka u atmosferi i spuštanja hladnijeg zraka, što uzrokuje stvaranje oblaka, oluja i drugih vremenskih fenomena.

- **Vjetar** – kanalizirana vjetrovita područja mogu se stvoriti karakteristikama krajobraza ili specifičnim lokacijama, npr. utjecajem kanjona, planinskih područja ili mora.
- **Akumulaciju goriva i njegovu lokaciju** – regije krajobraza koje imaju povećanu zasjenu ili vlažnost, npr. kanjoni, mogu imati povećanu proizvodnju i akumulaciju goriva. S druge strane, sušnija područja kao što su izloženi nagibi i grebeni mogu imati oskudna goriva, ali neprekinuta i suha goriva koja potiču povećano i brže širenje požara.
- **Prirodne i umjetne protupožarne barijere** – Velika vodena tijela i velika planinska područja mogu djelovati kao prirodne protupožarne barijere zbog nedostatka goriva. Čovjekove promjene koje utječu na nagib ili topografiju također se mogu razmatrati, npr. vjetroelektrane na grebenima ili terase na padinama.

2.4.1. Nagnutost terena

Nagnutost terena (engl. *Terrain Gradient*) u odnosu na horizontalnu referencu se opisuje nagibom padine (engl. *Slope*). Mjeri se kao kut [$^{\circ}$] ili postotak nagiba [%] i jedan je od glavnih parametar koji karakterizira topografiju. Strmi nagibi poznati su kao ključni pokretač širenja i intenziteta požara. S nagibom, plamen postaje bliži gorivu, što zbog manjeg kuta značajno pogoduje procesima prijenosa topline i povećane brzine širenja požara uzbrdo. Međutim, ako se požarna linija širi nizbrdo, širenje požara je smanjeno zbog povećanog kuta plamena. Požari koji se šire nizbrdo obično će se širiti brzinom sličnom ili manjom od one na ravnom terenu.

Kutovi nagiba iznad 20° (36%) mogu imati važan učinak na širenje požara i na ubrzanje požara. Ovo je osobito važno za kutove nagiba iznad 30° (58%) za koje kretanje osoblja pješice ili vozilima postaje otežano i opasno. Kutovi nagiba iznad 40° (84%) nisu česti, jer tlo ne ostaje stabilno na takvim nagibima, no mogu se pojaviti u nekim regijama, poput vulkanskih brda.

2.4.2. Ekspozicija padine: izloženost suncu i vjetru

Ekspozicija padine (engl. *Aspect*) je orijentacija nagiba mjerena u smjeru kazaljke na satu u stupnjevima od 0° do 360° , gdje je 0° okrenutost nagiba prema sjeveru, 90° je okrenutost prema istoku, 180° prema jugu, a 270° je prema zapadu. Krajobrazi okrenuti prema jugu na sjevernoj hemisferi (i obrnuto) obično su suši zbog povećane izloženosti suncu i vjetru. Takvi krajobrazi poznati su po smanjenom sadržaju vlage u gorivu, što dovodi do povećanog širenja požara u usporedbi s drugim smjerovima krajobraza.

2.4.3. Nadmorska visina: promjene temperature i uzorci vjetra

Nadmorska visina ili elevacija (engl. *Elevation*) je visina terena iznad ili ispod fiksne referentne tačke definirane referentnim geoidom koji predstavlja matematički model razine Zemljinog mora. U uobičajenim uvjetima, nadmorska visina može utjecati na temperaturu i uzorke vjetra. Također, tip vegetacije i njen rast, kao i sadržaj vlage u gorivu, mogu se promijeniti u skladu s nadmorskom visinom, pa može doći i do **promjene ponašanja** požara.

2.4.4. Zakrivljenost terena

Zakrivljenost terena (engl. *LSC - Land Surface Curvature*) izražava koliko je teren zakrivljen u odnosu na ravni teren. Zakrivljenost može promijeniti način širenje požara, mijenjajući njegovu brzinu zbog kuta plamena i učinkovitosti prijenosa topline na neizgorjela goriva. U kratkim crtama, ravni nagibi imaju predvidljivije ponašanje požara, dok su izbočeni (konveksni) ili udubljeni (konkavni) nagibi obično povezani s povećanim širenjem požara, bliže vrhu ili dnu, ovisno o položaju strmijih padina u krajobrazu. Jedan značajan primjer je teren u obliku kanjona, u kojem konkavni oblik terena potiče konvektivno strujanje prema zoni izgaranja, stvarajući povratnu vezu koja znatno ubrzava požar.

2.4.5. Grebeni

Grebeni (engl. *Ridges*) su obično povezani sa složenim uzorcima vjetra, uključujući promjene smjera zbog odvajanja i recirkulacije strujanja zraka te stvaranja vrtloga. Vjetar može imati dodatne značajke kada puše preko ili oko grebena, stvarajući složene obrasce ponašanja požara koji mogu ubrzati ili usporiti širenje požara.

Ako je požar pogonjen vjetrom, može se brzo širiti bočno duž grebena i širiti njegovu poprečnu dimenziju, ulazeći na padinu niz brdo sa širim požarnim frontom. Ova područja također mogu biti povezana s povećanom vjerojatnošću stvaranja vatrenih vrtloga ili horizontalno proširenog širenja požara, što će biti opisano u nastavku kao specifične značajke ponašanja požara. S druge strane, u određenim uvjetima, grebeni mogu djelovati kao prirodne barijere koje smanjuju širenje požara zbog učinaka vjetra ili nagiba terena.

2.4.6. Složena topografija

Složena topografija (engl. *Complex Topography*) je pojam koji obuhvaća prisutnost nekoliko krajobraznih karakteristika, koje su obično povezane s povećanim nagibima i specifičnim značajkama terena. Složena topografija značajno utječe na ponašanje požara i aktivnosti gašenja, budući da je teže učinkovito predvidjeti ponašanje požara i uspostaviti sigurne strategije. Složeni nagibi, značajke terena i izloženost suncu dovode do različitih karakteristika goriva, kao i promjena smjera vjetra ili protoka zraka, što rezultira alternativnim obrascima širenja požara koje je teško predvidjeti i simulirati. Ovaj sve složeniji scenarij također je općenito povezan s povećanom vjerojatnošću pojave iskrenja i leta ugaraka (engl. *Spotting*).

Značajke složene topografije požara povezane su sa složenim interakcijama strujanjem vjetra, a time i s potencijalno nepredvidivim ponašanjem požara. Na primjer, na nagnutim grebenima (cf. Abouali et al., 2021.), požar se može širiti brže nizbrdo nego uzbrdo na nekim dijelovima terena. Prisutnost kanjona u ravnim padinama također se mora smatrati čimbenikom povećanog rizika jer se ponašanje požara u nagibu potpuno mijenja kada uđe u obližnji kanjon, ako je relativno plitak. Kada su požari uglavnom pod utjecajem topografije, širenje i ponašanje požara pojačavaju se obrascima uzrokovanim terenom, uključujući veći intenzitet ili promjene smjera zbog strmijih nagiba, izloženosti suncu ili lokalnih uzoraka vjetra. Nadmorska visina može promijeniti lokalne uvjete, dovodeći do promjene širenja požara. Zakrivljenost terena i grebeni mogu uzrokovati dodatne promjene u napredovanju požara povezane s nagibima, vjetrom i specifičnim načinima ponašanja požara, na primjer vatrenim vrtlozima i horizontalnim vrtlozima. Složena topografija dodat će višestruke značajke koje je teško integrirati, povećavajući intenzitet širenja požara i neizvjesnost njegovog kretanja.

2.5. Vrste i načini širenja požara

2.5.1. Vrste požara

Prema slojevima vegetacijskog pokrova u kojima se šire, razlikujemo sljedeće vrste požara:

1. **Podzemni požari** – požari koji se šire obično bez plamena ispod površine tla, trošeći organski materijal prisutan u sloju humusa ili treseta.
2. **Površinski požari** – požari koji se šire obično s plamenim požarnim frontom, trošeći goriva koja se nalaze iznad tla, poput lišća, trave, grmlja i malih stabala.
3. **Požari krošanja** – požari koji se šire trošeći lišće krošanja stabala, obično uz podršku površinskih požara ispod krošanja te se šireći s jednog stabla na drugo.

4. **Iskrenje (spot požari)** – požari koji se šire pomoću žarećih čestica ili iskrica koje su ispuštene iz nekih od prethodnih tipova požara, a koje vjetar, bilo atmosferski ili izazvan požarom, može prenijeti na zapaljiv materijal, uzrokujući nove upale.

Većina ovog dokumenta odnosi se na površinske požare, koji su prisutni u svim većim požarima i odgovorni su za većinu spaljenih površina. Specifičnosti podzemnih požara potrebno je razmatrati tijekom završne faze gašenja i u slučaju tresetnih požara. U ovoj fazi oni nisu uključeni u rad. Požari krošanja i iskrenje obrađuju se kao posebni slučajevi ekstremnog ponašanja požara u odgovarajućim odjeljcima.

2.5.2. Načini širenja površinskih požara

Prema njihovom ponašanju, razlikujemo sljedeće načine širenja površinskih požara:

1. **Rubno ponašanje** – Odnosi se na situacije početnog požara ili požara u fazi gašenja, kada požar može ili ne mora nastaviti širenje. Pojavljuje se kada uvjeti za zapaljenje ili širenje nisu povoljni, na primjer, jer goriva imaju visok sadržaj vlage ili su vrlo rijetko raspoređena u prostoru. Ovaj je način širenja važan za analizu učinkovitosti sredstava za gašenje poput vode ili usporivača plamena (retardanata) te mogućeg procesa ponovnog rasplamsavanja. Zahtjevi za gašenje požara (minimalna količina vode ili sredstava za usporavanje požara potrebna za suzbijanje požara) vezani su uz ovaj tip ponašanja požara, kao i neke tehnike obrade goriva (modifikacija zbijenosti gorivog sloja ili stvaranje protupožarnih linija). Uvjeti potrebni za početak i širenje kontroliranog požara zahtijevaju specifična istraživanja. Uvjeti za ponovno rasplamsavanje nominalno ugašenog požara odgovaraju rubnom ponašanju požara. Tresetni požari koji gore s tinjajućim izgaranjem – bez plamena – mogu se smatrati dijelom ovog načina rubnog ponašanja požara.
2. **Statičko ponašanje** – Odnosi se na režim širenja požara u kojem se svojstva širenja požara smatraju konstantnima tijekom vremena. Ako se granični uvjeti ne mijenjaju tijekom određenog vremenskog razdoblja, svojstva širenja požara, kao što je brzina širenja, ostaju konstantna. U ovom slučaju, uobičajeni postupak procjene prosječnih svojstava širenja požara u svakom vremenskom razdoblju je prihvatljiv jer odgovara stvarnim vrijednostima tog svojstva tijekom cijelog razdoblja. U ovom pristupu pretpostavljamo da ponašanje požara ovisi o trima uobičajenim čimbenicima (topografija, vegetacija i meteorologija) ili češćem načinu ponašanja požara. Kao što ćemo vidjeti, ovaj način ponašanja požara vrlo je specifičan i javlja se samo u vrlo ograničenim uvjetima. Unatoč tome, ovo je uobičajeni ili najčešći način ponašanja požara razmatran u većini istraživanja.
3. **Dinamičko ponašanje** – U općem slučaju, interakcija požara s okolinom mijenja svojstva širenja požara tijekom vremena, čak i ako granični uvjeti (topografija, vegetacija i meteorologija) ostaju konstantni ili homogeni. Opis svojstava požara izričito uključuje varijablu vremena, a postupak uzimanja prosječnih vrijednosti svojstava širenja požara možda neće biti valjan. Ovaj način ponašanja požara osobito je važan kod velikih požara i analize nesreća. Kao što će biti opisano u sljedećim poglavljima, ekstremno ponašanje požara ključno je za ove slučajeve.

3. Ekstremno ponašanje požara

3.1. Karakterizacija ekstremnog ponašanja požara

U (Tedim et al., 2018.) pojam **ekstremni događaj požara raslinja** (engl. *EWE – Extreme Wildfire Event*) definiran je kao događaj u kojem nekoliko parametara koji karakteriziraju širenje, veličinu ili utjecaj požara prelazi određene pragove. Treba napomenuti da ekstremni događaj požara raslinja (EWE) i **ekstremno ponašanje požara** (engl. *EFB – Extreme Fire Behaviour*) nisu isto. EWE će sigurno uključivati jednu ili više epizoda EFB-a, ali ekstremno ponašanje požara može se primijetiti čak i kod relativno malih požara koji nisu klasificirani kao EWE.

Radi sigurnosti u gašenju požara koristi se sljedeća definicija ekstremnog ponašanja požara (Viegas, 2012.): „*Ekstremno ponašanje požara predstavlja skup karakteristika širenja i svojstava šumskog požara koji onemogućavaju njegovo sigurno kontroliranje pomoću dostupnih suvremenih tehničkih resursa i znanja.*“

3.1.1. Dinamično ponašanje požara

Tradicionalno se smatra da na ponašanje požara na određenoj točki utječu tri faktora: (i) topografija, (ii) vegetacija i (iii) meteorologija, koji čine poznati **trokut faktora požara**. Svaki od ovih faktora i njihova uloga već su opisani. Opsežno istraživanje i promatranje širenja požara pokazali su da, u mnogim slučajevima, čak i kada ti faktori ostanu nepromijenjeni, ponašanje požara varira zbog interakcije s okolinom i stopa širenja (ROS) nije konstantna. To je potaknulo (Viegasa, 2004.) da predloži koncept **četverokuta faktora požara**, dodajući faktoru kronološko vrijeme.

Važno je prepoznati dinamičan karakter širenja požara, u smislu da procesi prijenosa topline (konvektivni procesi) koje stvara interakcija između požara i okoline, također poznata kao spajanje požara i atmosfere (engl. *Fire-atmosphere Coupling*) uzrokuju promjene u ponašanju požara, pri čemu brzina širenja požara (engl. *ROS – Rate of Spread*) izravno ovisi o vremenu. Postoje specifični slučajevi u kojima ova varijacija brzine širenja požara s vremenom može imati ozbiljne posljedice za sigurnost tijekom gašenja požara.

Samo kod pozadinskih i bočnih požara, u odsustvu nagiba ili vjetra, brzina je praktički konstantna i jednaka osnovnoj brzini širenja R_0 . U svim drugim slučajevima, brzina će se mijenjati s vremenom, čak i ako ostali faktori (gorivo, nagib ili vjetar) ostanu konstantni.

Kako se ponašanje požara mijenja s vremenom, radi sigurnosti pri gašenju požara važno je pridržavati se sljedećeg pravila: „*Ono što požar sada radi može biti vrlo različito od onoga što će raditi u sljedećim minutama.*“

3.1.2. Intenzitet požara

Treba napomenuti da u definiciji ekstremnog ponašanja požara koju je dao (Viegas, 2012.) nisu navedeni kvantitativni faktori jer pojam ekstremno ima relativan karakter, ovisno o uvjetima i okolnostima osobe koja se suočava s požarom. Sigurnost se procjenjuje na temelju svojstava širenja požara – posebice intenziteta požarne linije⁴ (engl. *Fireline Intensity*), te resursa i znanja dostupnih vatrogascima.

⁴ Intenzitet požarne linije (engl. *Fireline Intensity*) poznat još i kao Byramov intenzitet požarne linije je brzina oslobađanja toplinske energije po jedinici vremena i po jedinici duljine fronte požara. Jedinica mu je [$\text{kW/m} = \text{J}/(\text{s m})$], a numerički je jednak umnošku toplinske energije izgaranja goriva [kJ/kg], količine goriva utrošenog u plamenoj fronti [kg/m^2] i linearne brzine širenja požara [m/s]. Visina plamena (engl. *Flame Length*) direktno je proporcionalna intenzitetu požarne linije. Ako treba izabrati jednu veličinu koja opisuje jačinu požara, onda je to sigurno intenzitet požarne linije ili visina plamena.

Pretpostavlja se da što je bolja obuka vatrogasaca, to su bolje pripremljeni za borbu s intenzivnijim požarima.

Implicitno se priznaje da s današnjom tehnologijom izravni napad na prednji dio požara koji premašuje 10 MW/m nije izvediv. **Tablica 2** daje iskustvene savjete o načinu gašenja požara, vezane uz intenzitet požarne linije.

Tablica 2. Načini gašenja požara ovisno o intenzitetu požara.

način gašenja požara	maksimalni intenzitet požarne linije [kW/m]
ručni alati	350
vatrogasne cisterne	1700
laka zračna sredstva	3500
teška zračna sredstva	10000

3.2. Nepovoljan razvoj ekstremnog ponašanja požara

3.2.1. Spot požari

Spot požar je novi požar koji nastaje iz izvorne požarne fronte pomoću prenesenih žarećih čestica ili iskrica i razvija se izvan perimetra izvornog požara. Najčešća klasifikacija spot požara je ona koja požare tipizira na temelju njihove udaljenosti od izvorne fronte požara:

- **Kratka udaljenost** od nekoliko metara – ovaj tip spot požara obično brzo preuzima glavna požarna fronta. Primarno doprinose povećanju stope širenja požara, često iznenađujući one koji očekuju da će glavna požarna fronta stići kasnije.

- **Srednja udaljenost** od nekoliko desetaka metara – potiče napredovanje izvorne požarne fronte uz kratke vremenske prekide (intermitentno širenje požara) dok se izvorni požar ne stopi s novim zapaljenjem. Osim što pridonose povećanju širenja požara, izuzetno su opasni jer mogu zarobiti svakoga tko se nađe između dvije požarne fronte ili spotova, posebno tijekom faze spajanja.

- **Duga udaljenost** od nekoliko stotina metara – na početku se smatraju zasebnim požarima u istom području požara. Mogu se stopiti s izvornom frontom kako se udaljenost između njih smanjuje i intenzitet požara je dovoljan za takvo spajanje (interakciju).

- **Vrlo duga udaljenost** nekoliko kilometara – tipično se ovakvi spot požari smatraju novim požarnim događajima koji dovode do razdvajanje resursa za gašenje požara na istom području.

Mehanizam nastanka spot požara uključuje nekoliko faza:

- 1) oslobađanje zapaljenih materijala (žarećih čestica i iskrica)
- 2) podizanje tih materijala u dimnom stupcu konvekcijom
- 3) prenošenje žarećih čestica i iskrica niz vjetar nakon izlaska iz uzgonskog stupca i
- 4) spuštanje žarećih čestica i iskrica na sloj novog goriva koje se pri tome zapali.

Iako je komplicirano predvidjeti gdje bi se mogao pojaviti spot požar, analiza uvjeta pod kojima se događa požar, uzimajući u obzir navedene četiri faze, može pružiti naznake kada, kako i gdje se spot požari mogu stvoriti.

Lokacija požarne fronte može sugerirati koliki je potencijal za proizvodnju zapaljenih čestica u određenom prostoru i vremenu – npr. ako požarna fronta dosegne rub razvijene šume u sušnom razdoblju, vjerojatnost proizvodnje zapaljenih čestica je vrlo visoka. Intenzitet požara povezan je s

transportom čestica u konvektivnom stupcu i, zajedno s jakim lokalnim vjetrovima, može ukazivati na dugi ili vrlo dugi spot požar. Vrsta goriva u potencijalnom budućem požarnom području može ukazivati na to gdje je vjerojatnost spot požara veća – npr. suhe travnjake ili grmolika područja vjerojatnije će se zapaliti nego poljoprivredna područja.

Eukaliptusi se često smatraju vrstama s najvećim potencijalom za stvaranje spot požara. Naime, aerodinamičko ponašanje njihovih listova, a posebno kore, u kombinaciji s visokom zapaljivošću, čini ih vrlo sposobnima za izazivanje spot požara, osobito na dugim udaljenostima. Međutim, važno je uzeti u obzir da neke vrste širokolisnog drveća, čak i s nižom zapaljivošću, imaju veliki potencijal za izazivanje spot požara, posebno na srednjim udaljenostima. Almeida et al., su 2021. godine (Almeida et al., 2021.) naglasili su značajno oslobađanje zapaljenih čestica iz krošnji hrastova i hrastova plutnjaka. Ti su rezultati potvrđeni nekim prošlim incidentima šumskih požara, poput nesreće Cicouro (Portugal) 2013., gdje su dva vatrogasca poginula nakon što je kiša zapaljenih čestica iz hrastovih listova uzrokovala nekoliko spot požara u njihovoj blizini (Viegas et al., 2013.), ili požara Regadas (Požar Pedrógão Grande, Portugal) 2017., gdje je gubitak kontrole nad požarom nastao kada se krošnja plutnjaka zapalila, izazivajući brojne spot požare u blizini (Viegas et al., 2017.).

Teškoće u gašenju spot požara pogoršavaju se jer se obično ne pojavljuju izolirano. Budući da izvor zapaljenih čestica oslobađa brojne žeravice tijekom prolaska požarne fronte, a te se žeravice suočavaju sa sličnim uvjetima okoline, uobičajeno je da se spot požari pojavljuju u skupinama, udaljeni nekoliko desetaka metara jedan od drugog, potičući njihovu interakciju i potencijalno dovodeći do stvaranja velikog novog požara koji se, ovisno o udaljenosti, može stopiti s izvornom požarnom frontom. Kao rezultat toga, velik broj spot požara i njihov intenzitet mogu otežati ili čak onemogućiti gašenje požara, povezujući ovaj mehanizam s ekstremnim ponašanjem požara.

Spot požari su obično povezani s prijenosom zapaljenih čestica vjetrom, pa se očekuje da će se pojaviti niz vjetar na zavjetrinskoj strani požarne fronte. Međutim, treba napomenuti da spot požari mogu nastati i iz drugih mehanizama, kao što je kotrljanje šišarke niz padinu ili zapaljena životinja koja uzrokuje novo paljenje dok pokušava pobjeći od požara. Stoga opasnost povezana sa spot požarima proizlazi ne samo iz njihovog učinka na izvornu požarnu frontu, ubrzavajući je, već i iz mogućnosti zarobljavanja ljudi i/ili životinja te njihove sposobnosti da se pojavljuju neočekivano, uzrokujući iznenađenje. Spot požari također mogu onemogućiti sigurnosne rute, kompromitirati točke oslonca ili čak poništiti skloništa na području požara.

3.2.2. Požari u krošnjama

Požari u krošnjama su također manifestacija ekstremnog ponašanja požara. Visoka energija povezana s ovim požarima i njihova sposobnost stvaranja snažnih konvektivnih dimnih stupova, te generiranja zapaljenih čestica s potencijalom za spot požare na različitim udaljenostima čine ovaj mehanizam jednim od najtežih za suzbijanje.

Požari u krošnjama se dijele na tri tipa:

- 1) **Pasivni požari u krošnjama** (engl. *Active Crown Fire*), u kojem se zapali jedno drvo ili mala skupina stabala, uzrokujući visok intenzitet na kratko vrijeme.
- 2) **Aktivni požari u krošnjama** (engl. *Passive Crown Fire*), kada se požar održivo širi među krošnjama uz podršku površinskog požara koji se širi kroz vegetaciju ispod krošnji, oslobađajući energiju na trajniji i intenzivniji način nego kod pasivnog požara u krošnjama.
- 3) **Nezavisni požari u krošnjama** (engl. *Independent Crown Fire*), koji se karakterizira održivim širenjem između krošnji (aktivni požar) bez podrške površinskog požara ispod krošnji, tj. požar prelazi između krošnji neovisno o prisutnosti površinskog požara u prizemnoj vegetaciji.

Za razliku od površinskog požara, kod požara u krošnjama dolazak kisika događa se odozdo zato što su krošnje obično visoke. Kod površinskog požara prozračivanje dolazi samo s bočnih strana. U aktivnom požaru u krošnjama, površinski požar prethodno zagrijava krošnje, čineći ih osjetljivijima na sagorijevanje. Dakle, istovremena dostupnost velike količine kisika i goriva dovodi do vrlo intenzivnih sagorijevanja s velikim oslobađanjem energije.

Ako velika dostupnost goriva nije popraćena visokom dostupnošću kisika, reakcija sagorijevanja postaje neuravnotežena i time se požar gasi. Zbog toga su nezavisni požari u krošnjama rijetki i javljaju se uglavnom u uvjetima kada je vlažnost krošnje izuzetno niska, s povoljnom gustoćom gorive materije za sagorijevanje.

Oslobađanje energije je toliko veliko i zastrašujuće da se nesreće rijetko događaju kod krošnjastih požara koji su u tijeku zato što ljudski instinkt za samoodržanje potiče ljude da se udalje od tako impresivnog prizora. Međutim, prijelaz s površinskog požara na krošnjasti požar može biti brz, iznenađujući one koji su mu prišli misleći da se bore protiv požara manjeg intenziteta. Stoga je ključno razumjeti kako požar prelazi s površinskog na krošnjasti požar, što se naziva **vertikalni prijelaz** (engl. *Vertical Transition*). Prema Van Wagneru (Van Wagner, 1977.), vertikalni prijelaz ovisi o intenzitetu površinskog požara i **kritičnom intenzitetu požarne fronte** I_c (engl. *Critical Intensity*) koji je funkcija visine krošnje i sadržaja vlage u lišću:

$$I_c = (0.010 \times z \times 400 + 26 \times m)^{3/2} \quad (2)$$

z – visina baze (donjeg dijela) krošnje (engl. *Crown Base Height*) [m]

m – sadržaj vlage u lišću (engl. *Foliar Moisture Content*) [%]. U pojednostavljenom slučaju se uzima da je 100% (Philpot and Mutch, 1971).

Ako je kritični intenzitet veći od intenziteta površinskog požara, vjerojatnost za krošnjasti požar (pasivni ili aktivni) je visoka. Ako je kritični intenzitet manji od intenziteta površinskog požara, požar će vjerojatno ostati na površini ili eventualno preći kroz sitna goriva (npr. lišajevje) koja mogu postojati na deblu stabla, što može dovesti do epizode požara u krošnjama koji je u tom slučaju obično pasivan.

Horizontalni prijelaz (engl. *Horisontal Transition*) požara u krošnjama na način da bi požar iz pasivnog postao aktivni požar, zahtijeva gustoću krošnji koja osigurava da je udaljenost između gorivih elemenata povoljna za širenje požara. Obično se definira granični parametar poznat kao **kritična stopa širenja nakon prijelaza** R_c (engl. *Critical After-crowning Rate of Spread*) koja je obrnuto proporcionalna gustoći krošnji (Van Wagner, 1977.):

$$R_c = 3.0/d \quad [\text{m/min}] \quad (3)$$

d – gustoća gorive materije u krošnji [kg/m^3]

Ako je stopa širenja površinskog požara veća od kritične stope širenja, može doći do prijelaza u aktivni požar krošnji, inače požar ostaje pasivan. Prema Rothermelu (Rothermel, 1972.), stopa širenja požara u krošnjama je 3,34 puta veća od stope širenja predviđene za Albin-Andersonov model goriva 10 kojeg čine drveni ostatci i nisko raslinje (Anderson, 1982.) koristeći faktor smanjenja vjetra od 0,4, bez obzira na stvarna površinska goriva ili faktor smanjenja vjetra.

Zaključimo, da bi došlo do požara u krošnjama, površinski požar mora biti visokog intenziteta, a udaljenost između baze krošnje i plamena površinskog požara mora biti dovoljno bliska da dođe do vertikalnog prijelaza. Da bi taj požar krošnji postao aktivan, što znači da se nastavio širiti po krošnjama, krošnje moraju biti dovoljno blizu da požar može prijeći s jednog stabla na drugo. ovaj zaključak naglašava važnosti upravljanja prizemnom vegetacijom, kao i značaj orezivanja i prorjeđivanja stabala kako bi se smanjila vjerojatnost požara u krošnjama i osigurala sigurnija borba protiv požara u šumama.

Snaga vjetra i nagib također su faktori koje treba uzeti u obzir, posebno zbog povećanja stope širenja površinskog požara koje oni omogućuju. Vrste drveća u šumi također igraju važnu ulogu u pojavi ili izostanku požara u krošnjama. Njihova zapaljivost značajno utječe na vertikalni i horizontalni prijelaz. Prema (Pausasu et al., 2017.) vertikalni i horizontalni prijelaz se povezuje sa četiri komponente (Anderson, 1970.; Martin et al., 1994.):

- 1) zapaljivost, sposobnost za početno zapaljenje,
- 2) održivost gorenja, sposobnost materijala da održava izgaranje i proizvodi energiju,
- 3) brzina izgaranja gorive materije, i
- 4) iskoristivost, udio biomase koja se potroši tijekom izgaranja.

Općeniti zaključak je da širokolisne vrste poput hrasta ili kestena dovode do manje vjerojatnosti požara u krošnjama nego vrste kao što su bor ili eukaliptus.

3.2.3. Eruptivni požari

Eruptivni požari (engl. *Eruptive Fires*) povezani su s vrlo velikim ubrzanjem požara, koje se može usporediti s erupcijom. Razorna snaga tih erupcija je vrlo velika i može iznenaditi ljude. Većina nesreća u požarima povezana je s ovakvim tipom ponašanja požara. Ovaj tip ponašanja vrlo je usko povezan s kanjonima i strmim nagibima, ali se fizički procesi koji su uključeni mogu dogoditi i u uobičajenijim situacijama. U literaturi se ponekad nazivaju eksplozivnim požarima (engl. *Blow-up*), iako nema ništa što ih povezuje s naglim rasplamsavanjem požara, zato što je kod eruptivnih požara rast stope širenja kontinuiran proces, pa je bolje koristiti naziv eruptivni požar. Primjer pravih eksplozivnih požara opisujemo u nastavku kao posebni tip ekstremnog ponašanja požara.

Ovaj tip ekstremnog ponašanja požara sustavno su prvi proučavali (Viegas i Pita, 2002.), koji su otkrili da je ovo ponašanje povezano s požarom induciranim protokom zraka koji je pojačan konkavnim oblikom terena kanjona. U laboratorijskim eksperimentima korištena je stolna maketa kanjona sastavljena od dvije nagibne ravnine za sustavno analiziranje ovog tipa ponašanja požara. Oblik kanjona određen je kutovima nagiba dviju ravnina stola za izgaranje i ukupnim kutom njegove baze. Veće vrijednosti tih kutova induciraju veće vrijednosti ubrzanja požara.

Povećanje stope širenja događa se zbog dinamike požara, bez obzira na vjetar u okolišu ili specifične uvjete sloja goriva. Vrijeme potrebno da požar dosegne vrlo visoke vrijednosti ovisi o kompaktnosti sloja goriva, pri čemu je manje za rahlija goriva poput trave, a veće za teža goriva poput grmlja i drvnih ostataka.

U vrlo čestom slučaju grmolikog goriva, vrijeme potrebno za potpuno ubrzanje je oko dvadeset minuta, što je uočeno i u mnogim situacijama stvarnih nesreća i eksperimentalnih požara u laboratorijima.

Napomena prevodioca: Važno je naglasiti da svaki požar može imati ubrzano, eruptivno širenje ako su ispunjeni uvjeti nagiba i oblika terena, te smjera i brzine puhanja vjetra, pa je možda ispravnije koristiti naziv eruptivni efekt širenja požara. Prije nešto više od 30 godina američki znanstvenik Richard Rothermel (Rothermel, 1972.) postavio je polu-iskustveni matematički model širenja požara raslinja koji i danas dominira u analizama ponašanja i širenja požara. Rothermel je kazao da brzina širenja požarne fronte ovisi o vrsti vegetacije, nagibu terena, te brzini i smjeru puhanja vjetra. Njegova osnovna postavka je bila ta da je ova brzina širenja požara stalna (konstantna) ukoliko se vegetacija, nagib terena i vjetar ne mijenjaju. Ukoliko primjerice požar na travnatoj podlozi dođe na teren nagiba 14%, a vjetar puše uz padinu (u smjeru širenja vatre) brzinom od 5.5 m/s na visini od 10 m, požarna fronta će se prema Rothermelovom modelu širiti uz padinu brzinom od približno 20 m/min, s tim da je Rothermel kazao da će brzina biti ista i na početku padine i na kraju padine, bez obzira koliko je padina duga. Drugim riječima kazano je jednadžba

kojom se određuje brzina širenja požara isključivo ovisi o tri vrijednosti: nagib terena – vegetacija – meteorologija. Eruptivni efekt je u stvari proširenje osnovnog Rothermelovog modela širenja požara na način da uključuje i efekt ubrzanog kretanja požara ukoliko su ispunjeni uvjeti terena i vjetra. U primjeru prije spomenutom, kada požar dođe do nagnute padine njegova brzina neće biti ista na početku i na kraju. Krećući se prema vrhu padine brzina će se ubrzano povećavati, pa na kraju može biti i desetak puta veća od one na početku. To je primijećeno u eksperimentima i kod stvarnih požara, pa eruptivni efekt bolje i točnije opisuje stvarni način širenja požara.

3.2.4. Spojeni požari

U šumskom požaru ponekad se događa da se dvije ili više požarnih fronti koje se šire na istom području međusobno spoje, što može dovesti do interakcije i stvaranja većeg požara s brzom stopom širenja. Ovakav požar se zove spojeni požar (engl. *Junction Fire*). Ova situacija se često pojavljuje u gašenju požara i operacijama kontroliranog paljenja. Interakcija dviju požarnih fronti povezana je s konvektivnim strujama⁵ koje se pri tome generiraju i može poprimiti obilježja ekstremnog ponašanja požara.

Najjednostavnija situacija je interakcija dviju identičnih i/ili paralelnih požarnih fronti koje se šire na ravnom i horizontalnom terenu kada nema vjetra. U tom slučaju, obje požarne fronte šire se istom brzinom. Kada su udaljene jedna od druge, njihova stopa širenja jednaka je osnovnoj stopi širenja, ali kako se približavaju, stopa širenja postupno raste zbog intenziviranja konvektivne struje koju generiraju. Kada se spoje, intenzitet širenja iznenada se povećava i doseže vrlo visoke vrijednosti.

Povećanje intenziteta tijekom interakcije fronti, čak i ako traje samo relativno kratko vrijeme, može dovesti do razvoja ekstremnog požara. Zbog toga je prilikom planiranja gašenja požara potrebno osigurati da se interakcija dviju požarnih fronti odvija dovoljno daleko od rubova izgorjelog područja kako bi se izbjegli problemi s mogućim spot požarima.

U slučaju vjetra ili nagiba, fronta koja ide protiv vjetra ili niz padinu u početku će napredovati sporije, ali kada dosegne novu požarnu frontu, ponašanje se mijenja. U završnoj fazi interakcije također dolazi do povećanja intenziteta širenja. Ako požari počnu na maloj udaljenosti jedan od drugog, međusobno djeluju u svom rastu sve dok se ne spoje, što može dovesti do nastanka ekstremnog požara. Ako požari počnu na kratkoj udaljenosti od glavne požarne fronte, obično se privlače prema njoj. U slučaju jakog vjetra ili na većim udaljenostima, spot požari mogu se širiti neovisno i pridonijeti bržem razvoju požara.

Posebna situacija spajanja fronti događa se kada dvije požarne fronte tvore kut između sebe i stvaraju oblik slova V. Prostor između dviju fronti s vremenom se troši, ali taj proces ne nastaje napredovanjem jedne požarne fronte prema drugoj, već napredovanjem vrha oblika V, tj. tamo gdje se dvije požarne fronte međusobno djeluju.

Viegas je sa suradnicima (Viegas et al., 2012.) istražio interakciju i spajanje dviju koso postavljenih i simetričnih požarnih fronti koje se sijeku u jednoj točki (stvarajući požarnu liniju u obliku slova V). Izvorno, su nazvali ovaj fenomen skokoviti požar (engl. *Jump Fire*) zbog iznenadnog povećanja stope širenja glavnog požara, ali nakon daljnjih analiza promijenili su taj naziv u spojeni požar. U posljednjem desetljeću nekoliko autora analiziralo je ovaj fenomen (Viegas et al., 2013.; Sharples et al., 2013.; Raposo et al., 2015.; Hilton et al., 2016.; Thomas et al., 2017.; Sullivan i Gould, 2019.; Filkov et al., 2020.; Ribeiro et al., 2023.). Rezultati su pokazali da su fronte i stopa širenja iznenada porasli od nule do vrijednosti reda veličine

⁵ Pojam "**konvektivni**" dolazi od riječi *konvekcija*, koja opisuje proces podizanja toplog zraka u atmosferi i spuštanja hladnijeg zraka, što uzrokuje stvaranje oblaka, oluja i drugih vremenskih fenomena. Pojam **konvektivne struje** odnosi na procese podizanja toplog i vlažnog zraka, koji se zatim hladi i kondenzira, tvoreći oblake i padaline.

stotinu puta većih od osnovne stope širenja. Nedavno su (Ribeiro et al., 2023.) istraživali učinak nagiba na spojene požare s dvije nesimetrične požarne fronte.

3.2.5. Jako veliki požari

Jako veliki požari (engl. *Conflagrations*) su oni koji nastaju pod jakim meteorološkim uvjetima s vjetrom, koji traju relativno dugo satima ili danima na velikim područjima, što dovodi do širokog širenja požara s visokim vrijednostima stope širenja i drugih manifestacija ekstremnog ponašanja požara, poput požara u krošnjama i spot požara, čak i na relativno ravnom terenu.

Požari koji su se dogodili u Portugalu 15. listopada 2017. bili su primjer ovakvog jako velikog požara. Tog dana bilo je više od 400 požarnih zapaljenja, od kojih je devet velikih požara spalilo ukupno više od 200.000 hektara i uzrokovalo smrt 52 osobe.

3.2.6. Vatreni vrtlozi

Još jedna manifestacija ekstremnog ponašanja požara su vatreni vrtlozi (engl. *Fire Whirls*) ili vatreni tornada (engl. *Fire Tornadoes*). Vatreni vrtlozi su strukture koje dosežu vertikalno nekoliko desetaka do stotine metara, a karakterizira ih vrlo snažan rotacijski pokret i mogu nositi stupac plamena u svojoj jezgri.

Vatreni vrtlozi nastaju zbog uzlazne struje stvorene požarom ili zagrijanim područjima tla i općenito su povezani s rotacijskim kretanjem uzrokovanim asimetrijama u strujanju zraka ili okolnom terenu. Rotacijsko kretanje odvija se oko vertikalne osi i slično je onome što se događa u ciklonima, ali na manjoj skali. U jezgri vatrene vrtloge, blizu osi rotacije, zrak rotira i doseže maksimalnu brzinu na rubu jezgre. Pritisak je najniži u ovom području i stoga je usisni efekt vatrene vrtloge najveći. Ova činjenica objašnjava zašto vatreni vrtlog proizvodi plamen ili stupac plamena velike visine.

Vatreni vrtlog može ostati relativno statičan, tj. njegova os je praktički fiksna na bilo kojem mjestu, ili se može kretati i nositi požar sa sobom. Kretanje je teško predvidjeti i može imati nepredvidivu putanju, tj. njegova os može promijeniti brzinu i smjer, naizgled bez ikakvog razloga.

Vatreni vrtlog je vrlo teško suzbiti, što opravdava njegovo uključivanje u slučajeve ekstremnog ponašanja požara. Kada vatreni vrtlozi prelaze s jednog gorućeg područja na drugo izvan perimetra požara, mogu postati izuzetno opasni. Zbog nepredvidivog kretanja, vatreni vrtlog može ući u područja gdje može uzrokovati vrlo opasno širenje požara.

U nekim slučajevima, vatreni vrtlog može se kretati na takav način da se interventni djelatnici nađu između tornada i glavnog požara protiv kojeg se bore, stvarajući vrlo opasnu situaciju.

Veliki šumski požari mogu rezultirati višestrukim vatrene vrtlozima zbog snažnih konvektivnih struja koje nastaju. Prisutnost atmosferske nestabilnosti pogoduje ovoj formaciji. Kao što je već spomenuto, vatreni vrtlozi imaju vrlo velike brzine vjetra – koje mogu doseći 100 do 200 km/h – što im daje veliku razornu snagu. Ovaj učinak se očituje u rušenju stabala ili dijelova zgrada, što dodatno povećava razornu moć požara (Viegas et al., 2017.).

Tornado se ponekad može vidjeti na izgorjelim područjima jer tornado usisava prašinu i pepeo. Nastanak ovih tornada rezultat je povećane apsorpcije sunčevog zračenja od strane tla koje je u ovim izgorjelim područjima potamnilo, što stvara uzlazne struje koje dovode do tornada.

3.2.7. Naglo rasplamsavanje požara (eksplozivna požarna događanja)

U određenim situacijama, interakcija požara s terenom i atmosferom može uzrokovati naglo rasplamsavanje požara koje se ponekad naziva eksplozivno požarno događanje (engl. *BUFE - Blow-up Fire Event*). Odnosi se na naglu i izuzetno brzu eskalaciju požara u kojoj se stopa širenja i intenzitet stalno povećavaju. Požar naglo raste, zahvaćajući velike površine i stvarajući opasne uvjete za vatrogasce i lokalne zajednice. Ovakvi događaji često uključuju pojave poput jakih konvektivnih struja, oblaka izazvanih

požarom (pirokumulonimbus), ili stvaranja vrtložnih plamenova (vatrenih tornada), što dodatno komplicira gašenje.

Obični, normalan požar se širi požarnom linijom i kroz spot požare. Za ove tipove požara potrebno je poznavanje terena, goriva i vremenskih uvjeta pogodnih za njihovo nastajanje.

Naglo rasplamsavanje požara zahtijeva prethodni nekontrolirani požar i određene uvjete terena i atmosferskog profila, koji zajedno omogućuju stvaranje pozitivnih povratnih petlji. Količina gorive materije pri tome nema izravnu ulogu. Uvjeti koji su potrebni da bi se dogodilo naglo rasplamsavanje požara uključuju:

1. Trenutno aktivan požar u odgovarajućem tipu goriva. Obično je grmlje i šumsko gorivo uključeno u ovakva događanja. Goriva koja brzo izgaraju, kao na primjer travnjaci, nemaju pri tome znatan utjecaj.
2. Naglo rasplamsavanje požara se temelji na tzv. dubokom sagorijevanju (engl. *Deep Flaming*). Sedam je uzroka koji mogu uzrokovati duboko sagorijevanje:
 - a. jaki vjetrovi kod kojih prednja strana požara prelazi veliku udaljenost tijekom vremena sagorijevanja
 - b. promjena smjera vjetra, čime bočna fronta postaje nova, veća prednja fronta širenja požara
 - c. eruptivni rast požara
 - d. lateralno širenje požara vođeno vrtloženjem koje je ujedno i glavni uzrok velike štete od ovakvih požara
 - e. nepravilna uporaba plamenika za operativno paljenje kontra vatri (engl. *drip-torch*)
 - f. gusta pojava spot požara i
 - g. unutarne zapaljenje kod kojega se ne-izgoreni dijelovi kasnije zapale, a njihova se toplinska energija dodaje se energiji glavnog požara.

Pri tome požar treba biti u određenim oblicima terena i u kritičnim trenucima, na primjer u kanjonima u vrijeme jakih vjetrova i niske vlažnosti goriva.

Kako bi se predvidjela pojava ovakvih požara važno je znati što se događa iznad terena zahvaćenog požarom. Treba promatrati oblake, koristiti meteorološke balone i izvore iz avijacije. Konvektivna kapa je kritična. Dnevni vremenski ciklus je dominantniji, samo 30% eksplozivnih događanja se događa tijekom noći. To često zahtijeva miješanje suhog zraka s viših slojeva, a može ga pospješiti i neravni teren. Postoje alati kojima se može predvidjeti nastajanje ovakvog požara, a koji su razvijeni na temelju proučavanja dosadašnjih događanja⁶.

Potencijalne posljedice naglog rasplamsavanja požara su višesatna eskalacija požara na jednom ili više sektora, koja se smatra nekontroliranom, a ponekad i teškim za preživljavanje. U vremenu od dva do tri sata ovakav požar može spaliti i 7.000 ha, prelazeći 16 km s širinom od 7 km. Ne mogu se nikako gasiti dok im intenzitet ne opadne. Najbolje je da nitko nije u blizini eksplozivnog požarnog događanja, ako se može predvidjeti dovoljno unaprijed. Za trajanje ovakvih požara planiranje intervencije bi trebao bi imati samo jedan cilj – spasiti živote. Sigurnosni problemi koji se pri tome javljaju su:

⁶ Posjetite http://www.highfirerisk.com.au/hpf/bufo_2.xlsx ili pogledajte prezentaciju <http://www.highfirerisk.com.au/hpf/bufo.pptx>

- Ne postoji glavna požarna fronta, što zahtijeva nove pristupe planiranju akcija.
- Gusta pojava spot požara, što povećava intenzitet u zonama spajanja i uzrokuje brzi gubitak svjesnosti o stanju na terenu.
- Izgaranje uz niske razine kisika, što dovodi do neobičnih fenomena požara.
- Eruptivni rast, što omogućava ubrzanje požara uz kanjone i stvaranje visokih plamenova.
- Može biti preopasno koristiti operativna paljenja (kontra vatre).
- Brzi gubitak sigurnog izlaza, što može dovesti do požarnih nesreća.
- Vjetrovi koji na kraju prelaze iz pravilnog (laminarnog) toka niz padinu u kaotični (turbulentni) tok, mijenjajući ponašanje požara.

Ostale sektore zahvaćene požarom kod kojih još nema naglog rasplamsavanja požara treba kontinuirano procjenjivati za sigurnost. Problemi se ne pojavljuju zbog naleta vjetra, zato što se požarni oblak (pirokumbulus) se obično formira niz vjetar od terena zahvaćenog požarom. Problemi se javljaju zbog refleksija s konvektivne kape, osobito gdje teren približi požar konvektivnoj kapi.

Temeljno pitanje je kako se nositi s ovakvim požarom? Neki od savjeta stručnjaka su:

- Držite požar izvan ključnih oblika terena u kritičnim trenucima.
- Analizirajte kada bi požar mogao ući u područja sklona eruptivnom rastu.
- Pokušajte predvidjeti kada će se vjetrovi pojačati ili kada će vlažnost goriva pasti ispod 5%.
- Planirajte unaprijed preventiva djelovanja, na primjer uklanjanjem gorive materije kontroliranim paljenjem potencijalno opasnih područja kada su uvjeti povoljniji.
- Evakuirajte stanovništvo ispred područja u kojem se očekuje naglo rasplamsavanje požara. Kada ovakav požar krene, svi su ugroženi.

Kod požarne intervencije, posebno kod ekstremnih ponašanja požara dobro je oformiti **Tim za upravljanje incidentom** (engl. *Incident Management Team*) koji ima prvenstveno ulogu u održavanju sigurnosti. U njega bi trebalo uključiti:

- **Sigurnosnog časnika** koji osigurava da svi znaju što im je raditi.
- **Analitičara ponašanja požara** koji daje detaljne prognoze na temelju simulacije ponašanja požara.
- **Situacijskog časnika / planera** koji osigurava prikladne informacije o trenutnom događanju na terenu i planira buduće akcije.
- **Operativnog časnika / voditelja incidenta** koji primjenjuje donesene planove.
- **Terenske promatrače na tlu i u zraku** koji osiguravaju pravodobne i pravovaljane informacije s terena.

Za sve ove ekstremne situacije se treba pripremiti, na način da se osigura odgovarajuća obuka koja pokriva terminologiju i znanje o ekstremnom ponašanju požara. Sigurnosna poruka koja se odnosi na neobične sigurnosne rizike zahtijeva da svi u lancu razumiju korištene pojmove, a isto vrijedi i za donošenje odluka.

4. Specifični požari – kako njihovi izazovi utječu na gašenje

4.1. Požari u graničnom području naseljenih i divljih (prirodnih) područja

Sučelje divljih (prirodnih) i urbanih područja (engl. *WUI – Wildland-urban Interface*) obuhvaća graničnu zonu u kojoj su prisutne i vegetacija i infrastruktura, uz povremenu ili stalnu prisutnost ljudi. U ovim se područjima, osim vegetacije, nalaze i različite vrste infrastrukture koje ljudi koriste ili borave u njima, što im daje poseban karakter i zahtijeva specifičan pristup. Zbog tipičnih ljudskih aktivnosti u ovim područjima, vjerojatnost zapaljenja je veća nego u divljim područjima u kojima nema ljudi. Osim toga, izloženih (engl. *Exposure*) i ranjivost (engl. *Vulnerability*) ovih područja također je veća, što naglašava moguće gubitke ljudskih i životinjskih života, kao i potencijalnu štetu na infrastrukturi s visokim ekonomskim, socijalnim i/ili kulturnim značajem.

Postoji nekoliko klasifikacija ovakvih graničnih područja. Jedna od njih se odnosi na koegzistenciju vegetacije i infrastrukture. Obično se spominju tri tipa:

- a) sučelje (engl. *Interface*)
- b) zaklonjeno sučelje (engl. *Occluded WUI*) i
- c) izmiješano sučelje (engl. *Intermix*).

Tip **sučelje** uključuje jasnu granicu između područja infrastrukture i područja prekrivenih vegetacijom. Obično se sučelje odnosi na izgrađeno područje okruženo šumom. Unutar ove tipologije postoji posebna situacija izoliranih zgrada okruženih vegetacijom. Međutim, također se može dogoditi da se šumski pojas pojavljuje okružen zgradama, kao što je slučaj s gradskim parkovima, a to se naziva **zaklonjeno sučelje**. Također postoji mogućnost u kojem su vegetacija i infrastruktura izmiješane na istom području. Ovaj je tip poznatom kao **izmiješano sučelje**.

Druga klasifikacija se temelji se na vrsti infrastrukture koja je prisutna. Scenarij u kojem vegetacija koegzistira s tipično urbanim zgradama (npr. stambene kuće, poslovne ili uslužne zgrade, itd.) naziva se **urbano-šumsko sučelje** (standardno) (engl. *Urban-forest Interface (Standard)*). Ako su zgrade industrijske, naziva se **industrijsko-šumsko sučelje** (engl. *Industrial-forest Interface*). Postoji i poseban tip tzv. **linearno sučelje** (engl. *Linear WUI*) gdje se infrastrukturni elementi protežu duž linije, poput željezničkih pruga, autocesta ili mreže za distribuciju električne energije.

S obzirom na jedinstvene karakteristike, heterogenost i složenost scenarija, izazovi povezani s požarima na ovakvim graničnim područjima značajno se razlikuju od onih s kojima se suočavamo u požarima raslinja u nenastanjenom području. Glavni izazovi povezani s tri glavne komponente graničnog područja navedeni su u nastavku.

4.1.1. Prirodna goriva – vegetacija

Vegetacija prisutna na graničnom području obično se dijeli na spontanu i upravljanu/ukrasnu vegetaciju. U "standardnom tipu sučelje, posebno u područjima udaljenijim od zgrada, vegetacija je najčešće spontana i slična vegetaciji koja se nalazi u divljim (prirodnim) područjima. Slična je situacija i u linearnom sučelju.

U zaklonjenim scenarijima sučelja, vegetacija može biti spontana ili ukrasna (odabrane vrste), obično pažljivije održavana nego u standardnom sučelju. U slučaju izoliranih zgrada (poseban slučaj sučelja) ili u izmiješanom scenariju, uobičajena je ukrasna, dobro održavana vegetacija. Održavanje vegetacije obično uključuje zalijevanje, što je vrlo korisno za smanjenje rizika od požara jer povećava vlažnost goriva. Biljne vrste u ovim scenarijima također se razlikuju od spontane vegetacije, s različitim stupnjem zapaljivosti. Na primjer, hortenzije imaju vrlo povoljna svojstva za smanjenje rizika od požara,

ali neke druge vrste poput lovorovih stabala imaju mnogo veće vrijednosti zapaljivosti nego neke spontane vrste (Almeida et al., 2022.).

Živice tipične za vrtove, koje su često blizu zgrada, mogu predstavljati značajnu opasnost od požara ako nisu pravilno odabrane i održavane. Neke vrste kao npr. čempresi, osobito kada se orezuju radi održavanja željenog oblika, akumuliraju u unutrašnjem dijelu puno suhog gorivog materijala, što ih čini vrlo sklonima intenzivnom gorenju. Druge vrste živica kao npr. lovor višnja iz porodice ruža odbacuju mrtvi materijal, pokazujući povoljnije ponašanje za upravljanje rizikom od požara. Ribeiro i Almeida (Ribeiro i Almeida, 2020.) predstavili su studiju koja detaljno opisuje zapaljivost različitih vrsta koje se često koriste u živicama.

4.1.2. Umjetna goriva

Umjetna goriva (engl. *Man-made Fuels*) obuhvaćaju sva goriva koja nisu vegetacija, uključujući infrastrukturu (ili njezine najzapaljivije komponente), opremu (npr. vozila, električni kablovi, industrijske strojeve na otvorenom) i druge vrste goriva (npr. drva za ogrjev, plinske boce).

Ta goriva su toliko raznolika da značajno otežavaju razumijevanje, karakterizaciju i modeliranje ponašanja požara u graničnom području, jer su njihove zapaljive karakteristike vrlo heterogene. Osim toga, ti elementi mogu predstavljati i dodatni izvor opasnosti, zato što se vezano uz njihovo zapaljenje može pojaviti izgaranje u obliku usporene eksplozije (deflagracija), stvarna eksplozija (npr. plinske boce), urušavanja i gnječnja (npr. pad konstrukcije) ili strujni udar (npr. kod pada električnih kabela).

4.1.3. Ljudi

Prisustvo ljudi na mjestu požara donosi nekoliko poteškoća, ne samo zbog povećane odgovornosti za zaštitu tih pojedinaca, već i zato što su ljudi često pod stresom, pokazujući ponašanje vođeno panikom. Osim toga, među populacijom mogu biti prisutni pojedinci s posebnim potrebama, poput djece, starijih osoba ili osoba s zdravstvenim (npr. srčano-respiratornim problemima), fizičkim ili psihološkim ograničenjima. Stoga odluka o evakuaciji ili skloništu na mjestu, o čemu će biti riječi u odjeljku 6.2., zahtijeva uravnoteženo razmatranje koje uzima u obzir različite faktore.

Iako je rizik od požara u graničnom području često povezan s dolaskom plamena, mehanizam prijenosa žarećih čestica i iskri donosi najveće poteškoće. U studijama koje su proveli (Ribeiro et al., 2020.) na 963 zgrade pogođene požarima raslinja u Pedrógão Grandeu u Portugalu 2017. godine, 61% je zapaljeno prijenosom žarećih čestica i iskri, dok je samo 21% počelo gorjeti zbog izravnog kontakta s plamenom. Važno je napomenuti da su krovovi (62% slučajeva) i prozori (16%) bili strukturalne komponente koje su pokazale najveću ranjivost na požare raslinja.

U izvješću o šumskim požarima od 15. listopada 2017. godine u Portugalu, (Viegas et al., 2019.) opisali su da je od 140 industrijskih objekata oštećenih nizom požara tog dana, 53% je zapaljeno prijenosom žarećih čestica i iskri, a 27% je zapaljeno izravnim udarom plamena. U ovom slučaju, otvori (29%), zidovi (19%) i krovovi (17%) bili su strukturalni elementi koji su prvi kompromitirali integritet strukture.

U zaključku, granično područje naseljenih i divljih (prirodnih) područja predstavlja dinamično i složeno okruženje koje uvodi posebne izazove u upravljanje požarima. Koegzistencija prirodnih goriva i umjetnih goriva, uključujući različite infrastrukture i opremu, stvara složeno ponašanje požara koje je teško predvidjeti i modelirati. Prisutnost ljudi dodatno komplicira situaciju jer instinktivne reakcije panike, zaštite imovine pod svaku cijenu, ili čak iracionalna volja za pomoć otežavaju operacije gašenja. Prijenos žarećih čestica i iskri se pojavljuje kao kritičan mehanizam, koji značajno doprinosi širenju požara i predstavlja veliku prijetnju za infrastrukture. Studije pokazuju da je prijenos žarećih čestica i iskri najčešći uzrok zapaljenja zgrada tijekom požara, naglašavajući sklonost krovova i prozora zapaljenju. Heterogenost

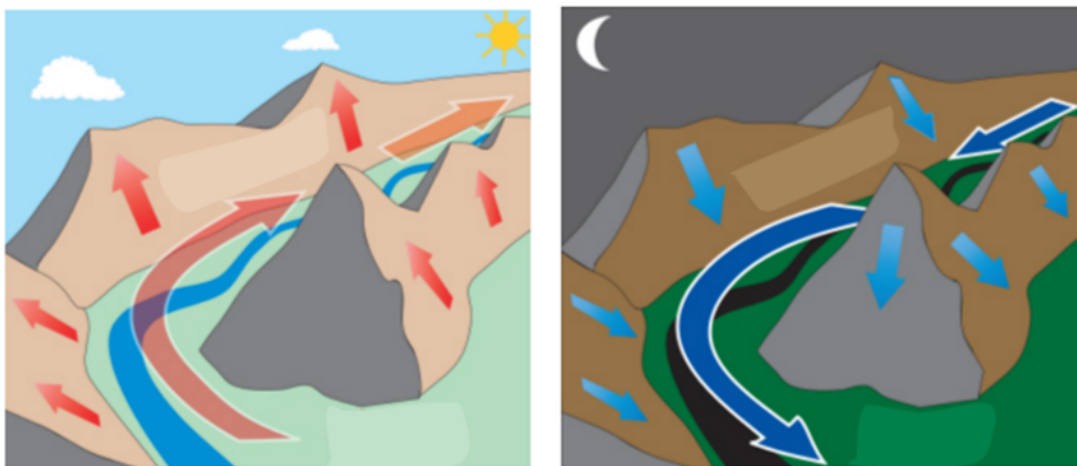
i jedinstvene karakteristike graničnih područja zahtijevaju sveobuhvatne pristupe za učinkovitu prevenciju i smanjenje rizika od požara.

4.2. Požari na velikim nadmorskim visinama

Požari na velikim nadmorskim visinama u planinskim područjima karakteriziraju se specifičnim ponašanjem koje može biti vrlo različito od normalnog ponašanja požara na ravninskim područjima. Problemi i utjecaj ovih požara na populaciju i ekosustave također imaju vrlo specifične karakteristike (Mayer et al., 2020.).

4.2.1. Ponašanje vođeno topografijom

Prva specifičnost ovakvih požara je način širenja požara. Snažni nagibi uz padine i prisutnost dolina stvaraju lokalne vjetrove, koji uvelike utječu na način na koji se požari šire. Ti vjetrovi su uzrokovani toplinskim zračenjem koje varira od vrhova do udolina. Riječ je o dnevnom fenomenu, stoga se ponašanje požara, pa čak i smjer širenja, mijenjaju tijekom dnevnog ciklusa (slika 4).



Slika 4: Vjetar uz padinu i u dolinama tijekom dana (lijevo) i noći (desno) (izvor: Meteo France)

Kada vjetar uz padinu raste, tijekom popodnevni sati, požar se vrlo brzo širi prema gore, a pogotovo u uskim kanjonima. Jednom kada stigne na vrh, frontalno širenje prestaje, a požar se polako širi u širinu, što se povećava tijekom noći.

4.2.2. Sigurnosni problemi

Kada je nagib strmiji od praga koji iznosi otprilike 20° , plamen se može prilijepiti uz padinu (Edgar et al., 2016.). To rezultira dramatičnim povećanjem brzine širenja požara, tako da cijela padina može biti zapaljena u nekoliko minuta, ponekad čak i u nekoliko desetaka sekundi. Ovaj fenomen doveo je do nekoliko situacija u kojima su vatrogasci bili zarobljeni, što će biti opisano u sljedećim poglavljima.

4.2.3. Izazovi pristupa i odgovora

Zbog topografije, pristup požarima na velikim nadmorskim visinama općenito je izazovan. Ceste i staze su uske i ne mogu se koristiti za teške vatrogasne kamione s vodom. Za kopnene resurse ponekad je potrebno nekoliko sati hodanja da bi se došlo do linije požara s najbliže pristupačne ceste.

Kao rezultat toga, ta područja ne mogu biti pokrivena ekipama kamiona, kao što je to slučaj na ravnijim područjima. U ovim slučajevima u gašenju požara najkorisniji su:

- Zračni resursi, osobito helikopteri s fleksibilnim mogućnostima za ispuštanje vode i prijevoz timova vatrogasaca s opremom.
- Laka terenska vozila s pogonom na sva četiri kotača.
- Specijalizirani timovi vatrogasaca sa sljedećim sposobnostima:
 - dobra obuka (uključujući sigurnosna pitanja) i iskustvo u požarima
 - dobra tjelesna spremnost za kretanje po planinskom terenu
 - sposobnost korištenja ručnih alata
 - sposobnost prikupljanja vode iz udaljenih izvora
 - sposobnost korištenja taktičkog spaljivanja kontra požarima i
 - autonomija i fleksibilnost za prilagodbu promjenama u ponašanju požara.

Navedeni specijalizirani timovi obično pješalice do linije požara ili ih helikopteri prevezu blizu požarišta.

4.2.4. Utjecaj požara na velikim nadmorskim visinama

U planinskim područjima čak i mali požari mogu imati razorne posljedice. Spaljivanje vegetacije koja stabilizira tlo izaziva kaskadne učinke:

- odlomci stijena
- klizišta
- padine sklone lavinama i
- erozija tla.

Zbog dugog ciklusa regeneracije šume na velikim visinama požari dugoročno narušavaju zaštitnu funkciju šume na tlu (Mayer et al., 2020.).

4.3. Požari u visokim geografskim širinama

Visoke geografske širine Europe (Britansko otočje, Norveška, Švedska, Finska i baltičke države) obično ne izazivaju veliku pažnju kada su u pitanju požari raslinja. Godine s dugotrajnim sušama redovito se događaju, ali ponekad s nekoliko vlažnih sezona između njih (Sjöström & Granström, 2024.). Veći dio Švedske, Finske i baltičkih zemalja pripada borealnom ili polu-borealnom području, gdje prevladavaju intenzivno upravljane crnogorične šume s malim udjelom bjelogoričnih stabala. Norveška i sjeverni dio Ujedinjenog Kraljevstva imaju mnogo visokih planina na kojima rastu obalni vrijesci i obalne crnogorične šume, dok je ostatak Ujedinjenog Kraljevstva uglavnom prekriven obradivim zemljištem i travnjacima (Morton et al., 2020.).

4.3.1. Goriva i pejzaži

Ako su dovoljno suhe, borealne šume imaju vrlo zapaljive slojeve goriva. Mješavina uglavnom škotskog bora i norveške smreke pogoduje dubokom sloju mahovina, često prošaranom patuljastim grmljem, što čini izvrsno gorivo tijekom suhog vremena. Biljke bez vaskularnog sustava, poput mahovina, izravno razmjenjuju vlagu s zrakom i postaju suhe poput finog otpada tijekom suhog ljetnog dana. Prije početka industrijskog šumarstva (sredinom 19. stoljeća), borealni dijelovi imali su 100 puta veću spaljenu površinu nego u modernim režimima požara (Niklasson & Granström, 2000.). Dobro uspostavljena infrastruktura za pristup šumama i visoki poticaji za suzbijanje požara u produktivnim šumama doveli su do značajnog smanjenja spaljenih površina. Nasuprot tome, u udaljenim područjima Sjeverne Amerike i

Sibira, požari često gore u isključivo divljim područjima s lošom dostupnošću i ograničenim ljudskim resursima u smislu zgrada ili infrastrukture.

U Ujedinjenom Kraljevstvu i Norveškoj požari uglavnom zahvaćaju otvorene pejzaže prekrivene vrieskom i travnjacima (Davies et al., 2013.). Požari u tim regijama uglavnom su koncentrirani u proljeće, prije nego što tradicionalni indeksi opasnosti od požara postanu visoki. Razlog je taj što uspavana fenološka faza sjevernih grmlja i travnjaka pruža velike količine suhog laganog goriva koje brzo postaje zapaljivo pri niskoj vlažnosti, unatoč zasićenom tlu. To može uzrokovati požare koji se brzo šire tijekom povremenih suhih razdoblja tijekom dijela zime bez snijega, poput norveških požara u Lærdalu i Frøyi u siječnju 2014. (Log, 2016.) i nekoliko požara na otočićima uz škotsku obalu (Fulton, 2024.). Tijekom razdoblja vegetacije (kada je prisutna visoka opasnost od šumskih požara), ovi pejzaži manje su skloni požarima zbog zelene vaskularne vegetacije koja zadržava visok sadržaj vlage u sloju goriva.

4.3.2. Demografski čimbenici

Kao i u većini regija, pojava požara prati gustoću naseljenosti, ali najveći i najintenzivniji požari u sjevernoj Europi javljaju se u rijetko naseljenim područjima. Problemi vezani s požarima u ovim područjima su (Sjöström & Granström 2023a.):

- (i) dugo vrijeme za otkrivanje požara
- (ii) dugo vremena za pronalazak požara i dolazak do njega i
- (iii) fiskalna ograničenja koja rezultiraju nedostatkom resursa i osoblja.

Budući da se vjerojatnost izbijanja požara povećava eksponencijalno s vremenom potrebnim za početak intervencije, velike udaljenosti na sjeveru predstavljaju izazov, što je dodatno otežano smanjenjem broja stanovnika od 1970-ih godina. To je rezultiralo duljim udaljenostima između vatrogasnih postaja i duljim vremenima odgovora za (uglavnom honorarne ili volonterske) vatrogasce. Prije pedeset godina znanje o borbi protiv požara raslinja bilo je rasprostranjeno među stanovništvom, ali danas je to vještina poznata samo malobrojnim, što stvara poteškoće tijekom požarnih sezona.

4.3.3. Izazovi i poboljšanja uočena tijekom posljednjih desetljeća

Osnovni nedostaci i izazovi kod gašenja požara na visokim zemljopisnim širinama su:

- Tijekom 1990-ih i početkom 2000-ih godina, dostupnost resursa u borealnoj Europi se smanjila, što je rezultiralo povećanjem vremena odgovora na šumske požare.
- Potencijal širenja plamena u komercijalnim proizvodnim šumama vrlo je velik, ali često podcijenjen tijekom početnog napada.
- Nedostatak resursa i nedovoljno gašenje (što je odgovornost vlasnika zemljišta) bili su dva glavna čimbenika velikih požara diljem Skandinavije tijekom 2018.
- Gašenje požara u hladnim, tamnim i vjetrovitim uvjetima zahtijeva veću pripravnost. Tijekom norveških zimskih požara 2014. godine, uništeno je gotovo 100 zgrada (neke s popisa UNESCO-ve svjetske baštine). Vremenski uvjeti onemogućili su korištenje helikoptera, a cijevi su se zaledile na niskim temperaturama (Log, 2016.).
- Sustav upravljanja požarima u Ujedinjenom Kraljevstvu ne uzima u obzir fenološke aspekte i ne može dati točne prognoze za većinu požara.

Posljednjih pet godina došlo je i do nekih poboljšanja:

- Državni i programi financirani od strane EU za zračno gašenje (Švedska i Norveška) povećali su korištenje zrakoplova ili helikoptera u ranim fazama požara, za razliku od prethodnih desetljeća kada su zračni resursi korišteni tek nakon neuspjeha početnog napada.

- Reorganizacija vatrogasnih službi prema središnjem zapovijedanju i kontroli omogućuje lakši pristup resursima u izrazito ruralnim područjima.
- Veći angažman ranog otkrivanja povećava uspješnost ranog suzbijanja.
- Većina zgrada gori u proljetnim požarima u vrlo malim požarima, često započinjući neposredno izvan (ili unutar) vrtova zbog spaljivanja vegetacije. Potencijal za poboljšanje je povećanje svijest o riziku spaljivanja vegetacije i druge metode zbrinjavanja te zimske vegetacije.
- Model upozorenja za proljetne požare trave operativan je u Švedskoj od 2021. godine (Sjöström & Granström, 2023b.).

4.3.4. Čimbenici za budućnost

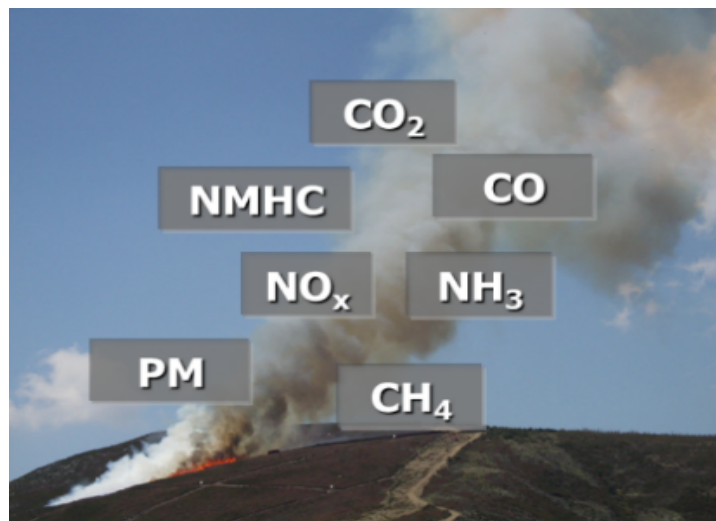
Čimbenici koji će u budućnosti utjecati na požare raslinja u visokim zemljopisnim širinama su:

- Nastavak depopulacije ruralnih područja pogoršat će poteškoće kod zapošljavanja vatrogasaca.
- Jednostavne metode upravljanja zemljištem koje uključuju:
 - (i) ograničavanje sadnje bora *Pinus contorta*, koji je zapaljiviji od domaćeg *Pinus sylvestris*
 - (ii) ograničavanje agresivnog prorjeđivanja bjelogoričnog drveća (uglavnom breza ili jasika).
 Uključivanje bjelogoričnog drveća smanjuje zapaljivost sloja mahovine (Vermina Plathner et al., 2022.).
- Obuka vatrogasaca nakon nekoliko sezona s lošim vremenskim uvjetima za požare. Gašenje mora biti koordinirano i završeno s tla, a ne iz zraka. Znanje o taktikama i metodama brzo blijedi bez prakse.
- Jednostavne prakse održavanja vrtova koje značajno smanjuju požare zgrada su: (i) održavanje travnjak oko zgrade, (ii) smanjenje hrpe goriva blizu fasada i (iii) bjelogorično drveće oko vrta (Vermina Plathner et al., 2023.).

5. Emisija i raspršivanje dima

5.1. Emisija dima

Dim koji se oslobađa tijekom šumskih požara sadrži značajne količine ugljičnog dioksida (CO_2), ugljičnog monoksida (CO), metana (CH_4), dušikovih oksida (NO_x), amonijaka (NH_3), čestica (PM) (koje se obično odnose na čestice s ekvivalentnim aerodinamičkim promjerom manjim od $2,5 \mu\text{m}$, označenih kraticom $\text{PM}_{2.5}$, te čestice s promjerom manjim od $10 \mu\text{m}$, označenih kraticom PM_{10}), ne-metanskih ugljikovodika (NMHC) i drugih kemijskih spojeva. Slika 5 prikazuje različite spojeve koji čine dim. Ovi spojevi mogu imati ozbiljne posljedice na lokalnu i regionalnu kvalitetu zraka (npr. Valente i dr., 2007.; Miranda i dr., 2009.; Carvalho i dr., 2011.; Martins i dr., 2012.; Keywood i dr., 2015.; Osswald i dr., 2023.), smanjujući vidljivost, doprinoseći fotokemijskom smogu i općenito pogoršavajući kvalitetu zraka, što utječe na ljudsko zdravlje (npr. Miranda i dr., 2010., 2012.; Johnston i dr., 2012.; Dennekamp i dr., 2015.; Reid i dr., 2016.; Haikerwal i dr., 2016., Sebastião i dr., 2019.).



Slika 5. Neki od spojeva dima emitiranih tijekom požara raslinja

Procjena emisije iz požara raslinja moguća je uzimajući u obzir različite međusobno povezane čimbenike o kojima ona ovisi: karakteristike goriva, učinkovitost sagorijevanja, fazu izgaranja, tip požara, meteorološke uvjete i geografsku lokaciju. Za procjenu emisija iz šumskih požara također je potrebno znati površinu koja je izgorjela i trajanje požara.

Vrsta vegetacije i njezino opterećenje gorivom (ili opterećenje biomasom) dva su od najvažnijih čimbenika za procjenu emisija iz požara raslinja. Varijacije u karakteristikama goriva mogu pridonijeti s 80% nesigurnosti u procjeni emisija iz šumskih požara (Ottmar i dr., 2009.).

Prilikom procjene emisija, treba uzeti u obzir različite faze izgaranja, uključujući fazu prije zapaljenja, te faze plamena, tinjanja i žarenja. Trajanje ili dominacija različitih faza ovisi o vrsti/smjesi goriva, njegovoj vlažnosti i atmosferskim uvjetima. Prema (Lobertu i Warnatzu, 1993.), tijekom faze plamena, najviše emitirani spojevi su CO_2 i vodena para, te u manjoj količini, NO_x , sumporov dioksid (SO_2), dušik (N_2) i čestice s visokim udjelom ugljika. Oksidirani spojevi prevladavaju kod visoke učinkovitosti sagorijevanja. U fazi tinjanja, emisije spojeva koji su djelomično oksidirani ili reducirani su dominantni, npr. CO , CH_4 , NMHC , policiklički aromatski ugljikovodici (PAH), NH_3 , sumporni spojevi i čestice s niskim udjelom ugljika. Međutim, ugljični monoksid CO je glavni spoj povezan s ovom fazom.

Učinkovitost sagorijevanja također je važna prilikom izračuna emisija iz požara. Obično se definira kao omjer između ugljika oslobođenog u obliku CO_2 i ukupnog ugljika u gorivu. Također je uobičajeno koristiti modificiranu učinkovitost, koja se sastoji od omjera između ugljika oslobođenog u obliku CO_2 i

zbroja CO₂ i CO. U eksperimentalnim, terenskim ili laboratorijskim uvjetima, učinkovitost sagorijevanja izražava se kao dio dostupnog goriva koji je potrošen i izravno ovisi o vrsti vegetacije i njenom sadržaju vlage.

Konačno, faktor emisije sastoji se od mase zagađivača emitiranog po masi potrošenog goriva ili spaljene površine. Faktori emisije variraju ovisno o zagađivaču, gorivu i učinkovitosti sagorijevanja (i fazi izgaranja). Na primjer, požari koji se uglavnom javljaju u fazi tinjanja mogu emitirati masu zagađivača (isključujući ugljikov dioksid) nekoliko puta veću nego požari u kojima se gorivo troši tijekom faze plamena (Peterson, 1987.).

Za južnoeuropske uvjete izabrani su faktori emisije (Fernandes i dr., 2022.) temeljem bibliografske analize, uzimajući u obzir vrste korištenja zemljišta, kao i vrijednosti iz prethodnih studija (Miranda 2004.; Alves i dr., 2011.; Martins i dr., 2012., Van Der Werf i dr., 2017.; Vicente i dr., 2017., 2012.). Tablica 3 prikazuje prosječne faktore emisije (u g/kg spaljenog goriva, na suhoj osnovi) za relevantne zagađivače zraka. Sve navedene vrijednosti dobivene su iz eksperimentalnih šumskih požara.

Tablica 3. Prosječni faktori emisije (g/kg spaljenog goriva, na suhoj osnovi) glavnih zagađivača dima, po vrsti vegetacije (Fernandes i dr., 2002.)

vrsta	eucalyptus ^{c, d, e}	ostali smolasti ^b	hrast, kesten, hrast plutnjak ^b	bagrem ^{c, d, e}	ostalo tvrdo drvo ^a	primorski bor ^{c, d, e} (Pinus pinaster)	pinija ^b (Pinus pinea)
PM10	21	10	13	11	8.3	13	10
PM2.5	19	9	11	10	6.3	11	9
NOx	5	3	3	5	3.11	3	5
CO	170	100	128	232	102	204	91
SO ₂	0.8	0.8	0.8	0.8	0.4	0.8	0.8
NH ₃	0.6	0.6	0.6	0.6	2.17	0.6	0.6
CO ₂	1408	1497	1393	1561	1585	1398	1487
CH ₄	6	6	6	4.7	5.82	6	5

a Van Der Werf et al. (2017.)

b Miranda (2004.)

c Vicente et al. (2012.)

d Vicente et al. (2017.)

e Alves et al. (2011.)

U današnje vrijeme znanstvena zajednica ulaže značajne napore u kvantificiranje utjecaja šumskih požara korištenjem metoda daljinskog prikupljanja podataka za poboljšanje procjene emisija (npr. Monteiro i dr., 2013.; Ichoku i Ellison, 2014.; Darmenov i da Silva, 2015.; Chuvieco i dr., 2016.; Van Der Werf i dr., 2017.). Osim toga, koristi se trenutna zračena (radijativna) snaga požara (engl. *FRP - Fire Radiative Power*) kao mjera brzine emisije zračene energije iz požara, kako bi se izravno odredila količina spaljenog goriva, posebno radi olakšavanja primjene u stvarnom vremenu (Sofiev i dr., 2009.; Kaiser i dr., 2012.; Nguyen i dr., 2023.).

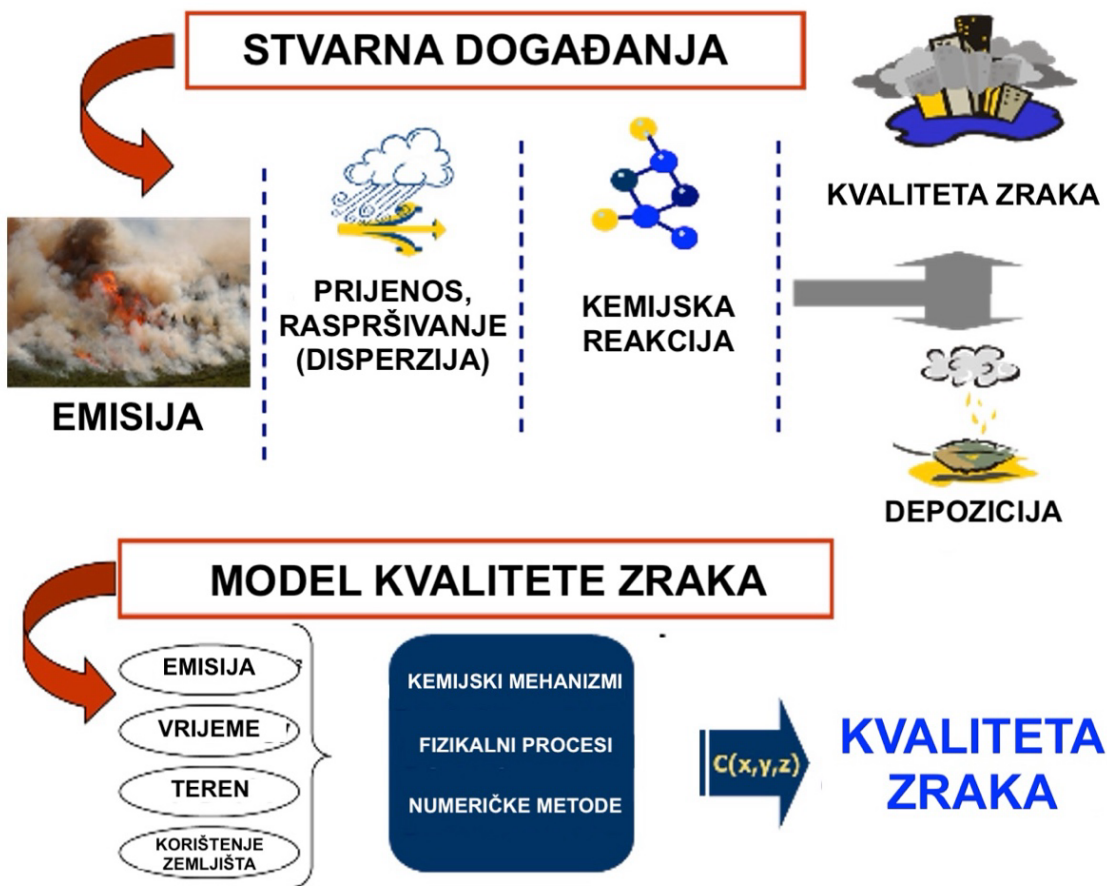
5.2. Raspršivanje dima

Emitirani plinovi i čestice podliježu raspršivanju i kemijskim transformacijama u atmosferi tijekom prijenosa, a njihovi se učinci mogu osjetiti na velikim udaljenostima od izvora, tj. od vatre. Iako je većina požara ograničena na nekoliko stotina hektara, njihovi se učinci, bez prirodnih ili političkih granica, mogu osjetiti i na znatnim udaljenostima od fizičkih granica napredovanja požara. Ovisno o vremenskim uvjetima, dimne zavjese mogu ostati u atmosferi dugo vremena, mijenjajući njezina fizikalno-kemijska svojstva.

Kvaliteta zraka u određenoj regiji, koja se često izražava kao koncentracija zagađivača, ovisi, osim o emisijama, i o fizikalnim fenomenima koji reguliraju dinamiku atmosfere, odnosno prijenosu i raspršivanju, kemijskim transformacijama koje prolaze zagađivači (npr. fotokemijski procesi), te mehanizmima uklanjanja tih zagađivača iz atmosfere (suha i mokra depozicija).

Procjena učinaka požara na kvalitetu zraka može se temeljiti na mjerenjima i/ili rezultatima numeričkih modela. Unatoč nekim specifičnim kampanjama monitoringa (npr. Miranda i dr., 2005.; Valente i dr., 2007.; Miranda i dr., 2010.), mjerenja kvalitete zraka obično se ne provode posebno za situacije koje uključuju požare raslinja, a podaci se uglavnom dobivaju iz dostupnih mreža za praćenje kvalitete zraka. Primjena modela za procjenu doprinosa požara epizodama zagađenja zraka postaje sve češća tehnika (npr. Rea i dr., 2016.; Turquety i dr., 2020.; Osswald i dr., 2023.).

Numerički model za kvalitetu zraka ima za cilj procijeniti polja koncentracije $C(x,y,z,t)$ određenog atmosferskog zagađivača uzrokovanog njegovom emisijom u atmosferu. Slika 6 prikazuje shemu modeliranja kvalitete zraka u odnosu na ono što nastoji simulirati. Model simulira interakcije zagađivača u atmosferi i njihov utjecaj na kvalitetu zraka, koristeći podatke o emisijama i meteorološkim vrijednostima, među ostalim podacima.

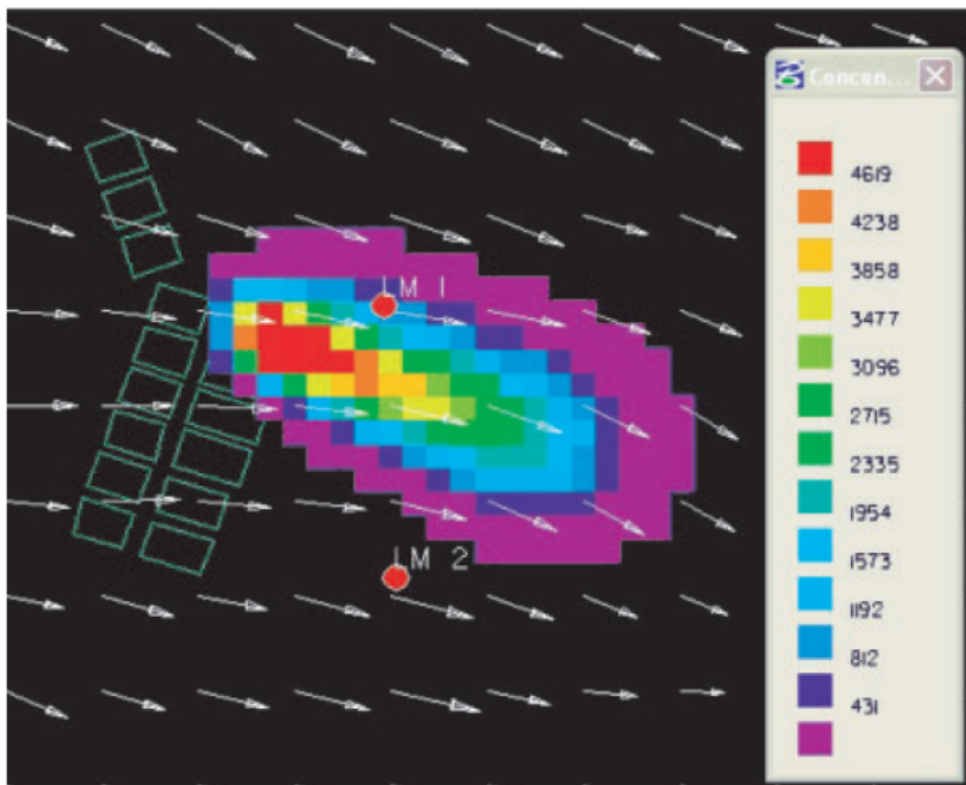


Slika 6. Shema pristupa modeliranju kvalitete zraka.

Postoji nekoliko numeričkih modela za kvalitetu zraka, ovisno o skali procesa koji se analizira i vrsti pristupa koja se koristi. S obzirom na prostornu skalu, razlikuju se globalni ili planetarni modeli od makro-skale, mezo-skale i mikro-skale (lokalni model). U vremenskom smislu, modeli se mogu klasificirati kao kratkoročni ili dugoročni. Prostorne i vremenske skale usko su povezane; na primjer, model lokalne skale obično je kratkoročan.

Jedan primjer lokalnog modela za raspršivanje je DISPERFIRE (Miranda i dr., 1994.; Valente i dr., 2007.), koji se temelji na Lagrangeovom pristupu za modeliranje raspršivanja. Primijenjen je na

eksperimentalnom terenskom požaru i provjeren s podacima dobivenim tijekom eksperimenata. Slika 7 prikazuje polje koncentracije PM10 koje je procijenio DISPERFIRE za spaljivanje eksperimentalnih parcela.



Slika 7. Polje koncentracije ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) PM10 simulirano lokalnim modelom za raspršivanje (Valente i dr., 2007.).

Simulirane vrijednosti uspoređene su s mjerenjima dobivenim opremom u mobilnom laboratorijskom kombiju (LM1 na slici 7), a raspon procijenjenih vrijednosti ($431\text{--}812 \mu\text{g}/\text{m}^3$) prilično se dobro slaže s izmjerenom vrijednošću za isto razdoblje ($486 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

U zaključku, razumijevanje proizvodnje i raspršivanja dima ključno je za sprječavanje njegovih učinaka na zdravlje ljudi, osobito vatrogasaca i populacije. Danas dostupno znanje, podaci i alati mogu pomoći u obuci relevantnih sudionika odgovornih za predviđanje i reagiranje na pojavu dima.

6. Metodologije gašenja požara

Anketu o strategijama i tehnikama suzbijanja požara raslinja provela je organizacija SAFE u travnju i svibnju 2023. godine kako bi osmislila ovo poglavlje. Ankete i intervjui bili su usmjereni na sljedeće aspekte:

- početni napad sa ciljem zadržavanja požara što manjima,
- gašenje ekstremnih požara,
- gašenje požara na sučelju divljih (prirodnih) i urbanih područja (WUI).

Anketa je prikupila odgovore 27 vatrogasaca iz deset zemalja: Španjolske, Portugala, Italije, Hrvatske, Francuske, Grčke, Irske, Rusije, Njemačke i Južne Afrike. Intervjui su provedeni s četiri stručnjaka: dvoje iz portugalske Nacionalne uprave za hitne slučajeve i civilnu zaštitu (sugovornici 1 i 2), jednim iz vatrogasne i spasilačke službe odjela Bouches du Rhône u Francuskoj (sugovornik 3) te jednim iz službe za šumske požare Castilla La Mancha u Španjolskoj (sugovornik 4).

6.1. Strategije i tehnike gašenja požara

Prema anketi, značajna većina od 89% vatrogasaca izjavila je da su strategije i tehnike koje su koristili bile učinkovite u suzbijanju požara tijekom početne faze odgovora ili početnog napada. Tehnike i strategije koje se koriste sažete su na slici 8, na temelju najčešće spomenutih strategija u anketama.



Slika 8. Zbirka pojmova povezanih sa strategijama i tehnikama gašenja požara raslinja korištenima u Europi. Najviše spominjana strategija je gašenje požara iz zraka (engl. Aerial). Često spominjani pojmovi su pre-pozicioniranje (engl. Pre-positioning), namjenski tim (engl. Dedicated Team), rana detekcija (engl. Early-detection), direktni napad (engl. Direct -attack), itd.

Ovo poglavlje ima za cilj razlikovati strategiju gašenja požara od tehnike gašenja požara. Strategija gašenja požara odnosi se na široki pristup ili plan razvijen za borbu i kontrolu požara. Nasuprot tome, tehnika gašenja požara odnosi se na specifičnu metodu ili pristup korišten za gašenje ili kontrolu požara.

6.1.1 Strategija gašenja požara

a) Zračna strategija

Zračne strategije u gašenju požara uključuju korištenje zrakoplova za borbu i kontrolu požara raslinja. Ove strategije koriste sposobnosti zrakoplova za provođenje različitih tehnika gašenja požara iz zraka, provođenje izviđanja i podršku operacijama gašenja s tla.

b) Strategija pre-pozicioniranja

Strategija pre-pozicioniranja u upravljanju požarima raslinja uključuje strateško raspoređivanje resursa i osoblja u područja visokog rizika kako bi se poboljšale sposobnosti odgovora i unaprijedili napori u suzbijanju požara. Cilj je smanjiti vrijeme reakcije i povećati učinkovitost u obuzdavanju i gašenju požara. Ova se strategija koristi u nekoliko zemalja, uključujući Francusku, kako je navedeno u intervjuu s vatrogascem iz odjela Bouches du Rhône: „Koristimo pre-pozicioniranje zemaljskih snaga na posebnim točkama koje su blizu glavnih cesta i pristupa šumi. Ako negdje detektiramo požar, jednostavno šaljemo puno ljudi i cisterni.“ (sugovornik 3).

c) Strategija posvećenog tima - korištenje helikopterskih timova

Helikopterski tim (engl. *Helitack Crew*) je specijalizirani vatrogasni tim koji se helikopterom prevozi u udaljena područja kako bi se borio protiv požara. Dobro su obučeni i vješti u vatrogasnim tehnikama, uključujući spuštanje užetom iz helikoptera, izgradnju protupožarnih linija i korištenje ručnih alata za gašenje plamena. Helikopterski timovi često su prvi koji reagiraju na požare u teško dostupnim područjima i igraju ključnu ulogu u obuzdavanju i suzbijanju požara prije nego što se prošire. Rade u koordinaciji s drugim vatrogasnim timovima na tlu i u zraku kako bi osigurali sigurnost posade i javnosti, kao i zaštitu imovine i prirodnih resursa.

6.1.2. Tehnike gašenja požara

a) Izravni napad

Izravni napad je pristup gašenju požara koji uključuje agresivno suzbijanje požara u blizini linije požara. Ova metoda može se provoditi pomoću ekipa koje koriste ručne alate ili opreme za dostavu vode, ili kombinacijom oboje. Cilj izravnog napada je izravno ugasiti požar primjenom vode ili fizičkim uklanjanjem goriva pomoću alata, s namjerom da se brzo uspostavi kontrola i spriječi daljnje širenje požara.

- **Izravni napad na glavu:** uključuje borbu protiv požara izravno prema glavi, tj. najaktivnijem prednjem dijelu požara.
- **Izravni napad na rep:** uključuje gašenje požara sa stražnje strane i rad uz bokove prema glavi požara.
- **Izravni napad na bokove:** uključuje gašenje požara s bočne strane i rad oko glave i repa požara.

b) Neizravni napad

Ova metoda uključuje primjenu taktika suzbijanja koje se provode dalje od gorućeg ruba požara, bilo korištenjem kontrolnih linija za obuzdavanje širenja požara, ili proaktivnom upotrebom vatre kao alata za gašenje.

- **Korištenje kontrolnih linija:** kontrolne linije su izgrađene ili prirodne barijere, uključujući tretirane rubove požara, koje se koriste za kontrolu požara. Mogu se izgraditi ručno, mehanički ili primjenom vode ili retardanata (koji se nazivaju vlažnim linijama).
- **Paralelni napad:** paralelni napad je specifična vrsta neizravnog napada gdje se kontrolne linije stvaraju uz bokove požara prema i oko glave požara. Ova metoda suzbijanja obično je

najučinkovitija uz korištenje odgovarajućih vozila, poput traktora koji imaju noževe za sječu ili buldožera.

- **Kontrolirano spaljivanje / povratno paljenje**

- **Obrambeno spaljivanje:** paljenje kontroliranog požara radi uklanjanja goriva ispred napredujućeg požara, uz gašenje kontroliranog požara prije nego što stigne glavni požar. Ova metoda se obično primjenjuje na određenoj udaljenosti od fronta požara i treba je unaprijed planirati.
- **Ofenzivno spaljivanje:** paljenje kontroliranog požara i dopuštanje da gori prema približavajućem požaru. Ova tehnika kombinira prednost uklanjanja goriva i stvaranja toplinskog toka koji ide prema frontu požara, međutim, zahtijeva pažljivu procjenu i obučene operatere.

c) **Zračni napad**

Zrakoplovi se mogu koristiti na mjestima šumskih požara za primjenu izravnih i neizravnih metoda napada.

- **Izravni zračni napad** uključuje ispuštanje vode ili retardanata na područje koje gori.
- **Neizravni zračni napad** uključuje ispuštanje vode ili retardanata ispred područja koje gori kako bi se stvorile kontrolne linije ili ojačale postojeće kontrolne linije.

6.2. Gašenje požara u graničnom području naseljenih i divljih (prirodnih) područja (WUI)

Kako je opisano u poglavlju 4, požari u graničnom području naseljenih i divljih (prirodnih) područja, (WUI) predstavljaju složen tip požara koji se javlja na granici između šumskih područja i ljudskih zajednica. Ovi požari su posebno opasni i izazovni za gašenje jer često uključuju kombinaciju vegetacije, struktura i ljudskih života. Južna Europa je regija sklona požarima, gdje ekstremni požari često imaju katastrofalne posljedice na objekte i ljude. Suočavanje s ovakvim požarima vrlo je teško, što je potvrdio vatrogasac iz Francuske: „U našoj regiji, problem je što imamo puno kuća u različitim područjima i ne možemo braniti svaku kuću. Ne možemo staviti kamion ispred svake kuće jer ih ima previše, pa je teško ako je šuma vrlo blizu kuće.“ (sugovornik 3).

Cilj gašenja požara na ovim graničnim područjima je zaustaviti požar prije nego što dosegne zgrade, odnosno na vanjskom rubu dvorišta ili tamo gdje počinje gorivo šumskih područja (Ganteaume i dr., 2021.).

6.2.1. Gašenje požara u graničnom području divljih i urbanih zona

Tablica 4 objašnjava kako se tehnike gašenja požara opisane ranije mogu koristiti za suzbijanje požara u graničnim područjima divljih i urbanih zona.

Tablica 4: *Mogućnosti i ograničenja tehnika gašenja požara na graničnom području divljih i urbanih zona*

No	tehnike	akcija
1	zračni napad	Retardant i voda ne mogu se ispuštati izravno unutar područja zbog sigurnosnih razloga i prisutnosti ljudi, objekata i dalekovoda. Umjesto toga, zračni napadi provode se izvan graničnog područja kako bi se stvorila barijera ili linija zadržavanja prije nego što požar dosegne naseljena područja.

		Ovaj proaktivni pristup maksimizira sigurnost dok učinkovito suzbija požar i štiti granično područje.
2	izravni napad	Kako bi se zaštitile strukture unutar graničnog područja, vatrogasci koriste taktike obrane objekata, koje su ofenzivne kada resursi usmjeravaju glavu požara prema željenoj završnoj točki. Ako vatrogasci mogu sigurno napasti požar izravno, mogu biti poslani u akciju s ručnim alatima za uklanjanje goriva i gušenje gorivih materijala, ručnim linijama za obaranje plamena i drugom opremom za gašenje požara. Izravni napad može biti inherentno opasan zbog dinamične prirode požara u graničnom području. Također, izravni napad treba provesti odmah kada vatrogasci otkriju spot požar.
3	neizravni napad	Stvaranje protupožarne linije i provođenje povratnog spaljivanja uz cestu ispred požara može biti učinkovita taktika za zaštitu graničnog područja, međutim, prije nego što se započne s povratnim spaljivanjem, potrebno je obratiti posebnu pažnju kako bi se osiguralo da je to sigurno i izvedivo s obzirom na okolnosti.

U većini slučajeva, korištenje teške opreme za gašenje požara ili druge svrhe nije izvedivo ili praktično. To može biti zbog različitih razloga, poput ograničenog prostora, neravnog terena ili zabrinutosti zbog oštećenja infrastrukture ili imovine. Kao rezultat toga, vatrogasci moraju koristiti alternativnu opremu prikladnu za granična područja. Ovi specijalizirani alati i vozila dizajnirani su da budu agilni, okretni i učinkoviti u borbi protiv požara. Evo nekoliko primjera mobilne i taktičke opreme za gašenje požara koja se može koristiti za borbu protiv požara u graničnom području divljih i urbanih zona:

- **Prijenosne pumpe:** Ove lagane pumpe dizajnirane su da se lako prenose i koriste na udaljenim lokacijama. Mogu se koristiti za crpljenje vode iz obližnjih izvora, poput bazena, ribnjaka, jezera ili prijenosnih spremnika, i opskrbu vatrogasnih ekipa vodom.
- **Ruksaci s raspršivačima:** Ruksaci s raspršivačima su prijenosni uređaji koje vatrogasci mogu nositi na leđima, omogućujući im brzo kretanje kroz neravni teren dok primjenjuju vodu ili retardant za suzbijanje plamena. Posebno su korisni za pristup područjima gdje veća oprema ne može doći.
- **Laka specijalizirana vozila:** Specijalizirana vozila, poput terenskih kamiona ili vozila s pogonom na sva četiri kotača opremljenih vatrogasnom opremom, dizajnirana su za kretanje uskim cestama, neravnim terenima i graničnim područjima. Ova vozila nose male spremnike za vodu, pumpe, crijeva i druge vatrogasne alate, omogućujući ekipama brz odgovor i gašenje požara u izazovnim uvjetima.

6.2.2. Zaštita ljudi i zgrada

Ovaj važan problem temeljito se istražuje u okviru drugog zadatka projekta. Rezultati će biti dokumentirani u dokumentu „Smjernice za smanjenje ranjivosti zajednica na ekstremne požare i požare na WUI-u“.

U osnovi postoje dvije glavne metode:

- **Evakuacija.** Ponekad je najbolja opcija, osobito u slučaju ranjivih vrsta graničnih područja kao što su kampovi ili lagane građevine izrađene od zapaljivih materijala. Međutim, evakuaciju treba planirati i organizirati dovoljno rano prije nego što požar dođe blizu, jer može potrajati dugo. Broj, dostupnost i sigurnost izlaznih ruta također su ključni čimbenici koje treba razmotriti prije donošenja odluke o evakuaciji.
- **Sklonište na mjestu.** Ako su zgrade izrađene od nezapaljivih materijala, sklonište na mjestu pruža bolju zaštitu u usporedbi s evakuacijom. Međutim, može biti potrebna priprema kako bi se osiguralo da nema slabosti u skloništu i da ljudi mogu ostati unutra bez panike.

6.3. Gašenje ekstremnih požara

Kao što je detaljno opisano u poglavlju 3, gašenje ekstremnih požara mnogo je izazovnije u usporedbi s gašenjem uobičajenih požara raslinja. Ekstremni požari karakteriziraju se intenzivnom toplinom, brzim širenjem i nepredvidivim ponašanjem, što značajno povećava rizike za sigurnost vatrogasaca i otežava predviđanje dinamike požara. Tradicionalne metode gašenja, koje uglavnom uključuju izravan napad na plamen, možda neće biti toliko učinkovite zbog intenzivne topline i nepredvidivog ponašanja požara, što otežava obuzdavanje i kontrolu.

Vatrogasci s kojima smo razgovarali naglasili su da:

- a) Kombinacija taktika, uključujući kombiniranje teške mehanizacije s taktičkim gašenjem požara, ključna je u borbi protiv ekstremnih požara.
- b) Potrebno je prebaciti se s metoda izravnog napada na metode neizravnog napada.

U našoj anketi, većina ispitanika (89%) smatrala je svoje trenutne strategije učinkovitim tijekom početnih napada, no ta učinkovitost se nije proširila na strategije korištene u ekstremnim požarima. Značajan dio (26%) smatrao ih je neučinkovitim ili vrlo neučinkovitim, dok je samo 30% smatralo da su učinkovite. Nadalje, većina ispitanika (40%) ostala je neutralna u pogledu učinkovitosti tih strategija. Ovi nalazi naglašavaju potrebu za izradom preporuka temeljenih na znanstveno utemeljenim strategijama koje vatrogasci mogu koristiti za učinkovito suzbijanje ekstremnih požara.

Tablica 5 sažima tehnike koje se mogu koristiti za suzbijanje ekstremnih ponašanja požara dobivenih iz anketa, intervjua i pregleda literature.

Tablica 5: Snage i ograničenja različitih tehnika u odnosu na ekstremno ponašanje požara

ekstremno ponašanje požara	tehnike gašenja požara			napomena
	izravni napad	neizravni napad	zračni napad	
spot požari	Vrlo preporučeno izravno gašenje čim prije, suzbijanje spot požara što je prije moguće.	Provoditi neizravni napad kada početni napad ne uspije, a požar se proširi.	Kada zračna ekipa vidi spot požar, preporuča se izravni napad iz zraka.	Prioritet dati početnom napadu.
požari u krošnjama	Izravni napad nije preporučen, direktno gašenje požarnog fronta je nemoguće i opasno.	Stvaranje protupožarnih linija i povratno spaljivanje su preporučeni.	Preporučeno je i izravni i neizravni zračni napad.	Fokusirati se na kontrolu bokova požara umjesto na direktno gašenje fronta.
eruptivni požari	Nije preporučeno.	Preporučeno je kontrolirano ili taktičko spaljivanje.	Zračni napadi mogu biti korišteni, ali je izazovno manevrirati u pejzažima kao što su kanjoni.	
spojeni požari	Preporučeno prije spajanja požara, ali s oprezom.	Konstruirati protupožarne linije ili kontrolne linije oko područja spoja.	Preporučeno je poduprijeti zemaljske operacije i zaštititi spoj.	
jako veliki požari	Preporučeno prije nego što intenzitet požara postane previsok, ostati u sigurnoj zoni.	Preporučeno je kontrolirano spaljivanje.	Preporučeno je i izravni i neizravni zračni napad vodom i retardantom.	Možda će biti potrebna preventivna evakuacija.
vatreni vrtlozi	Nije preporučeno.	Nije preporučeno.	Nije preporučeno.	Pričekati i promatrati dok fenomen ne prestane, jer vatreni vrtlozi uglavnom traju kratko.

7. Sigurnost pri gašenju požara

7.1. Zdravstveno stanje i višestruka učinkovitost

Vatrogasci se danas suočavaju sa sve gorim i opasnijim šumskim požarima koji su sve intenzivniji i opasniji zbog klimatskih promjena. Svojim velikim naporima sprječavaju masovne štete i dramatične gubitke ljudskih života. Međutim, također su izloženi sve težim vremenskim i fiziološkim uvjetima pri gašenju ekstremnih požara, što može otežati njihovu ukupnu učinkovitost i zdravstveno stanje. Zapravo, dobro zdravstveno stanje i fizička sposobnost mogu poboljšati njihovu ukupnu sposobnost gašenja požara i sigurnost, osobito tijekom najgorih uvjeta. Stoga je važno integrirati strategije usmjerene na zdravlje u programe obuke vatrogasaca i rutine vježbanja. Neki od ključnih aspekata koje treba uključiti u programe obuke vatrogasaca koji će se suočiti s ekstremnim požarima su ukratko predstavljani u nastavku:

- **Sveobuhvatno zdravstveno stanje i poboljšana fiziologija za poboljšanje učinkovitosti:**

- **Kardiovaskularno zdravlje**

Kardiovaskularni sustav i kondicija od izuzetne su važnosti za vatrogasce, s obzirom na sposobnost izvođenja zahtjevnih zadataka u teškim okruženjima. Poboljšana kardiovaskularna fiziologija i kapacitet izdržljivosti trebaju se naglasiti. Povećana kardiovaskularna sposobnost i izdržljivost mogu se postići aerobnim vježbama, uključujući vožnju bicikla, trčanje i plivanje. Osim toga, treba poticati navike koje povoljno djeluju na srce, posebno kroz prehranu, smanjenje izloženosti dimu i duhanu, smanjenje stresa i smanjenje akumulacije masnog tkiva.

- **Fizička procjena**

Kako bi se osigurala učinkovitost i dobrobit vatrogasaca, ključno je uspostaviti personalizirano poboljšanje fizičkih sposobnosti vatrogasaca koje će poboljšati ukupnu učinkovitost, ali što je još važnije, također spriječiti ozljede ili povećani rizik od kardiovaskularnih poremećaja. Prvo, treba provesti sveobuhvatnu fizičku procjenu kako bi se razumjelo početno zdravstveno stanje i fizičke sposobnosti, primjerice, prema standardnim parametrima kardiovaskularnog stanja i izdržljivosti, kao i mišićne snage i tjelesne kompozicije.

- **Fizička kondicija**

Nakon procjene individualnog stanja, potrebno je provesti personalizirane programe treninga i vježbe s ciljem redovite fizičke kondicije kako bi se bolje prilagodile individualne sposobnosti i posebne potrebe. Vrsta aerobnih vježbi, koja može uključivati trčanje, dizanje utega, kružni trening i funkcionalne pokrete, može se integrirati kako bi se postigli potrebni ciljevi. Također se trebaju uzeti u obzir glavne funkcije i zadaci u gašenju požara, na primjer, simuliranje stvarnih situacija radi poboljšanja koordinacije mišića i ukupne izvedbe povezanih zadataka.

U sažetku, treninzi za gašenje požara moraju imati posvećene sesije i programe koji uvode i istražuju ove fizičke aspekte kako bi poboljšali fizičke rezultate vatrogasnih snaga. Bolje pripremljeni vatrogasci bit će izloženi manjoj akumulaciji mliječne kiseline u mišićima, što će izbjeći mišićnu iscrpljenost i, u konačnici, kolaps.

- **Mentalno zdravlje i otpornost, kvaliteta sna i upravljanje stresom**

Vatrogasci su obično izloženi prijetećim i stresnim situacijama koje mogu značajno utjecati na njihovu mentalnu dobrobit, procese donošenja odluka i ukupnu učinkovitost. Ovi aspekti su od iznimne važnosti za sigurnost i akcije vezane uz sigurnost. Stoga, treninzi vatrogasaca moraju uključivati jačanje bolje liderske vještine, mentalne otpornosti i upravljanja stresom. Kvaliteta sna također je važan faktor u ovim aspektima, te je od izuzetne važnosti naglasiti i ojačati strategije i prakse za optimizaciju higijene sna

i zdravlja. Treba uzeti u obzir i poremećaje sna povezane s radom u smjenama unutar timova koji će biti raspoređeni.

- **Prehrana i hidratacija**

Prilagođena prehrana i pravilna hidratacija ključni su aspekti za održavanje optimalne izvedbe i fiziološke unutarnje ravnoteže (homeostaze). Programi obuke trebaju također uključivati planiranje uravnotežene prehrane i obroka prije, tijekom i nakon velikih napora. Zdrave dijete, obogaćene antioksidansima i drugim detoksikacijskim komponentama, mogu biti od velike važnosti za ublažavanje i oporavak od povećane izloženosti dimu. Isto vrijedi i za hidrataciju, koja bi također trebala biti poticana prije i tijekom teških vježbi, posebno kako bi se održala ravnoteže vode i bitnih elektrolita (osmoregulacija), ali i nakon napora radi obnove razine te omogućavanja bržeg oporavka. Obuka o ovoj temi treba uključivati koncepte hidratacije, vrste i učestalost konzumacije vode ili specifičnih tekućina za hidrataciju.

Kada se ove zdrave navike učinkovito promiču, smanjit će se neželjeni događaji i prekomjeran umor, povećavajući otpornost i bolju izvedbu tijekom duljih razdoblja aktivnosti.

7.2. Utjecaji dima na vidljivost i zdravlje

Akutna inhalacija dima je složen i potencijalno fatalan sindrom koji uključuje multi sistemski odgovor (ne samo dišni) povezan s izloženošću velikom broju kemijskih agensa i čestica koje nastaju izgaranjem različitih materijala. Može se dogoditi u otvorenim ili zatvorenim prostorima i može, ali ne mora biti povezana s kožnim opeklinama (Gill et al., 2015.; Walker et al., 2015.; Herndon, 2018.).

7.2.1. Mehanizmi razvoja i nastanka bolesti (etiopatogeneza⁷)

Toksični rizici povezani s požarom i nemogućnost žrtava da napuste opasna područja mogu se razmatrati kroz tri glavna aspekta izloženosti: (1) toplini, (2) dimu i (3) proizvodima izgaranja. Specifično otrovno djelovanje i učinci (toksikologija⁸) glavnih produkata požara detaljno je proučena, a ovisi o okolišu u kojem se požar događa (na otvorenom ili zatvorenom prostoru), uz prisustvo brojnih tvari s gušćim (asfiksirajućim⁹) djelovanjem (npr. ugljični monoksid, cijanovodik), nadražujućim djelovanjem (razni iritansi¹⁰ npr. bromovodična kiselina, klorovodična kiselina, fluorovodična kiselina, sumporni dioksid i organske iritantne tvari poput acetaldehida, akroleina, benzena, krotonaldehida, formaldehida, fenola, toluena), stakleničke plinove (npr. ugljični dioksid, metan), ali također i vrlo niske razine kisika prisutne u požarnim zonama mogu predstavljati opasnost (Gill et al., 2015.; Herndon, 2018.).

⁷ **Etiopatogeneza** je medicinski pojam koji opisuje proces razvoja i uzroke određene bolesti ili poremećaja. Riječ je o kombinaciji dvaju aspekata bolesti: **Etiologija** - proučavanje uzroka bolesti i **Patogeneza** - mehanizam i razvoj bolesti od početnog uzroka do pojave simptoma. U osnovi, etiopatogeneza obuhvaća sve korake od uzroka do kliničkih manifestacija bolesti.

⁸ **Toksikologija** je znanstvena disciplina koja proučava štetne učinke kemijskih tvari na žive organizme, uključujući ljude, životinje i okoliš. Bavi se identifikacijom, kemijskim svojstvima, načinima izlaganja, mehanizmima toksičnih učinaka, kao i prevencijom i liječenjem trovanja.

⁹ **Asfiksirajuće djelovanje** odnosi se na učinak koji dovodi do gušenja ili smanjenja dostupnosti kisika u tijelu, što rezultira otežanim disanjem ili nedostatkom kisika u tkivima (hipoksija). Ovaj pojam se najčešće koristi u kontekstu utjecaja otrovnih plinova, dima, ili drugih štetnih tvari koje mogu uzrokovati gušenje ili hipoksiju.

¹⁰ **Iritansi** su tvari koje izazivaju iritaciju, odnosno nadražujuće djelovanje na kožu, oči, dišne puteve ili sluznice tijela. Iritansi mogu biti kemijski spojevi, plinovi, prašina ili tekućine koje pri kontaktu s tijelom izazivaju reakcije poput crvenila, svrbeža, suzenja očiju, kašlja ili otežanog disanja.

Oštećenja uzrokovana izloženošću toplini uglavnom su lokalizirana na gornje dišne puteve i potencijalno uzrokuju edem s pridruženim rizicima, posebno za glasnice i otvor između glasnica (glotis) (Stec, 2010.; Demling, 2008.).

Više topive kemikalije (npr. amonijak, sumporni dioksid) brzo djeluju na gornje dišne puteve. Manje topivi agensi (npr. fosgen, dušikov dioksid) ne proizvode trenutnu iritaciju, udišu se dublje jer ne uzrokuju kašljanje, što rezultira teškim oštećenjima pluća (alveolarnim lezijama), a posebno plućnim edemom ne povezanim sa srcem koji se može pojaviti kasnije, zahtijevajući dulje praćenje (Walker et al., 2015.; Dries et al., 2013.; Stec, 2010.; Demling, 2008.; Haponik, 1990.; Lafferty KA, 2018.).

Ugljični dioksid i ugljični monoksid, među glavnim komponentama dima, odgovorni su za smanjenje koncentracije kisika u zraku između 5% i 10%. Ugljični monoksid i cijanovodik blokiraju alveolo-kapilarni prijenos kisika, što dovodi do teške i potencijalno smrtonosnog sniženja razine kisika u arterijskoj krvi (hipoksemije) te se smatraju gušećim (asfiksirajućim) plinovima sa sistemskim učinkom. Ugljični monoksid je bezbojan, bez mirisa i ne-nadražajni plin koji nastaje nepotpunim izgaranjem ugljikovodika. Njegova sklonost vezanju za hemoglobin više je od 200 puta veća nego za kisik, što uzrokuje smanjenje sposobnosti hemoglobina da oslobađa kisik u tkiva. To dovodi do stvaranja štetnih slobodnih radikala, oštećenja stanica zbog oksidacije masti te poremećaja u staničnom disanju i mitohondrijskom metabolizmu. Mozak i srčani mišić među najviše su pogođenim strukturama (Lafferty, 2018.).

7.2.2. Dijagnostika

Kliničke slike povezane s akutnom inhalacijom dima javljaju se prvenstveno zbog izloženosti izravnoj toplini, udisanju gušećih (asfiksirajućih) plinova i izloženosti neurološkim i respiratornim podražajnim tvarima (iritantima) (ISBI Practice Guidelines for Burn Care, 2016.). Četiri faze obično se prepoznaju nakon akutne inhalacije dima:

1. **Akutni respiratorni poremećaj:** javlja se 1 do 12 sati nakon izlaganja i uzrokovana je stezanjem bronha (bronhospazmom), oteknućem grkljana (laringealnim edemom) i pojačanim izlučivanjem sluzi u dišnim putovima (bronhorejom).
2. **Plućni edem koji nije povezan sa srcem (simptom akutnog respiratornog poremećaja):** javlja se 6 do 72 sata nakon izlaganja i rezultat je povećane propusnosti kapilara, ponekad simulirajući i akutni edem pluća povezan sa srcem (kardiogeni).
3. **Smetnje u području vrata:** javljaju se 60 do 120 sati nakon izlaganja i povezane su s nastankom krasta na vratu kod pacijenata s opeklinama koje zahvaćaju cijeli opseg vrata.
4. **Potencijalni razvoj upale pluća (pneumonije):** 72 sata nakon izlaganja, uglavnom uključujući bakterijama: *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* ili gram-negativnim bakterijama.

Klinička povijest i objektivni pregled

Klinička povijest i objektivni pregled su ključni jer klinička prezentacija i potencijalni rizici udisanja dima ovise o trajanju udisanja, vrsti i okolišu izloženosti, tvarima koje su izgarale (posebno je li požar nastao u zatvorenom ili otvorenom prostoru), popratnim kožnim opeklinama i općem stanju i zdravlju žrtve.

Žrtva može imati različite stupnjeve otežanog disanja, što može biti popraćeno promuklošću, hrapavim glasom, zviždanjem pri disanju i/ili stezanjem bronha (Walker et al., 2015.). Kašalj je vrlo čest simptom udisanja nadražujućih tvari. Može se pojaviti i iskašljavanje crnih čestica.

Promjena mentalnog stanja može se pojaviti zbog djelovanja pojedinih navedenih tvari, što pogoršava kliničku sliku i smanjuje sposobnost žrtve da se sama spasi. U nekim slučajevima mogu se

pojaviti i napadaji. Drugi simptomi, kod blažeg udisanja, uključuju glavobolju, tjeskobu, uznemirenost, znojenje i vrtoglavicu.

Nizak krvni tlak može nastati zbog proširenja krvnih žila, smanjene funkcije srčanog mišića, aritmije ili promjena u sastavu tekućina u tijelu.

Kod stvaranja karboksihemoglobina (uslijed udisanja ugljičnog monoksida) ili methemoglobina, očitavanja razine kisika pomoću pulslog oksimetra mogu biti netočna. Na primjer, karboksihemoglobin apsorbira svjetlost slično kao oksigenirani hemoglobin, što znači da oksimetri ne mogu precizno razlikovati ova dva oblika (Rehberg et al., 2009.).

Kliničke manifestacije povezane s razinama karboksihemoglobina u krvi su sljedeće (Lafferty, 2018.; Rorison & McPherson, 1992.):

0-10%: obično bez simptoma

10-20%: blaga glavobolja, otežano disanje

20-30%: pulsirajuća glavobolja, otežana koncentracija

30-40%: jaka glavobolja, zbunjeno razmišljanje

40-50%: zbunjenost, letargija, nesvjestica

50-60%: respiratorno zatajenje, napadaji

> 70%: koma, smrt

Analitička procjena

Procjena plinova u arterijskoj krvi može dati korisne informacije, ali su vrijednosti jako ovisne o udahnutim tvarima. Na primjer, kod trovanja dimom koji sadrži sustavne tvari koje izazivaju gušenje (asfiksante) poput cijanovodične kiseline i cijanida, može se pojaviti metabolička acidoza s visokim razinama laktata – u ovom specifičnom slučaju, hipoksemija se pojavljuje kasnije. U laboratorijima s odgovarajućom opremom može se izmjeriti karboksihemoglobin i methemoglobin (Dries et al., 2013.).

Količina ugljičnog monoksida u krvi može se mjeriti kromatografijom ili spektrofotometrijskim tehnikama. Međutim, prijenosni uređaji omogućuju praćenje njegove razine u izdahnutom zraku, kao i procjenu postotka karboksihemoglobina (Rehberg et al., 2009.).

Ostali pregledi

Radiološki snimak pluća može biti koristan za procjenu kasnijih promjena na plućima, kao što su nekardiogeni plućni edem, kolaps plućnog tkiva ili infiltracija pluća. Međutim, treba napomenuti da u ranim fazama nalaz na rendgenskoj snimci pluća može biti potpuno normalan, čak i nakon udisanja dima.

U određenim situacijama može biti potrebno izravno pregledati dišne puteve, primjerice laringoskopijom ili fleksibilnom bronhoskopijom: u nekim slučajevima može doći do brze progresije ka potpunoj opstrukciji dišnih puteva, čak i kod pacijenata s blagim početnim simptomima. Ove situacije mogu zahtijevati ranu intubaciju i preporučuje se blisko praćenje kroz dulje vremensko razdoblje jer se oteklina može pojaviti nekoliko sati nakon izlaganja.

Fleksibilna bronhoskopija može potvrditi prisutnost i opseg ozljede udisanja. Najčešći nalazi uključuju čađ u dišnim putevima, oticanje i crvenilo sluznice, krvarenje i ulceracije.

Endorf i Gamelli (2007.) predložili su bronhoskopske kriterije za procjenu ozljeda od udisanja (Skraćeni indeks ozljeda – engl. *Abbreviated Injury Score*), koji se obično koristi:

- **Stupanj 0 (nema ozljeda):** bez ugljenih naslaga, crvenila, edema, bronhoreje ili opstrukcije.

- **Stupanj 1 (blaga ozljeda):** manje ili mjestimične površine crvenila, ugljenih naslaga u proksimalnim ili distalnim bronhima (ili kombinacija).
- **Stupanj 2 (umjerena ozljeda):** umjereno crvenilo, ugljene naslage, bronhoreja, s ili bez zahvaćenosti bronha.
- **Stupanj 3 (teška ozljeda):** jaka upala s krhkosti tkiva, obilne ugljene naslage, bronhoreja, opstrukcija bronha.
- **Stupanj 4 (masivna ozljeda):** dokazi ljuštenja sluznice, nekroza, zatvorenost lumena (ili kombinacija).

7.2.3. Liječenje

Žrtvu treba brzo ukloniti iz opasnog okruženja. Prvi prioritet je osigurati prohodnost dišnih puteva, normalno disanje i cirkulaciju (poznato kao ABC – engl. *Airway, Breathing, Circulation*). Kod težih slučajeva može biti potrebno rano umetanje cijevi u dušnik (intubacija) ili čak mehanička ventilacija. Važno je napomenuti da povećano oticanje dišnih puteva s vremenom može otežati kasniju intubaciju. Obično se preporučuje davanje visokih doza kisika kroz masku s visokim protokom (Toon et al., 2010.; Sheridan, 2016.; Herndon, 2018.).

U posebnim situacijama, kod trovanja ugljičnim monoksidom ili cijanidom, može se primijeniti terapija hiperbaričnim kisikom. Ova metoda, dostupna samo u nekoliko centara, znatno smanjuje poluvrijeme eliminacije ugljičnog monoksida i pomaže smanjiti oticanje plućnog tkiva (Herndon, 2018.; Spinou & Koulouris, 2018.).

Stalno praćenje kliničkog stanja i vitalnih znakova, te održavanje ravnoteže tekućina, elektrolita i kiselo-bazne ravnoteže, kao i farmakološka podrška (npr. korekcija metaboličke acidoze), također su ključni. Respiratorna kineziterapija (vježbe za poboljšanje disanja) može biti korisna. Zbog složenosti, većina ovih slučajeva zahtijeva upućivanje u specijalizirani medicinski centar koji može pružiti sveobuhvatnu terapiju.

7.2.4. Zaključci

Udisanje dima uzrokuje do 80% smrtnih slučajeva povezanih s požarima. Udisanje dima također može značajno povećati rizik od smrti u drugim situacijama, poput opekline kože. Pravovremena dijagnoza i ispravno početno liječenje ključni su za smanjenje rizika. U težim slučajevima, mogu ostati dugoročne posljedice na dišni sustav (poput suženja dušnika, slabosti stijenke dušnika, bronhiektazija, pojačane osjetljivosti bronha ili bronhiolitisa), zbog čega je preporučeno naknadno kontrolno praćenje kod specijalista.

7.3. Pravila sigurnosti

Nesreće povezane s požarima često su uzrokovane nedovoljnim znanjem o ponašanju požara. Ovaj dokument ima za cilj smanjiti taj jaz i pomoći menadžerima požara da razumiju temeljne koncepte koji se često pretvaraju u standarde ili osnovna pravila koja bi trebala biti dosljedno uključena u osobnu obuku za sve osobe uključene u bilo koju fazu upravljanja požarima.

7.3.1. Standardna pravila za gašenje požara i situacije na oprezu

Sjedinjene Američke Države pioniri su moderne znanosti o šumskim požarima, kao i razvoju sigurnosnih protokola i procedura za gašenje požara. Sredinom 20. stoljeća, nekoliko fatalnih nesreća odnijelo je živote velikom broju vatrogasaca tijekom poznatih šumskih požara u SAD-u. Neki od tih požara još se uvijek proučavaju i spominju u obukama, poput požara Blackwater u Wyomingu (1937.) s 15 smrtnih slučajeva, požara Bryant Canyon u Kaliforniji (1947.) s 11 smrtnih slučajeva, požara Man Gulch u Montani (1949.) s 13 smrtnih slučajeva, požara Rattlesnake u Kaliforniji (1953.) s 15 smrtnih slučajeva ili požara

Inaja u Kaliforniji (1956.) s 11 smrtnih slučajeva. Ova serija događaja, osobito posljednji, potaknula je reakciju američke Službe za šume (US Forest Service), koja je osnovala radnu skupinu za analizu događaja i preporuku akcija za smanjenje šanse da vatrogasci poginu tijekom borbe protiv požara.

Izvešće radne skupine rezultiralo je stvaranjem 10 standardnih pravila za gašenje požara, prvi put objavljenih 1957. godine, kao i popisa od 18 situacija na oprezu. Ova dva skupa pravila sadrže lekcije koje je radna skupina naučila analizirajući što je pošlo po zlu u fatalnim nesrećama. Izvešće navodi da bi broj žrtava vjerojatno bio manji, a gašenje požara učinkovitije da su bile korištene dobre prakse gašenja požara, bliži nadzor i poboljšano organizacijsko funkcioniranje u svim situacijama. Radna skupina također je proučila slučajeve nesreća koje su završile pozitivnim ishodom, te naglasila potrebu za uključivanjem predviđanja ponašanja požara i vremenskih prognoza u strategiju upravljanja gašenjem požara.

Tablica 6. 10 standardnih pravila za gašenje požara (NWCG, 2022.)

tema	br	pravilo
ponašanje požara	1	Budite informirani o vremenskim uvjetima požara i prognozama.
	2	Uvijek znajte što se s požarom događa.
	3	Temeljite sve akcije na trenutnom i očekivanom ponašanju požara.
sigurnost	4	Identificirajte izlazne rute i sigurnosne zone te sve sudionike upoznajte s njima.
	5	Postavite ograničenje pristupa kada postoji mogućnost opasnosti.
	6	Budite na oprezu. Ostanite mirni. Razmišljajte jasno. Djelujte odlučno.
organizacijska kontrola	7	Održavajte pravovremenu komunikaciju s vašim snagama, nadređenima i pomoćnim snagama.
	8	Dajte jasne upute i budite sigurni da su one pravilno i dobro shvaćene.
	9	U svakom trenutku imajte potpunu kontrolu nad vašim snagama.
	10	Suzbijajte požar agresivno, ali tek nakon što osigurate sigurnost.

Ove upute napisane su tako da budu razumljive same po sebi, ali više informacija može se naći na web stranici Nacionalne koordinacijske skupine za požare:

(<https://www.nwcg.gov/publications/pms110>, posjećeno 17.11.2023.).

18 situacija koje traže poseban oprez (engl. *Watch Out Situations*) (NWCG, 2022.) navedene su kako bi opisale posebne okolnosti koje bi trebale biti znak upozorenja za sve vatrogasce. Ako se bilo koja od ovih situacija pojavi tijekom akcije gašenja požara, vatrogasci trebaju biti dodatno oprezni. Ove situacije, prikazane u tablici 7, predstavljaju proširenje 10 standardnih zapovijedi za gašenje požara.

Tablica 7. 18 situacija koje traže poseban oprez standardnih pravila za gašenje požara (NWCG, 2022.)

br.	situacija koja traži oprez
1	Požar nije izviđan i procijenjen.
2	Na terenu niste bili danju.
3	Nisu definirane sigurnosne zone i izlazne rute.
4	Nepoznati vremenski i lokalni čimbenici koji utječu na ponašanje požara.
5	Niste informirani o strategiji, taktikama i opasnostima.
6	Upute i zadaci nisu jasni.
7	Nema komunikacije s članovima tima ili nadređenim.
8	Izgradnja linije obrane bez sigurnog uporišta.
9	Izgradnja linije nizbrdo s požarom ispod.
10	Pokušavate frontalni napad na požar.

11	Neizgorivo gorivo između vas i požara.
12	Ne vidite glavni požar i niste u vezi s nekim tko ga vidi.
13	Na padini ste gdje se kotrljajući materijal može zapaliti ispod.
14	Vrijeme postaje toplije i suše.
15	Vjetar se pojačava i/ili mijenja smjer.
16	Česta pojava spot požara.
17	Teren i gorivo otežavaju bijeg u sigurnosne zone.
18	Odmarate se u blizini linije požara.

Slično kao 10 zapovijedi za gašenje požara, i ove situacije za oprez napisane su tako da budu razumljive same po sebi. Dodatna objašnjenja mogu se pronaći na web stranici Nacionalne koordinacijske skupine za požare (<https://www.nwcg.gov/publications/pms118>, posjećeno 17.11.2023.).

Cilj ovih alata je da ih svi koji sudjeluju u aktivnostima upravljanja požarima, posebno vatrogasci, dobro upoznaju i koriste za prepoznavanje ključnih točaka koje podsjećaju vatrogasce da ponovno analiziraju LCES koncept koje su detaljno opisane u slijedećem poglavlju (Zimmerman, 2020.).

7.3.2. LCES – LACES koncepti

Sustav LCES razvio je Paul Gleason, iskusni nadzornik vatrogasne ekipe Hotshot iz američke Službe za šume (USDA Forest Service), nakon požara Dude u Arizoni 1990. godine. Iako su već postojale 10 zapovijedi za gašenje požara i 18 situacija koje traže poseban oprez, ovaj je požar ipak odnio živote šest vatrogasaca. Gleason je bio zamoljen da istraži nesreću i izvuče pouke. U svom izvješću napisao je: „Tijekom svoje karijere bavio sam se gašenjem šumskih požara kao nadzornik tima Hotshot, uz samo manje ozljede kod onih koje sam izravno nadgledao. To pripisujem dvjema stvarima: sreći (koju ne treba zanemariti) i osnovnim lekcijama koje sam naučio od izuzetnih vatrogasaca s kojima sam radio.“

Upravo te „osnovne lekcije“ integrirao je u LCES koncept, koji se sastoji od Promatrača (engl. *Lookouts*), Komunikacije (engl. *Communications*), Izlaznih ruta (engl. *Escape routes*) i Sigurnosnih zona (engl. *Safety zones*). Po prvim slovima engleskih naziva koncept je i dobio ime. Osnovna ideja bila je da svaki vatrogasac na požarištu uvijek prati ove sigurnosne stavke. Prije početka svake aktivnosti na požaru, vatrogasci bi trebali postaviti pravila u skladu s LCES konceptima.

Priručnik za odgovor na izvanredne situacije (engl. *NWCG Incident Response Pocket Guide*) (NWCG, 2022.) sadrži preporuke za svaki od ovih elemenata:

1. Promatrač(i):

- iskusan, pouzdan, kompetentan
- dovoljno promatrača na dobrim pozicijama za pregled situacije
- informacije o položaju snaga na terenu
- informacije o sigurnosnim zonama i izlaznim rutama
- znanje o kritičnim točkama za aktiviranje opreza i
- karta, vremenska oprema, sat, plan djelovanja u slučaju incidenta (engl. *IAP - Incident Action Plan*).

2. Komunikacija:

- potvrđene radiofrekvencije
- utvrđeni sigurnosni postupci i definirano vrijeme prijavljivanja

- obavještanje o svim promjenama situacije i
- upozoriti na opasnost odmah, ne kasno.

3. Izlazne rute (putevi prebjega):

- više od jedne izlazne rute
- izbjegavati strme, uzbrdne izlazne rute
- provjeriti da li na izlaznoj ruti postoji labavo tlo, kamenje i vegetacija
- vrijeme bijega prilagoditi najsporijem članu, uzimajući u obzir umor i temperaturu
- oznake za dan ili noć
- procijeniti vrijeme bijega u odnosu na brzinu širenja požara i
- vozila parkirana tako da omogućavaju brzi bijeg.

4. Sigurnosne zone:

- mora biti sigurna i bez zaštitnih navlake od vatre
- osigurana prema spaljenoj površini
- prirodne karakteristike (kamena područja, voda, livade)
- izgrađeni prostori (pročišćena područja, ceste, mogućnost spuštanja helikoptera) i
- pregledane radi veličine i mogućih opasnosti.
- Uzbrdo? Niz vjetar? Gusto gorivo? Svaki od ovih čimbenika znači veći toplinski utjecaj, što zahtijeva veću sigurnosnu zonu.

LCES sustav danas je osnovni sigurnosni protokol koji se koristi diljem svijeta i predstavlja pojednostavljenu verziju 10 zapovijedi za gašenje požara, s naglaskom na sigurnost.

Godine 2001., Thorburn i Alexander predložili su dodavanje "A" za **Anchor Points (sidrišta)**, nakon smrtnog slučaja u Kanadi 1995. Autori definiraju sidrište kao barijeru za širenje požara koja se koristi kao početna točka za početak gašenja, kako bi se smanjila mogućnost okruživanja požarom. Ovaj novi protokol, LACES, usvojile su vatrogasne službe u Alberti i mnogim mediteranskim zemljama.

LACES ima redosljed provedbe: Promatrači promatraju požar s pozicije sidrišta, prenoseći važne informacije timu koji, u slučaju opasnosti, treba koristiti izlazne rute do sigurnosne zone.

Sigurnosna zona je presudna jer omogućuje povlačenje u slučaju opasnosti. Sigurnosna zona je unaprijed planirano utočište koje se može koristiti bez zaštitnih navlaka za zaštitu od požara (Page & Butler, 2017.). Odabir sigurnosne zone nije uvijek jednostavan, pa su razvijeni modeli (Butler & Cohen, 1998.; Butler, 2014.) i smjernice za njihov izbor (Green & Schimke, 1971.; Butler & Cohen, 1998b.). Butler (Butler, 2018.) predlaže formulu za izračun sigurne udaljenosti razdvajanja (engl. *SSD - Safe Separation Distance*) koja uzima u obzir nagib, brzinu vjetra i visinu goriva. SSD se izračunava prema sljedećoj jednadžbi:

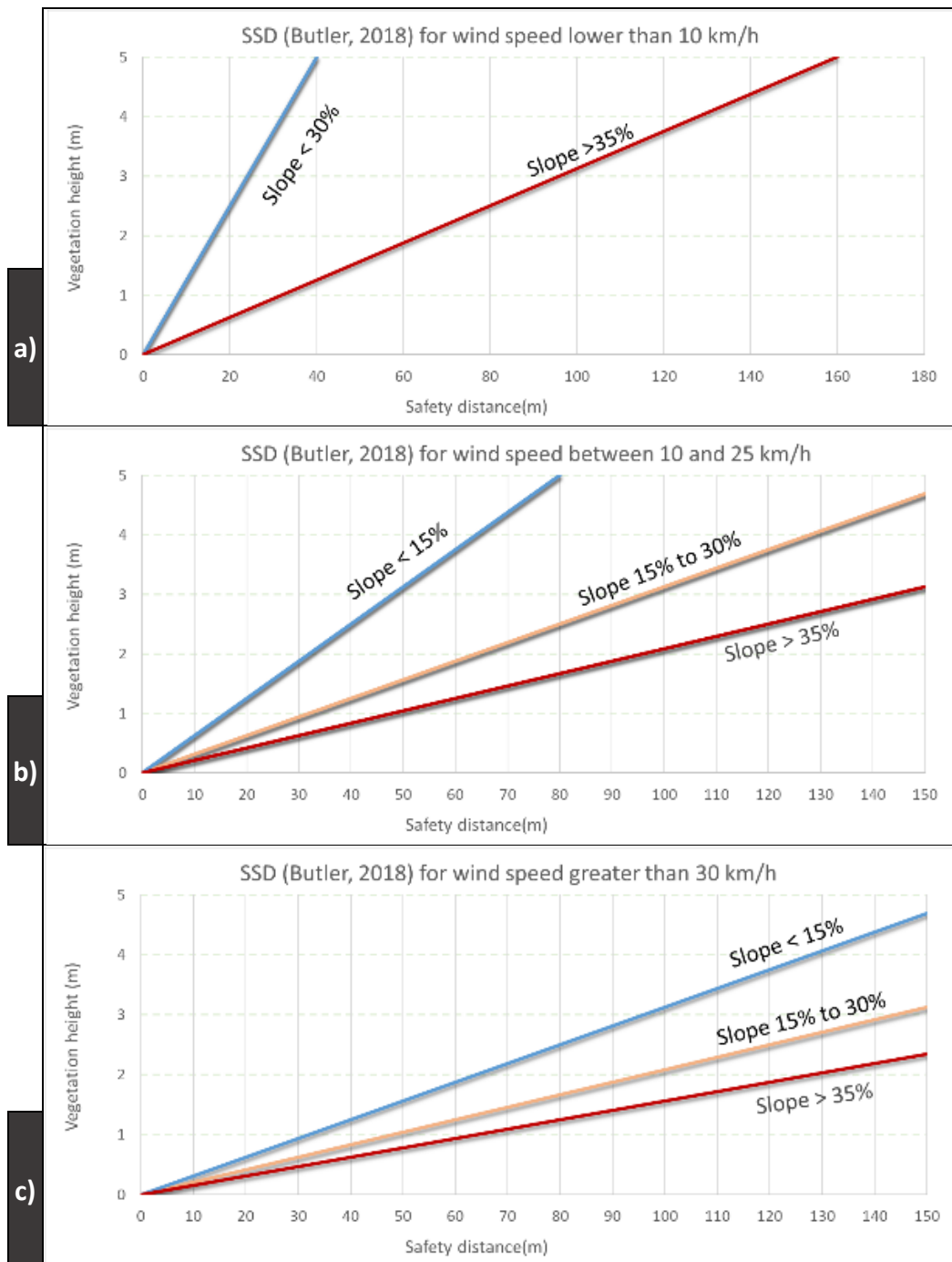
$$SSD \text{ (sigurna udaljenost razdvajanja)} = 8 \times \text{visina goriva} \times \Delta \quad (2)$$

Ova formula pomaže procijeniti potrebnu udaljenost kako bi sigurnosna zona bila učinkovita. Faktor Δ se računa prema tablici 8. Slika 9 grafički prikazuje sigurnu udaljenost razdvajanja (SSD). Značenje izraza na slici: Safe distance (m) – sigurna udaljenost, Vegetation height (m) – visina vegetacije, Slope (%) – nagib, Wind speed – brzina vjetra (Butler, 2018.).

Tablica 8. Faktor nagib-vjetar (Δ) koji služi za proračun SSD za različite visine goriva (Butler, 2018.).

faktor nagib/vjetar (Δ)	nagib terena (%)		
brzina vjetra (km/h)	ravni (< 15%)	15% – 30%	> 35%
lagani vjetar (0-10)	1 / 0,7 / 0,7	1 / 1 / 1	4 / 2 / 2
umjereni (10 – 25)	2 / 1 / 1	4 / 2 / 1	6 / 3 / 2
jaki (> 30)	4 / 2 / 2	6 / 3 / 2	8 / 3 / 2

visina vegetacije < 3 m , 3 m < visina vegetacije < 15 m , visina vegetacije > 15 m



Slika 9. Sigurnu udaljenost razdvajanja (SSD) u metrima za a) slabi vjetar, b) umjereni vjetar i c) jaki vjetar. Značenje izraza na slici: Safe distance (m) – sigurna udaljenost, Vegetation height (m) – visina vegetacije, Slope (%) – nagib, Wind speed – brzina vjetra (Butler, 2018.).

7.3.3. Dodatne preporuke za požare na padinama

Lahaye i suradnici (Lahaye et al., 2018a.) istražili su 103 slučaja opasnosti okruživanja vatrogasaca vatrom diljem svijeta, pri čemu se većina dogodila u južnoj Europi (Lahaye et al., 2018c.) i Australiji (Lahaye et al., 2018d.). Utvrđeno je da se 40% tih slučajeva dogodilo na padinama strmijim od 20° iznad pozicije požarne linije. Istraživanje je također pokazalo da se 30% slučajeva dogodilo na padinama sklonima širenju izazvanom vrtložnim vjetrom, tj. padinama okrenutim prema vjetru s nagibom većim od 20° i brzinom vjetra većom od 20 km/h (J. J. Sharples et al., 2012.).

Kao rezultat toga, ove dvije kritične situacije od 2023. godine se pažljivo razmatraju u obukama analitičara ponašanja požara koje se provode u Novom Južnom Walesu (Australija) i Francuskoj.

Također se može spomenuti i američki „Popis provjere za izgradnju požarne linije nizbrdo“ (engl. *Downhill fireline construction checklist*) (NWCG, 2022.). Gašenje požara ili izgradnja požarne linije nizbrdo, s požarom ispod, nešto je što treba izbjegavati pod svaku cijenu, osim ako nije apsolutno nužno. Ako je potrebno, tada se moraju uzeti u obzir dodatni koraci. Popis se odnosi na LCES protokol, ali uključuje sidrišne točke u dva stavka. Iz tog razloga odlučili smo ih spojiti i prilagoditi izvorni NWCG (2022.) popis:

1. Razgovarajte o zadacima s nadzornicima i vođama timova prije nego što započnete rad nizbrdo. Osobe zadužene za posao trebaju ostati na mjestu dok se zadatak ne završi.
2. Započnite rad tek nakon što nadzornici ili vođe timova detaljno izvide lokaciju i procijene izvedivost zadatka.
3. Koordinirajte LACES protokol za sve uključene.
 - Nadzornik ekipe treba biti u izravnom kontaktu s promatračem koji može vidjeti požar.
 - Uspostavite komunikaciju među svim ekipama.
 - Osigurajte brzi pristup sigurnosnim zonama u slučaju da požar prijeđe ispod ekipa.
 - Početna točka će biti sidrište za ekipe koje grade požarnu liniju nizbrdo od vrha.
4. Koristite izravan napad kad god je to moguće. Ako nije moguće, požarna linija treba biti završena između sidrišta.
5. Požarna linija koja se gasi na bi smjela biti u kanjonima.
6. Nadzirite donji dio požara. Ako postoji mogućnost širenja požara, poduzmite mjere kako biste osigurali rub požara.

Kako bi se zaključilo ovo poglavlje, bez obzira na sva pravila, popise provjere ili alate koji su ovdje predstavljeni ili druge koji sigurno postoje drugdje, ističemo tri najvažnija „Pravila angažiranja za preživljavanje vatrogasaca“ (engl. *Rules of Engagement for Firefighter Survival*) Međunarodne udruge vatrogasnih zapovjednika (IAFC, 2016.), koja su povezana sa strukturnim gašenjem požara, ali se savršeno mogu primijeniti i na gašenje šumskih požara:

(...)

3. NE riskirajte svoj život za žrtve ili imovinu koju nije moguće spasiti.
4. Ograničeno povećajte rizik kako biste zaštitili imovinu koja se može spasiti.
5. Pažljivo i odmjereno povećajte rizik kako biste zaštitili i spasili živote koji bi se mogli spasiti.

(...)

Zaključimo da prioritet u gašenju požara raslinje treba biti individualna i kolektivna sigurnost.

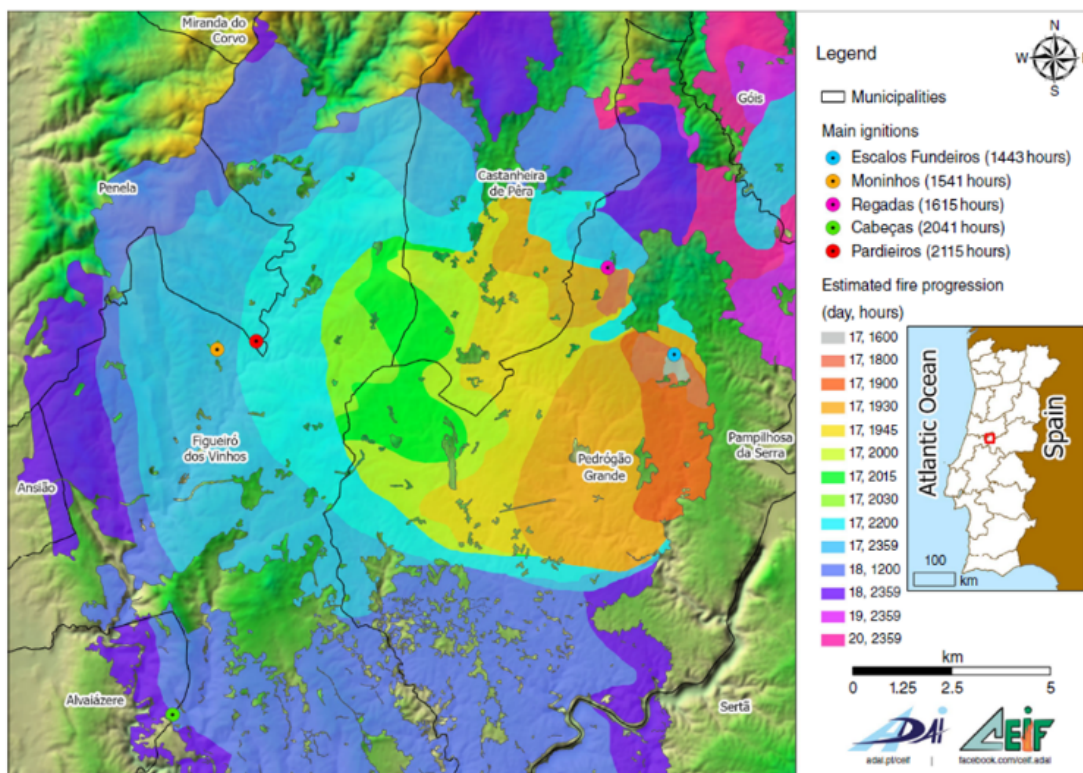
8. Analiza slučaja

8.1. Veliki požari

8.1.1. Požar Pedrógão Grande, Portugal

Požari koji su započeli u ranom popodnevju 17. lipnja 2017. godine blizu Pedrógão Grande (PG) ostat će zapamćeni kao najgori u povijesti Portugala. Uništili oko 45 000 ha vegetacije i šumskog područja, ali prije svega poginulo je 66 osoba. Ovaj opis temelji se na (Viegas et al., 2017.) i (Viegas et al., 2023.).

Požar je uzrokovan kvarom na električnoj mreži od 15 kV na dva mjesta udaljena 3 km. Interakcija između grmljavinske oluje i dva požara detaljno je analizirana u (Pinto et al., 2022.) korištenjem podataka meteoroloških stanica, satelitskih i radarskih opažanja. Kao rezultat te interakcije, dva slabo osigurana požara počela su se širiti izvan kontrole. Vrlo neobični uvjeti koji su nastali tom interakcijom doveli su do spajanja dva požara tijekom kasne večeri, što se ovdje opisuje. Taj proces naziva se spojeni požari (Viegas et al., 2012.; Raposo et al., 2018.) i praćen je snažnim konvektivnim procesima koji rezultiraju vrlo brzim širenjem vatre, što je u ovom slučaju uzrokovalo smrt 66 osoba u razdoblju od 2 sata. Širenje požara bilo je praćeno razvojem visokog dima i nasilnim konvektivnim procesima koji su opisani u (Viegas et al., 2017.), pokazujući važnost procesa spajanja dva odvojena požara na razvoj ovoga požara. Slika 10 prikazuje karta Portugala i područja požara Pedrógão Grande s prikazanim točkama zapaljenja i širenjem požara, a slika 11 fotografiju stupca požara Escalos Fundeiros u 18:00 sati i u 18:15 sati, na kojoj se jasno vidi interakcija sa strujanjem niz padinu koju je stvorio mezoskopski konvektivni sustav¹¹.



Slika 10. Karta Portugala i područja požara Pedrógão Grande s prikazanim točkama zapaljenja i širenjem požara. (ilustracija autora)

¹¹ **Mezoskopski konvektivni sustav** (engl. MCS - Mesoscale Convective System) odnosi se na veliki skup povezanih oluja ili oblaka koji nastaje u atmosferi, obično tijekom toplih mjeseci. Riječ "**mezoskopski**" označava srednju veličinu u meteorološkom smislu (među razinama vremenskih sustava), dok se "**konvektivni sustav**" odnosi na procese podizanja toplog i vlažnog zraka, koji zatim hladi i kondenzira, tvoreći oblake i padaline.



Slika 11. Prikaz stupca požara Escalos Fundeiros u 18:00 sati i u 18:15 sati, koji prikazuje interakciju s nizlaznom strujom koju stvara konvektivno strujanje na mezoskali.

Zapaljenje i početno širenje požara

Požar PG dogodio se u okrugu Leiria, u središnjem Portugalu, u razdoblju suše s temperaturama zraka iznad 40°C i vrlo niskom relativnom vlagom. Vjetar u regiji puhao je sa sjeverozapada i nije bio jak. Veliki mezoskopski konvektivni sustav razvio se nad središnjim zapadnim dijelom Pirinejskog poluotoka i pomaknuo prema zapadu-sjeverozapadu, uzrokujući nekoliko požara zbog munja, ali u 14:30 (lokalno vrijeme, UTC+1), kada je PG požar počeo, najaktivniji dio tog sustava bio je još uvijek gotovo 100 km udaljen, a električni udari nisu registrirani u području požara sve do 18:00 sati. PG požar uzrokovan je dvama požarima koji su izbili blizu Escalos Fundeiosa (EF) u 14:30 sati i blizu Regadasa (RE) u 15:40 sati. Oba požara uzrokovana su kontaktom električnih vodova s krošnjama drveća ispod i vrlo blizu linija. Ta su mjesta bila udaljena 3,2 km, ali cesta od EF do RE nije bila dostupna za teška vozila. Kako je bilo drugih požara u području, resursi za gašenje požara bili su razasuti i nije bilo dovoljno kopnenih i zračnih sredstava sposobnih za kontroliranje širenja EF požara po teškom terenu, koji je u 15:30 sati počeo stvarati točke zapaljenja i prijetiti kućama u selu Escalos Fundeiosa. Kada je RE požar otkriven, također nije bilo dostupnih resursa za njegovo gašenje, pa se širio praktički samostalno.

Spajanje požara

Dokazi pokazuju da su se nakon 19:30 sati oba požara našla vrlo blizu jedno drugome, stvarajući mali kut između njih, čime su stvoreni idealni uvjeti za njihovo spajanje u spojeni požar. Proces spajanja izazvao je vrlo snažne vjetrove u području ispred požara. Brzina širenja glavnog požara bila je oko 14 km/h. Brza izgaranja velike količine vegetacije proizvela su konvektivni stup koji je dosegao 12 000 metara visine u 20:10 sati i ostao na toj visini nekoliko sati. Plamenovi visine od 50 do 100 metara, odvojeni od vegetacije, stvarali su okoliš blizu tla poput unutrašnjosti peći. Izvještaji govore o paljenju krošnji drveća od vrha do tla. Ljudi u području požara našli su se u potpunom mraku, a zrak je bio pun vatrenih kugli. Osim toga, komadi drva, grane i kora letjeli su posvuda, ponekad uzrokujući nova zapaljenja. U najmanje dva vrlo lokalizirana područja vjetrovi nalik na tornado uvili su i slomili mnoga stabla promjera većeg od 20 cm, kao čačkalice. Brzina vjetra potrebna za ovo procjenjuje se na oko 200 km/h.

Percepcija nasilnosti požara, uzrokovana bukom visokih i tutnjavih plamenova koji su prijetili uništiti sve pred sobom, navela je mnoge građane da odluče pobjeći iz svojih kuća. Neki su to učinili unatoč tome što su znali da bi njihove kuće obično izdržale prolazak požara, što su kod većine i dogodilo. Dok su bježali u svojim automobilima, mnogi ljudi, ponekad cijele obitelji, bili su zahvaćeni dimom, gubitkom

vidljivosti i plamenom te su izgubili život. Posebno dramatična bila je situacija na dijelu od 200 metara ceste N326-1, između Figueiró dos Vinhos i Castanheira de Pêre, gdje je 30 osoba poginulo u ili blizu svojih automobila. Nedostatak održavanja vegetacije, uključujući drveće, u blizini glavnih cesta pridonio je stradavanju ovolikog broja građana.

Glavni požar bio je pod kontrolom 22. lipnja u 23:50 sati zahvaljujući naporima više od 1400 vatrogasaca i drugih agenata, nakon što je spalio ukupnu površinu od 45 328 hektara.

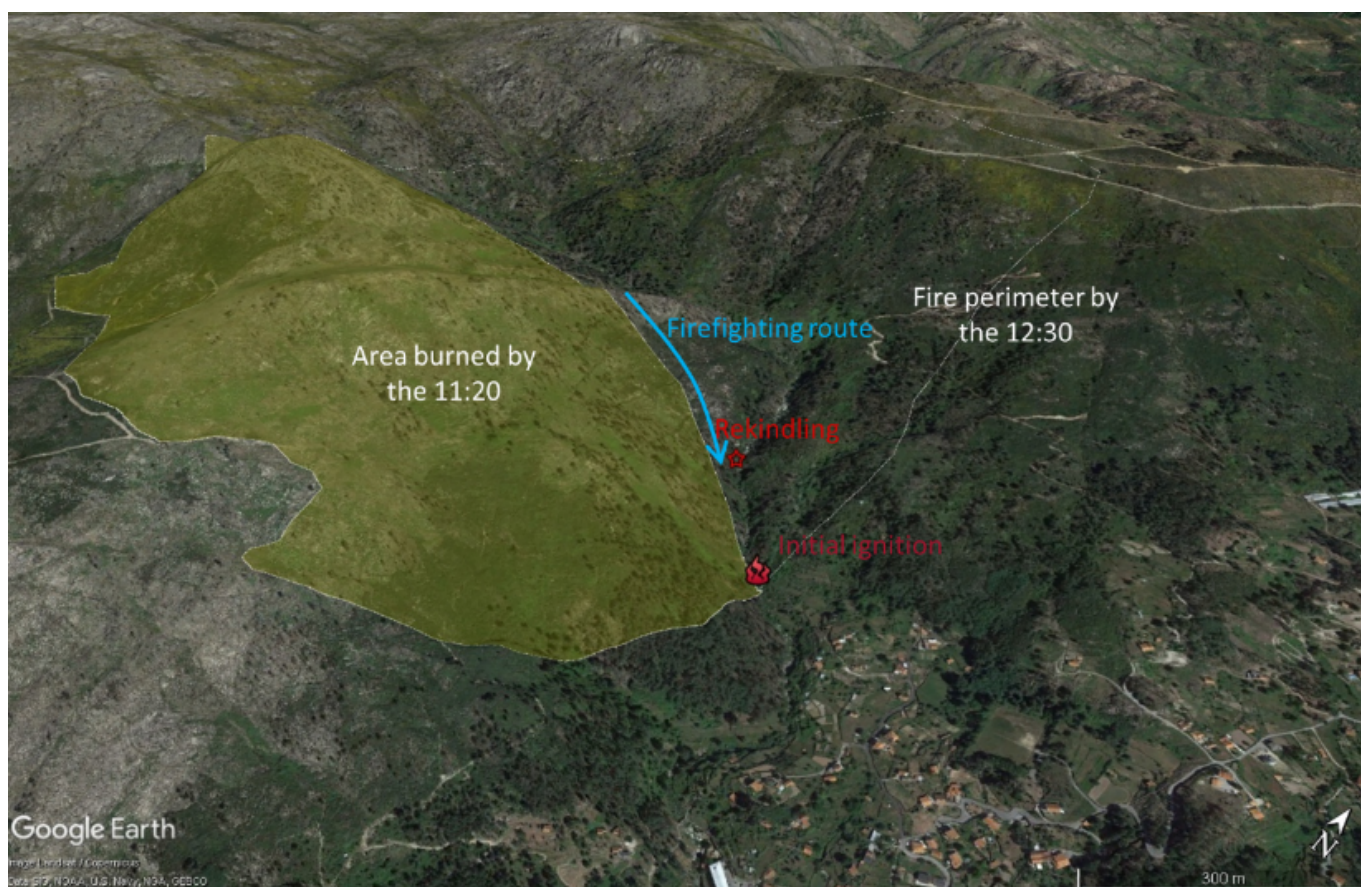
8.1.2. Požar Garrocho (Serra da Estrela), Portugal

Požar Garrocho (Serra da Estrela) u Portugalu značajan je zbog operativnih lekcija koje nudi. Ovaj požar je zahvatio oko 25 tisuća hektara i bio aktivan 12 dana, od 6. kolovoza do 17. kolovoza 2022. godine, dok nije ugašen 3. rujna. Srećom, nije bilo žrtava, ali su glavni utjecaji uključivali oštećenje nekoliko zgrada i štetu na velikom zaštićenom prirodnom području.

Požar je prijavljen u 01:18 dana 6. kolovoza 2022. godine, a od samog početka napori u gašenju suočavali su se sa značajnim izazovima zbog ograničenog pristupa terenu, osobito tijekom noći. Unatoč prividnom približavanju gašenja na nekoliko prilika, nepredviđeni događaji narušili su provedenu strategiju. Dva takva događaja bit će opisana u nastavku, s vrijednim lekcijama koje treba naučiti.

Eruptivni požar u klanu izazvan helikopterskom operacijom

Oko 10:23 prvog dana, helikopter za gašenje požara stigao je na mjesto požara, raspoređujući svoj tim od osam članova. Uz podršku zračnih vodenih ispuštanja iz helikoptera, tim je započeo kopneno gašenje, spuštajući se niz padinu s namjerom zatvaranja tog boka u podnožju klanca. Slika 12 prikazuje situaciju na terenu (značenje pojmova na slici: Area burned by the 11:20 – Izgorjelo područje do 11:20, Firefighting route – put kretanja vatrogasaca, Rekindling – ponovno rasplamsavanje, Initial ignition – početno zapaljenje, Fire perimeter by the 12:30 – područje zahvaćeno vatrom do 12:30).



Slika 12. Situacija na terenu u 11:30 na dan 6. kolovoza 2022. godine (ilustracija autora)

Rezervoar za vodu iz kojeg je helikopter uzimao vodu bio je udaljen samo 5 km od mjesta ispuštanja, ali je bio na oko 600 m višoj nadmorskoj visini, što je značajno smanjilo autonomiju i operativno vrijeme helikoptera. Nakon otprilike sat vremena, kopneni tim za gašenje, uz podršku helikoptera, gotovo je stigao do podnožja boka. Ostatak perimetra požara bio je gotovo riješen, s tek malim dijelom blizu podnožja klanca koji je ostao neugasiv. Međutim, helikopteru je bilo potrebno dopunjavanje gorivom prije završetka misije.

Prema operativnoj doktrini, helikopter je morao pokupiti svoj tim prije odlaska s mjesta požara radi dopunjavanja gorivom. Ovo povlačenje dogodilo se u podnožju klanca, gdje se nalazio kopneni tim, čime se izbjegla potreba za njihovim penjanjem uz padinu. Svjedoci su izvijestili da je turbulencija uzrokovana helikopterom prilikom povlačenja tima ponovno zapalila požar na tom području, prenoseći plameni front na suprotnu stranu klanca. U tom trenutku u klancu se dogodio eruptivni požar, što je dovelo do gubitka kontrole nad situacijom koja je do tada bila gotovo pod kontrolom.

Ovaj incident pruža dvije glavne lekcije. Prva se odnosi na određivanje autonomije zračnih sredstava, koje bi trebalo uzeti u obzir, i to ne samo udaljenost između točaka opskrbe vodom i zone intervencije požara, već i razliku u nadmorskoj visini između tih lokacija. Druga lekcija naglašava oprez koji bi operateri zračnih sredstava trebali primijeniti u svojim operacijama kako bi spriječili turbulencije prirodno generirane letjelicama, osobito helikopterima, blizu fronte požara i osjetljivih/kritičnih točaka.

Ponovno rasplamsavanje u Vale da Amoreira

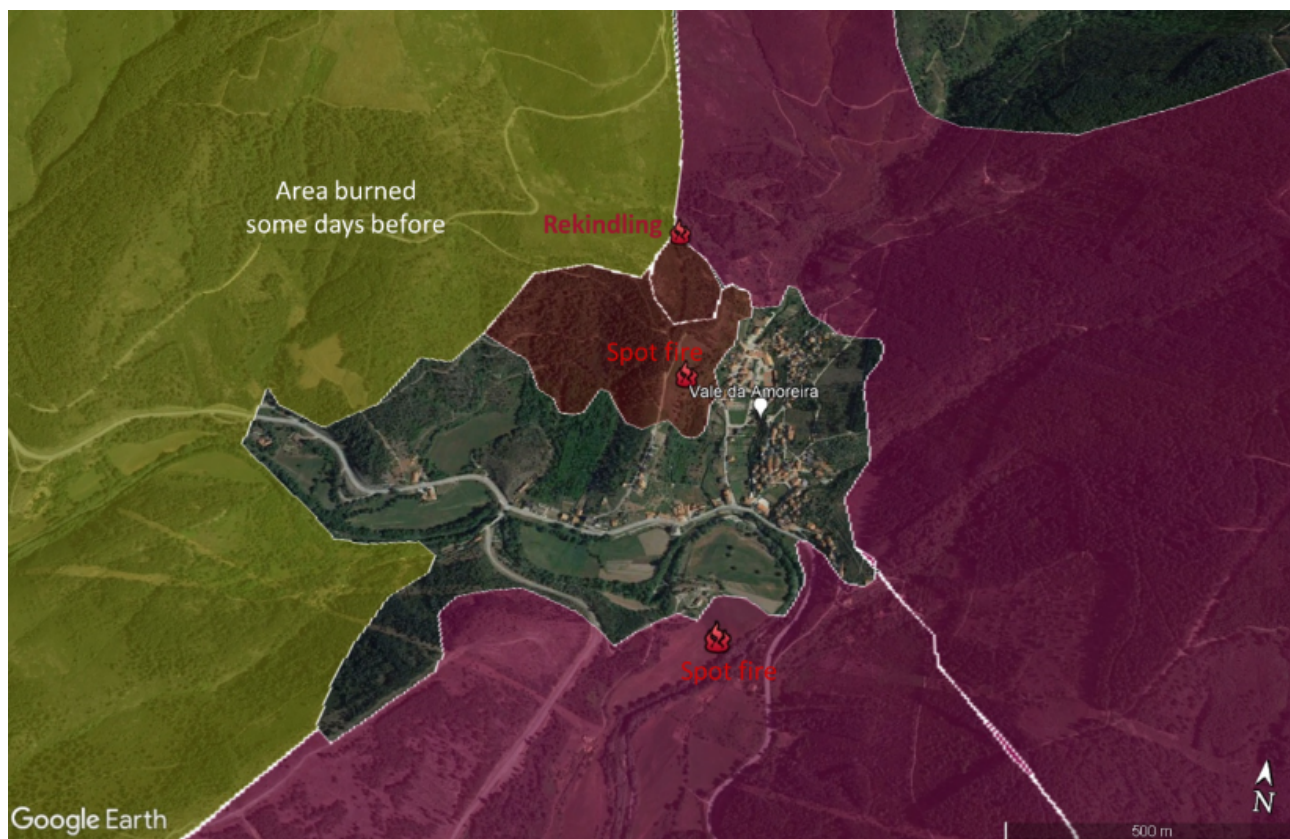
Između 12. i 14. kolovoza, s proširenim požarnim područjem koji je obuhvatio izgorjelo područje od 9 tisuća hektara, požar se polako širio i bio je gotovo pod kontrolom. Svi bokovi bili su pod „aktivnim nadzorom i održavanjem gašenja“, osim žarišta na sjeveroistoku, ali su i tamo naponi u gašenju napredovali povoljno. Dana 15. kolovoza, u 15:44, požar je klasificiran kao „pod kontrolom“.

Selo Vale da Amoreira bilo je jedno od kritičnih područja zbog nekoliko zabilježenih ponovnih rasplamsavanja i mogućeg otvaranja nove fronte požara. Sjeverozapadnu padinu ovog sela, gdje se kasnije dogodilo iznenadno rasplamsavanje, požar je dosegao nekoliko dana ranije, zaustavivši se na pola padine, ostavljajući donji dio nesagorenim. Kako bi se konsolidiralo izgorjeno područje, otvoren je protupožarni pojas na pola padine korištenjem buldožera. U Vale da Amoreira bio je i koncentracijski punkt vatrogasaca, što je dovelo do povećanja resursa na tom području.

U 15:47 dana 15. kolovoza 2022. godine, samo tri minute nakon što je incident smatran riješenim, došlo je do snažnog ponovnog rasplamsavanja u Vale da Amoreira, brzo otvarajući tri vatrene fronte koje su napredovale u različitim smjerovima, prvenstveno zbog heterogenih lokalnih vjetrova uzrokovanih neravnim reljefom tog područja. Prema svjedočanstvu građanina koji je promatrao razvoj ovog događaja sa suprotne padine, rasplamsavanje se dogodilo na području s velikim nakupljanjem suhe vegetacije. Kao odgovor na ovo ponovno rasplamsavanje, helikopter se nadvio blizu tog mjesta, što je rezultiralo naglim širenjem plamenog fronta i pojavom iskrica koje su padale niz padinu nakon što je otvoren protupožarni pojas buldožerima koji još uvijek nije bio izgorio. Iako nije bilo moguće detaljnije analizirati manevar helikoptera, drugi građani Vale da Amoreira potvrdili su ovo svjedočenje. Od tog trenutka do 17. kolovoza 2023. godine situacija je ponovno izmakla kontroli, pa se požar proširio velikim intenzitetom prema istoku, dodajući još 6 tisuća hektara prethodno opožarenom području.

Iz ovog događaja može se izvući nekoliko lekcija. Prva ponavlja lekcije iz prethodnog incidenta, služeći kao upozorenje o opasnosti uzrokovanoj turbulencijom izazvanom helikopterom. Druga lekcija odnosi se na raspored operativnih snaga koje su bile vrlo blizu mjesta ponovnog rasplamsavanja, ali su bile opuštenije zbog povoljnog razvoja gašenja i ulaska u fazu rješenja. Konačno, operacije konsolidacije na pola padine treba izbjegavati jer užareni materijal, nošen vjetrom, može skliznuti niz padinu, uzrokujući nova zapaljenja na neizgorenom dijelu. U ovom slučaju, trebalo je napraviti taktičku operacija paljenja

protupožara kako bi se izgorjelo područje dovelo do dna padine, te provesti kontinuirani i učinkoviti nadzor tog dijela što nije učinjeno.



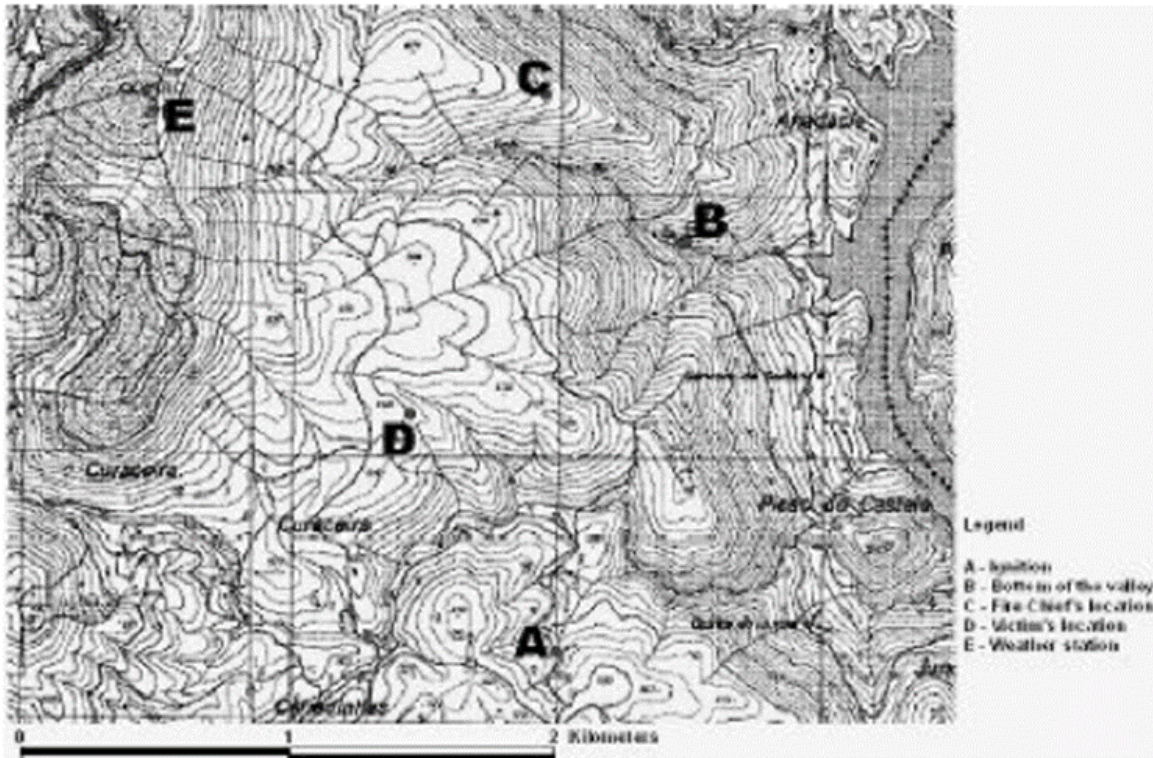
Slika 13. Situacija na terenu u 11:30 na dan 15. kolovoza 2022. godine (ilustracija autora)

8.2. Nesreće

8.2.1. Nesreća u Freixo de Espada-à-Cinta, Portugal

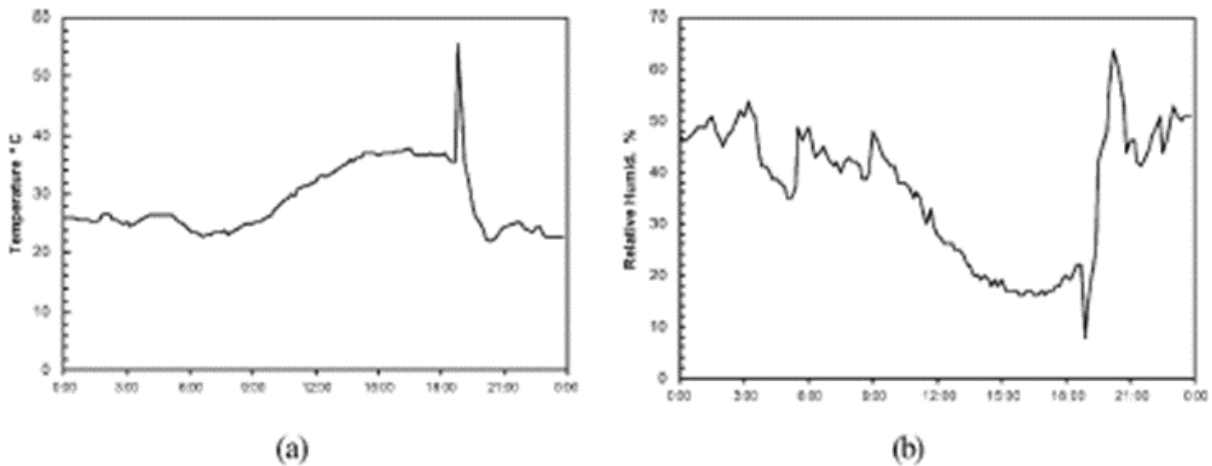
Tijekom ljeta 2003., među nekoliko fatalnih nesreća koje su se dogodile u Portugalu, jedna se zbila u Freixo de Espada-à-Cinta 5. kolovoza (Viegas, 2004a.). Dvije su osobe izgubile život zbog naglog intenziviranja požara na širokom obronku uz rijeku Douro, u sjeveroistočnom dijelu Portugala, neposredno uz granicu sa Španjolskom. Područje gdje se požar dogodio pokriveno je površinskom vegetacijom koja je uključivala mješavinu travnate vegetacije, grmlja i poljoprivrednih polja. Početna točka požara, koji je izbio u 14:30, označena je na karti kao točka A. Vatrogasci su pokušali zadržati požar u donjem dijelu obronka i pustiti ga da gori prema obali rijeke. Kada je stigao do točke B, požar je praktički bio pod kontrolom, a ostalo je za ugaziti samo manje od 50 metara vatrene linije. U toj fazi, zapovjednik požara, koji se nalazio na točki C sa strojem za probijanje zaštitnog područja, obavijestio je svoje nadređene da je požar pod kontrolom. Zatim se požar iznenada počeo vrlo brzo širiti uz kanjonski obronak iznad točke B, rasplamsavši se duž cijelog obronka i dosegnuvši vrh u samo nekoliko minuta.

Par građana koji je provjeravao sigurnost svog imanja na lokaciji D, znatno udaljenoj od požara i načelno neugroženoj, zahvaćen je naglim širenjem požara i oboje su poginuli. Više detalja o ovoj nesreći može se pronaći u literaturi (Viegas, 2004a.). Na vrhu obronka, na točki E, meteorološka stanica nalazila se na putu vatrene fronte. Zbog protupožarnog prosjeka na vrhu grebena, senzori nisu uništeni, iako su toplina oštetila njihove zaštitne obloge, a zabilježeni podaci, snimani svakih 10 minuta, su prikupljeni.

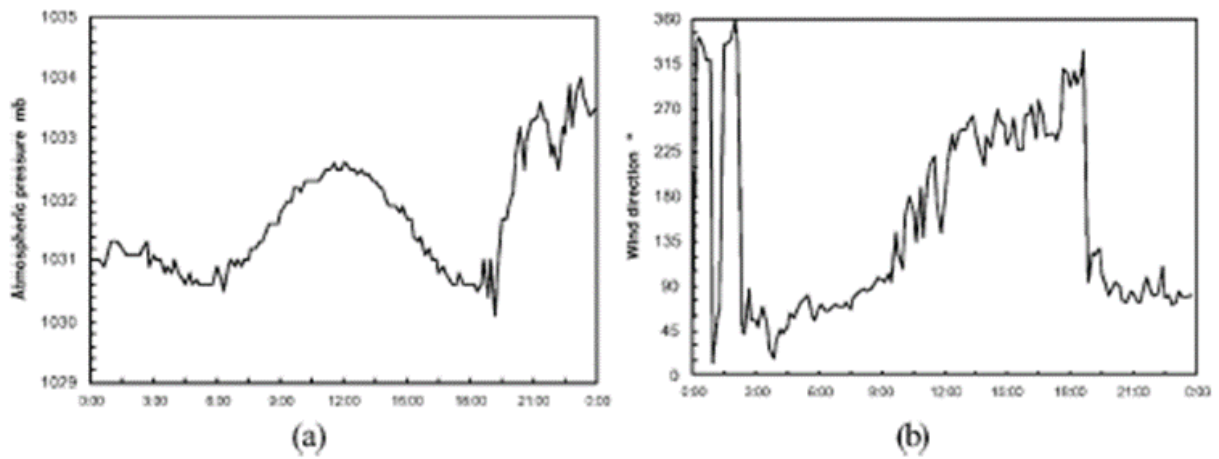


Slika 14. Topografska karta područja požara u Freixo de Espada-à-Cinta. Sjever je označen bijelom strelicom u gornjem lijevom kutu slike.

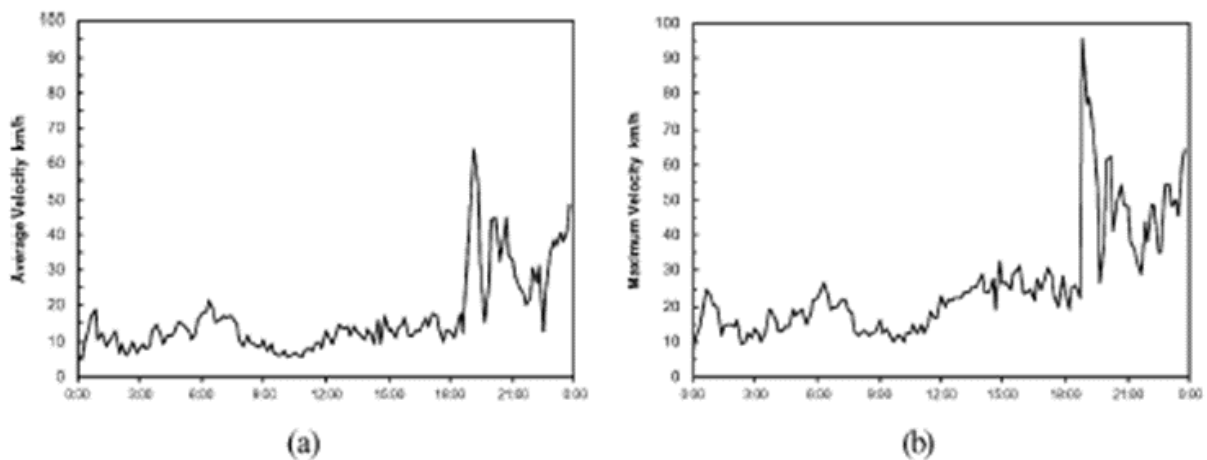
Prikaz temperature zraka, relativne vlažnosti, atmosferskog tlaka, smjera vjeta i brzine vjeta 5. kolovoza može se vidjeti na slikama 15-17. Kao što je vidljivo iz tih slika, oko 18:30 sati svi zapisi pokazuju vrlo neuobičajeno ponašanje: temperatura (10-minutni prosjeci) je porasla na 55,5°C, relativna vlažnost pala je na 8%, prosječna brzina vjeta porasla je na 63,8 km/h, dok je maksimalna (u 10-minutnim razdobljima) dosegla 96 km/h.



Slika 15. Temperatura zraka (a) i relativna vlažnost (b) u Freixo tijekom 5. kolovoza 2003. godine.



Slika 16. Atmosferski tlak (a) i smjer vjetra (b) u Freixo tijekom 5. kolovoza 2003. godine.



Slika 17. Desetominutna prosječna brzina vjetra (a) i maksimalna brzina vjetra (b) u Freixo tijekom 5. kolovoza 2003. godine.

Jedna posebno značajna karakteristika ovih zapisa je iznenadna promjena smjera vjetra koja se dogodila u 18:40 sati. Vjetar, koji je puhao sa sjeverozapada (327°) nizbrdo brzinom od oko 12,2 km/h, naglo se okrenuo na jug-jugozapad (95 do 120°), što je približno smjer uz obronak iz doline rijeke, te se ubrzo povećao na oko 64 km/h, s udarima do 96 km/h.

Ovaj zapis jasno dokazuje da je do naglog intenziviranja požara došlo zbog vjetrova brzine do 100 km/h, što se ne može objasniti nikakvim drugim atmosferskim fenomenom osim interakcijom požara i ukupnog strujanja inducirano nagibom. Iako nema slikovnih zapisa o nesreći, opisi svih ispitanih osoba konzistentni su s naglim ubrzanjem požara od dna kanjona do vrha grebena i dalje. Već spomenuti gubitak dvaju života također je tužan dokaz ovog iznenađujućeg ponašanja požara.

Matematički model predložen od (Viegas, 2005.) korišten je za predviđanje vremenske evolucije požara i brzine vjetra inducirane tijekom naglog intenziviranja. Dobivene su vrijednosti od reda veličine 113 km/h koje su vrlo usklađene s opažanjima.

8.2.2. Nesreća u Famalicão da Serra, Portugal

Ovo izvješće temelji se na (Viegas et al., 2009.).

Uvod

U ovoj nesreći šest vatrogasaca izgubilo je živote dok su pokušavali ugasiti veliki požar na rubu sela Famalicão da Serra u okrugu Guarda u središnjem Portugalu, u rano poslijepodne 9. srpnja 2006. godine. Petorica od njih bili su čileanski državljani koji su radili u Portugalu kao profesionalni vatrogasci za Afocelcu, privatnu tvrtku posebno posvećenu zaštiti šumskih nasada u vlasništvu portugalskih tvornica celuloze. Šesta žrtva bio je portugalski volonter vatrogasac iz lokalne vatrogasne postrojbe Gonçalo koji je radio s ovom ekipom.

Opis nesreće

Uvjeti okoline

Požar se razvio na obronku planine Serra da Estrela, iznad doline u kojoj se nalazi selo Famalicão. Početni dio obronka bio je prekriven poljoprivrednim zemljištem s travnatim i laganim gorivim materijalima. Gornji dio bio je prekriven zrelim borovim šumama koje su bile očišćene i zaštićene širokim protupožarnim prosjekom. Uvjeti za požar toga dana bili su ekstremni s temperaturama od 35°C i relativnom vlažnošću od 15%, uz lagani vjetar koji je puhao iz istok-jugoistoka.



Slika 18. Opći pogled na područje požara Famalicão. Izvor požara bio je blizu donjeg središta slike. Nesreća se dogodila u kanjonu u središtu fotografije. (Viegas et al. 2009.)

Početak požara i početni napad

Požar je započeo slučajno u 12:30 na farmi zbog iskri koje su stvorili noževi kosilice kada su udarili u kamenje. Iako su dvije osobe pokušale ugasiti požar koristeći vatrogasni aparat iz automobila, njihovi napori nisu bili uspješni, te se požar brzo proširio kroz farmu i ušao na obronak. Lagano vozilo lokalne vatrogasne postrojbe Gonçalo odmah je poslano na mjesto požara i stiglo je do ruralne ceste iznad mjesta gdje je požar započeo. Širenje požara premašilo je njihove mogućnosti i prešlo cestu. Uz pomoć nagiba i

vjetra, požar se proširio prema vrhu planine. Ova skupina napustila je to mjesto i krenula prema vrhu, gdje su druga skupina vatrogasaca i nekoliko vlasnika šuma i civila već radili na zaštiti borove šume.

Zarobljavanje u požaru

Nakon nekoliko minuta, oko 13:30, dogodila se nagla erupcija požara ispod položaja skupine i požar je počeo paliti krošnje, tvoreći tri pojasa koji se mogu vidjeti na slici 18. Nastala je opća uzbuna. Oni koji su bili iznad, blizu ceste, pobjegli su duž vrha grebena na desnu stranu. Neke osobe zadobile su manje opekotine tijekom bijega.

Skupina od šest vatrogasaca koja se nalazila na sredini obronka odlučila je pobjeći od požara u krošnjama na lijevu stranu glavnog požara. Krenuli su uz cestu prema središtu velikog kanjona.

Nisu znali da donji dio požara nije bio pod nadzorom zbog teškog pristupa. Samo jedan helikopter ispuštao je vodu na lijevi bok požara, blizu njegova dna, bez potpore sa zemlje. Dok je skupina bježala od glavnog požara, lijevi bok požara ušao je u osnovnu liniju i obronak na desnoj strani kanjona. U nekoliko minuta požar je buknuo duž tog obronka, odsjekavši put za bijeg skupine.

Tijelo portugalskog vatrogasca pronađeno je netaknuto zbog zaštitnog učinka kamenog rova u kojem se sakrio. Petorica čileanskih vatrogasaca također su poginula usred borove šume. Neki od njih pokušali su koristiti respiracijske uređaje, ali bez uspjeha.

Simulacija požara

Općenito se smatralo da je uzrok zarobljavanja vatrogasaca bila nagla promjena smjera vjetra. Međutim, u zapisima vjetra nije bilo dokaza koji bi podržali ovu tvrdnju.

Simulacija požara u kanjonu Famalicão provedena je u Laboratoriju za istraživanje požara (LEIF) na Sveučilištu u Coimbri u Lousã. Osnovna geometrija kanjona reproducirana je, a kao gorivo korišteno je sijeno. Linijski požar zapaljen je kako bi simulirao položaj lijevog boka glavnog požara kada je čileanska brigada intervenirala. Požar se polako širio šireći svoje bokove sve dok nije dosegnuo osnovnu liniju. Kada se to dogodilo, požar je naglo buknuo i zahvatio lijevu stranu kanjona u samo nekoliko sekundi.

Ova simulacija pokazala je da je konvekcija inducirana požarom proizvela naglu promjenu ponašanja požara koja je ranije tumačena kao posljedica promjene smjera vjetra. Slijed slika iz testova pokazuje dramatično ubrzanje požara kada ulazi u lijevi obronak kanjona bez utjecaja vjetra unutar laboratorija tijekom eksperimenta.

Zaključci

Ovo istraživanje bavilo se nesrećom u kojoj je šest vatrogasaca izgubilo živote zbog erupcije požara u kanjonu. Situacija koja se naizgled činila sigurnom i gotovo rutinskim gašenjem požara pretvorila se u smrtonosnu zamku. Moguće je da bi korištenje protupožarnih skloništa moglo spasiti živote ovih ljudi, ali to se ne može sa sigurnošću tvrditi.

Simulacija nesreće u Laboratoriju za istraživanje požara dala je uvjerljive rezultate o ponašanju požara tijekom zarobljavanja. Pokazala je da nije bila potrebna promjena smjera vjetra kako bi se objasnilo naglo ubrzanje požara na lijevoj strani kanjona koje je iznenadilo skupinu od šest vatrogasaca.

9. Literatura

- Abouali, A., Viegas, D. X., & Raposo, J. R. (2021). Analysis of the wind flow and fire spread dynamics over a sloped–ridgeline hill. *Combustion and Flame*, 234, 111724. <https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2021.111724>
- Adams, J. (2013). *Emergency medicine: clinical essentials*. 2nd ed. ed. Philadelphia. Elsevier/Saunders.
- Albini, F. A. (1976). *Estimating wildfire behavior and effects*. USDA Forest Service. General Technical Report GTR INT-30. https://www.fs.fed.us/rm/pubs_int/int_gtr030.pdf
- Alexander, M. E. (2008). Latitude considerations in adapting the Canadian Forest Fire Weather Index System for use in other countries. In B. D. Lawson & O. B. Armitage (Eds.), *Weather guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System* (pp. 67–73). Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre.
- Alexander, M. E., & Cruz, M. G. (2020). Fireline Intensity. In *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (pp. 453–460). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_52
- Almeida, M., Ribeiro, L. M., Alves, D., Viegas, D. X., Vaz Pinto, V., Marques, R., Gomes, A., Ballereau, D., Lahaye, S., Romain, M., Salis, M., Arca, B., Bacciu, V., Canu, A., Del Giudice, L., Duce, P., Pellizzaro, G., Stroppiana, D., Ventura, A., Cabiddu, S., Casula, A., Cuccu, G., Pinna, T., Vaccargiu, M., Campesi, S., Casule, F., Chessa, M., Cinus, S., Massidda, P., Peddes, M., Soi, F., Tola, F., Usai, A., Castiglia, C., Dessy, C., Delitala, A., Trudu, P. L., Angotzi, S., Murtas, F., Barone, A. V., Erriu, N., Fresu, G., Melis, G., Fiorucci, P., Pampanoni, V., Laneve, G., Eftychidis, G., Varela, V., Gkotsis, I., Petrou, K., Boustras, G., Senekis, I., Kirschner, J., Pandey, P., San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Liberta, G., Boca, R., Maianti, P., Branco, A., Jacome Felix Oom, D., De Rigo, D., Roglia, E., Scionti, N. and Suarez-Moreno, M. (2023). Analysis of 2021 critical wildfire events in the Mediterranean region, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/562495, JRC133972.
- Almeida, M., Modarres, M., Muñoz, J. A., & Ribeiro, L. M. (2022). Flammability characteristics of typical garden species. In *Advances in Forest Fire Research 2022* (pp. 602–609). Imprensa da Universidade de Coimbra. https://doi.org/10.14195/978-989-26-2298-9_92
- Almeida, M., Porto, L., & Viegas, D. (2021). Characterization of Firebrands Released From Different Burning Tree Species. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 7, 651135. <https://doi.org/10.3389/fmech.2021.651135>
- Alves, D., & et. al. (2018). Calibration of the Canadian FWI system for the territory of Europe. *Advances in Forest Fire Research 2018*, 33–43. https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_3
- Alves, C., Vicente, A., Nunes, T., Gonçalves, C., Fernandes, A. P., Mirante, F., Tarelho, L., Sánchez de la Campa, A. M., Querol, X., Caseiro, A., Monteiro, C., Evtyugina, M., Pio, C. (2011). Summer 2009 wildfires in Portugal: Emission of trace gases and aerosol composition. *Atmospheric Environment* 45, 641–649. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.10.031.
- Anderson, H. E. (1982). Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. In *USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-122*. Intermt. For. and Range Exp. Stn., Ogden, Utah 84401.
- Andrews, P. L. (2014). Current status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System. *International Journal of Wildland Fire*, 23(1), 21. <https://doi.org/10.1071/WF12167>
- Aragoneses, E., García, M., Salis, M., Ribeiro, L. M., & Chuvieco, E. (2023). Classification and mapping of European fuels using a hierarchical, multipurpose fuel classification system. *Earth System Science Data*, 15(3), 1287–1315. <https://doi.org/10.5194/essd-15-1287-2023>

- Bradshaw, L. S., Deeming, J. E., Burgan, R. E., & Cohen, J. D. (1984). The 1978 National Fire-Danger Rating System: technical documentation. In *General Technical Report INT-169*. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 44 p. (Vol. 169). <https://doi.org/10.2737/INT-GTR-169>
- Butler, B. W. (2014). A study of the impact of slope and wind on firefighter safety zone effectiveness. *Final Report for JFSP Project 07-2-1-10*, 21.
- Butler, B. W. (2018). A review of current status of efforts to reduce firefighter entrapments in the US. In *V Short Course on Fire Safety: "Fire Safety at the WUI", Held at the VIII International Conference on Forest Fire Research*.
- Butler, B. W., & Cohen, J. D. (1998a). Firefighter safety zones: A theoretical model based on radiative heating. *International Journal of Wildland Fire*, 8(2), 73. <https://doi.org/10.1071/WF9980073>
- Butler, B. W., & Cohen, J. D. (1998b). Firefighter safety zones: how big is big enough? *Fire Management Notes*, 58(1), 13–16. <https://doi.org/10.2307/j.ctvx078wk.11>
- Byram, G. M. (1959). Combustion of forest fuels. In K. P. Davis (Ed.), *Forest Fire: Control and Use* (pp. 61–89). McGrawHill.
- Byram, G. M., & Nelson, R. M. (2015). An analysis of the drying process in forest fuel material. In *e-Gen. Tech. Rep. SRS-200*. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station. 45 p. (Vol. 200). <https://doi.org/10.2737/SRS-GTR-200>
- Carmo, M., Ferreira, J., Mendes, M., Silva, Á., Silva, P., Alves, D., Reis, L., Novo, I., & Xavier Viegas, D. (2022). The climatology of extreme wildfires in Portugal, 1980–2018: Contributions to forecasting and preparedness. *International Journal of Climatology*, 42(5), 3123–3146. <https://doi.org/10.1002/joc.7411>
- Carvalho, A., Monteiro, A., Flannigan, M., Solman, S., Miranda, A. I., Borrego, C. (2011). Forest fires in a changing climate and their impacts on air quality. *Atmospheric Environment* 45, 5545–5553. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.05.010.
- Chandler, C. C., Williams, D., Trabaud, L., Thomas, P. H., & Cheney, P. (1983). *Fire in forestry, Volume II. Forest fire management and organization*. John Wiley and Sons.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Jurdao, S., Pettinari, M. L., Yebra, M., Salas, J., Hantson, S., de la Riva, J., Ibarra, P., Rodrigues, M., Echeverría, M., Azqueta, D., Román, M. V., Bastarrika, A., Martínez, S., Recondo, C., Zapico, E., & Martínez-Vega, F. J. (2014). Integrating geospatial information into fire risk assessment. *International Journal of Wildland Fire*, 23(5), 606. <https://doi.org/10.1071/WF12052>
- Chuvieco, E., Yue, C., Heil, A., Mouillot, F., Alonso-Canas, I., Padilla, M., Pereira, J. M., Oom, D., Tansey, K. (2016) A new global burned area product for climate assessment of fire impacts. *Global Ecology and Biogeography* 25, 619–629. doi:10.1111/geb.12440.
- CIPOP (2024) - Centar za istraživanje požara otvorenog prostora - <http://cipop.fesb.hr>
- Countryman, C. M. (1982). *Physical Characteristics of Some Northern California Brush Fuels*. 8.
- Cruz, M. G. (2005). Guia Fotográfico para Identificação de Combustíveis Florestais - Região Centro de Portugal. *Centro de Estudos Sobre Incêndios Florestais. Associação Para o Desenvolvimento Da Aerodinâmica Industrial. Universidade de Coimbra*.
- Cruz, M. G., & Viegas, D. X. (1995). *Forest fuels characterization and modelling. State of the art and methodology*. Deliverable 4.1. PROMETHEUS Project.
- Darmenov, A., da Silva, A. M. (2015) The Quick Fire Emissions Dataset (QFED) - Documentation of

versions 2.1, 2.2 and 2.4.

- Davies G. M., Gray A., Rein G., Legg C. J. (2013) Peat consumption and carbon loss due to smouldering wildfire in a temperate peatland. *Forest Ecology and Management* 308, 169-177.
- De Groot, W. J., Wardati, & Wang, Y. (2005). Calibrating the Fine Fuel Moisture Code for grass ignition potential in Sumatra, Indonesia. *International Journal of Wildland Fire*, 14(2), 161–168. <https://doi.org/10.1071/WF04054>
- Deeming, J. E., Burgan, R. E., & Cohen, J. D. (1978). *The National Fire Danger Rating System*.
- Demling R. H. (2008). Smoke inhalation lung injury: an update. *Eplasty*, 8, e27.
- Dennekamp, M., Straney, L.D., Erbas, B., Abramson, M. J., Keywood, M., Smith, K., Sim, M. R., Glass, D. C., Del Monaco, A., Haikerwal, A., Tonkin, A. M. (2015) Forest fire smoke exposures and out-of-hospital cardiac arrests in Melbourne, Australia: A case-crossover study. *Environmental Health Perspectives* 123, 959–964. doi:10.1289/ehp.1408436.
- Doogen, M. (2006) 'The Canberra Firestorm Inquests and Inquiry into Four Deaths and Four Fires Between 8 and 18 January 2003.' (ACT Coroner's Court: Canberra, ACT)
- Dowdy, A. J., Mills, G. A., Finkele, K., Groot, W. De, & De Groot, W. (2009). Australian fire weather as represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index. In *Citeseer* (Issue 10). The Centre for Australian Weather and Climate Research. Technical Report No. 10. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.307.8282&rep=rep1&type=pdf>
- Drury, S. (2020). Fuel Continuity. In *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (Issue 2009, pp. 513–516). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_239
- Edgar, R. A., Sharples, J. J., & Sidhu, H. S. (2016). Examining the effects of convective intensity on plume attachment in threedimensional trenches. *Chemeca 2016: Chemical Engineering-Regeneration, Recovery and Reinvention*, 613–621.
- EFFIS/JRC. (2023). *EFFIS Fire Danger Forecast*.
- EFFIS. (2017). *European Fuel Map, 2017, based on JRC Contract Number 384347 on the "Development of a European Fuel Map."* European Commission.
- Endorf, F. W., Gamelli, R. L. (2007). Inhalation injury, pulmonary perturbations, and fluid resuscitation. *Journal of burn care & research: official publication of the American Burn Association*. 28(1):80-3.
- Fernandes, A. P., Lopes, D., Sorte, S., Monteiro, A., Gama, C., Reis, J., Menezes, I., Osswald, T., Borrego, C., Almeida, M., Ribeiro, L. M., Viegas, D. X., & Miranda, A. I. (2022). Smoke emissions from the extreme wildfire events in central Portugal in October 2017. *International Journal of Wildland Fire*, 31(11), 989–1001. <https://doi.org/10.1071/WF21097>
- Fernandes, P., Loureiro, C., & Fernandes, M. (2009). Modelos de Combustível Florestal para Portugal. 6^o *Congresso Florestal Nacional, January*, 348–354.
- Fernandes, P. M., Botelho, H., Rego, F., & Loureiro, C. (2008). Using fuel and weather variables to predict the sustainability of surface fire spread in maritime pine stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(2), 190–201. <https://doi.org/10.1139/X07-159>
- Finney, M. A. (2006). An Overview of FlamMap Fire Modeling Capabilities. *Fuels Management - How to Measure Success: Conference Proceedings*, 213–220.
- FIREURISK project (2024). *D3.5 New Dimensions of future fire regimes, extremes and new fire-prone*

areas, to be released

- FUELMAP Project. (2011). *Final Classification and Mapping of EU Fuel Complexes. Deliverable 2.* FUELMAP Project: Development of a European Fuel Map Based on a Novel Classification Suited to EU Environments -The Fuelmap Project.
- Fulton, M. (2024). Electricity pole sparks 'scary' wildfire which spread for five miles. STV News, January 29th 2024. <https://news.stv.tv/highlands-islands/lochinver-wildfire-raged-for-five-miles-in-just-three-hours-after-damage-to-power-line-amid-high-winds> [Verified February 23rd 2024]
- Ganteaume, A., Barbero, R., Jappiot, M., & Maillé, E. (2021). Understanding future changes to fires in southern Europe and their impacts on the wildland-urban interface. *Journal of Safety Science and Resilience*, 2(1), 20-29. ISSN 2666-4496. doi: 10.1016/j.jnlssr.2021.01.001.
- Gill, P., Martin, R. V. (2015). Smoke inhalation injury. *BJA Education*. 15(3):143-8.
- Gleason, P. (1991). LCES - a key to safety in the wildland fire environment. *Fire Management Notes*, 52(4).
- Green, L. R., & Schimke, H. E. (1971). *Guides for fuel-breaks in the Sierra Nevada mixed-conifer type.*
- Haikerwal, A., Akram, M., Sim, M. R., Meyer, M., Abramson, M. J., Dennekamp, M. (2016). Fine particulate matter (PM_{2.5}) exposure during a prolonged wildfire period and emergency department visits for asthma. *Respirology* 21, 88–94. <https://doi.org/10.1111/resp.12613>
- Haponik, E. F., Munster, A. M. (1990). *Respiratory injury: smoke inhalation and burns.* New York: McGraw-Hill, Health Professions Division.
- Herndon, D. N. (2018). *Total Burn Care (Fifth Edition)*, Elsevier, ISBN 9780323476614.
- Hornby, L. G. (1936). *Fire control planning in the Northern Rocky Mountain Region.*
- IAFC. (2016). *Rules of Engagement for Firefighter Survival (training poster).* International Association of Fire Chiefs (United States Safety, Health and Survival Section). http://iafcsafety.org/image/ROE_Poster.pdf
- Ichoku, C., Ellison, L. (2014). Global top-down smoke-aerosol emissions estimation using satellite fire radiative power measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14, 6643–6667. doi:10.5194/acp-14-6643-2014.
- ISBI Practice Guidelines Committee; Steering Subcommittee; Advisory Subcommittee. *ISBI Practice Guidelines for Burn Care.* *Burns*. 2016 Aug;42(5):953-1021.
- Johnston, F. H., Henderson, S. B., Chen, Y., Randerson, J. T., Marlier, M., DeFries, R. S., Kinney, P., Bowman, D. M. J. S., Brauer, M. (2012). Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. *Environmental Health Perspectives* 120, 695–701. doi:10.1289/ehp.1104422.
- Jones, Matthew W., John T. Abatzoglou, Sander Veraverbeke, Niels Andela, Gitta Lasslop, Matthias Forkel, Adam J. P. Smith, et al. 2022. 'Global and Regional Trends and Drivers of Fire Under Climate Change'. *Reviews of Geophysics* 60 (3): e2020RG000726. <https://doi.org/10.1029/2020RG000726>.
- Kaiser, J. W., Heil, A., Andreae, M. O., Benedetti, A., Chubarova, N., Jones, L., Morcrette, J. J., Razinger, M., Schultz, M. G., Suttie, M., Van Der Werf, G. R. (2012). Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. *Biogeosciences* 9, 527–554. doi:10.5194/bg-9-527-2012.
- Keywood, M., Cope, M., Meyer, C. P. M., Iinuma, Y., Emmerson, K. (2015). When smoke comes to town: The impact of biomass burning smoke on air quality. *Atmospheric Environment* 121, 13–21. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.03.050.

- Kunisaki, T., Godwin, S. A. (2013). Smoke Inhalation (Cap. 136). In: *Emergency Medicine: Clinical Essentials*. 2nd Ed. Ed: Adams J. G., Elsevier Saunders, Philadelphia. pp. 1178-1181.
- Lafferty, K.A. Smoke Inhalation Injury 2018. Available from: <https://emedicine.medscape.com/article/771194-overview#a3>. (consulted September 2022).
- Lahaye, S., Miralles, M., Garcia, C., Pages, J., Gallardo, C., Fresu, G., Goldammer, J. G., Pronto, L., Schneider, I., & Oslejsek, P. (2018a). *Fire-In D1.2 Report on current and future common capability challenges (CCCs and FCCCs) #1. Fire-In European project*.
- Lahaye, S., Curt, T., Fréjaville, T., Sharples, J., Paradis, L., & Hély, C. (2018b). What are the drivers of dangerous fires in Mediterranean France? *International Journal of Wildland Fire*, 27(3), 155. <https://doi.org/10.1071/WF17087>
- Lahaye, S., Sharples, J., Hély, C., & Curt, T. (2018c). Toward safer firefighting strategies and tactics. In D. X. Viegas (Ed.), *Advances in forest fire research 2018* (pp. 1311–1316). Imprensa da Universidade de Coimbra. https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_166
- Lahaye, S., Sharples, J., Matthews, S., Heemstra, S., Price, O., & Badlan, R. (2018d). How do weather and terrain contribute to firefighter entrapments in Australia? *International Journal of Wildland Fire*, 27(2), 85–98. <https://doi.org/10.1071/WF17114>
- Lobert, J., Warnatz, J. (1993). Emissions from the combustion process in vegetation. In P. Crutzen e J. Goldammer - *Fire in the environment. The ecological atmospheric, and climatic importance of vegetation fires*. Chichester, England: John Wiley and Sons, pp. 15–38.
- Lopes, S., Viegas, X. D., Teixeira, L. L., & Viegas, M. T. (2014). Equilibrium moisture content and timelag of dead *Pinus pinaster* needles. *International Journal of Wildland Fire*, 23, 721–732. <https://doi.org/https://doi.org/10.1071/WF13084>
- Martins, V., Miranda, A. I., Carvalho, A., Schaap, M., Borrego, C., Sá, E. (2012). Impact of forest fires on particulate matter and ozone levels during the 2003, 2004 and 2005 fire seasons in Portugal. *Science of the Total Environment* 414, 53–62. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.10.007.
- Mayer, C., Mayr, S., Müller, M. M., Vacik, H., Vilà-Vilardell, L., Carrega, P., Duché, Y., & Lahaye, S. (2020). FOREST FIRES IN THE ALPS State of knowledge, future challenges and options for an integrated fire management. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:221758393>
- McArdle, R. E. (1957). Standard fire fighting orders. *Fire Control Notes*, 18(4), 151.
- McArthur, A. G. (1967). *Fire behaviour in eucalyptus forests*. Forest Research Institute, Forestry and Timber Bureau.
- MCFIRE/ADAI. (2022). *Consulta de medições da humidade de combustíveis*.
- Miranda, A. I. (2004). An integrated numerical system to estimate air quality effects of forest fires. *International Journal of Wildland Fire*, 13(2), 217. <https://doi.org/10.1071/WF02047>
- Miranda, A. I., Borrego, C., Viegas, D. (1994). Forest fire effects on the air quality. In 'Air pollution II, computer simulation'. (Eds JM Baldasano, CABrebbia, HPower, P Zannetti) pp. 191–199. (Computational Mechanics Publications: Southampton, UK)
- Miranda, A. I., Borrego, C., Martins, H., Martins, V., Amorim, J. H., Valente, J., Carvalho, A. (2009). Forest Fire Emissions and Air Pollution in Southern Europe. 'Earth Obs. Wildl. Fires Mediterr. Ecosyst.' (Ed E Chuvieco) pp. 171–187. (Springer: Berlin, Heidelberg) doi:10.1007/978-3-642-01754-4_12.
- Miranda, A. I., Ferreira, J., Valente, J., Santos, P., Amorim, J. H., Borrego, C. (2005). Smoke measurements during Gestosa-2002 experimental field fires. *International Journal of Wildland Fire*

- 14, 107–116. doi:10.1071/WF04069.
- Miranda, A. I., Martins, V., Cascão, P., Amorim, J. H., Valente, J., Tavares, R., Borrego, C., Tchepel, O., Ferreira, A. J., Cordeiro, C. R., Viegas, D. X., Ribeiro, L. M., Pita, L. P. (2010). Monitoring of firefighters exposure to smoke during fire experiments in Portugal. *Environment International* 36, 736–745. doi:10.1016/j.envint.2010.05.009.
- Miranda, A. I., Martins, V., Casco, P., Amorim, J. H., Valente, J., Borrego, C., Ferreira, A. J., Cordeiro, C. R., Viegas, D. X., Ottmar, R. (2012). Wildland smoke exposure values and exhaled breath indicators in firefighters. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues* 75, 831–843. doi:10.1080/15287394.2012.690686.
- Monteiro, A., Corti, P., San Miguel-Ayanz, J., Miranda, A. I., Borrego, C. (2013). The EFFIS forest fire atmospheric emission model: Application to a major fire event in Portugal. *Atmospheric Environment* 84, 355–362. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.11.059.
- Morton, R. D., Marston, C. G., O’Neil, A. W., Rowland, C. S. (2020). Land Cover Map 2018 (20m classified pixels, GB). NERC Environmental Information Data Centre. Available at <https://doi.org/10.5285/b3dfc4c7-c9bd-4a02-bed8-46b2a41be04a> [Verified 23 February 2024]
- Nguyen, H. M., He, J., Wooster, M. (2023). Biomass burning CO, PM and fuel consumption per unit burned area estimates derived across Africa using geostationary SEVIRI fire radiative power and Sentinel-5P CO data. *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 2089–2118, doi.org/10.5194/acp-23-2089-2023.
- Niklasson, M. & Granström, A. (2000). Numbers and sizes of fires: long-term spatially explicit fire history in a Swedish boreal landscape. *Ecology*, 81(6), 1484-1499.
- NWCG. (2021a). *Fire Behavior Field Reference Guide. PMS 437.*
- NWCG. (2021b). *Fuel Moisture Sampling.* National Wildfire Coordinating Group (NWCG).
- NWCG. (2022). *NWCG Incident Response Pocket Guide (IRPG), PMS 461* (Issue January). National Wildfire Coordinating Group. <https://www.nifc.gov/standards/guides/red-book>
- Osswald, T., Gama, C., Fernandes, A. P., Lopes, D., Varela, V., Miranda, A. I. (2023). Effects of the wildfires in August 2021 on the air quality of Athens through a numerical simulation. *International Journal of Wildland Fire*. 32. 10.1071/WF22148.
- Ottmar, R., Miranda, A. I., Sandberg, D. (2009). Characterizing Sources of Emissions from Wildland Fires. In A. Bytnerowicz, M. Arbaugh, A. Riebau, C. Andersen - Wildland fires and air pollution. *Developments in Environmental Science, Vol 8, Chapter 3.* Amsterdam: Elsevier, pp. 61-78.
- Page, W. G., & Butler, B. W. (2017). An empirically based approach to defining wildland firefighter safety and survival zone separation distances. *International Journal of Wildland Fire*, 26(8), 655–667. <https://doi.org/10.1071/WF16213>
- Patrick, B. (2009). Photo Guide for Estimating Fuel Loading and Fire Behavior in Mixed-Oak Forests of the Mid-Atlantic Region. *General Technical Report, NRS-45.* <https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-45>
- Pausas, J. G., Keeley, J. E., & Schwilk, D. W. (2017). Flammability as an ecological and evolutionary driver. *Journal of Ecology*, 105(2), 289–297. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12691>
- Peterson, J. 1987. Analysis and reduction of the errors of predicting prescribed burn emissions. Thesis. Seattle: University of Washington. 70 p.
- Pinto, P., Silva, Á. P., Viegas, D. X., Almeida, M., Raposo, J., Ribeiro, L. M. (2022). Influence of convectively driven flows in the course of a large fire in Portugal: the case of Pedrógão Grande. *Atmosphere* 13, 414. doi:10.3390/atmos13030414
- PROMETHEUS Project. (2000). *Management techniques for optimization of suppression and*

minimization of wildfire effects. System Validation. European Commission - Contract number ENV4-CT98-0716.

- Pyne, S. J., Andrews, P. L., & Laven, R. D. (1996). *Introduction to Wildland Fire*. Wiley, New York (USA).
- Raposo, J. R., Cabiddu, S., Viegas, D. X., Salis, M., & Sharples, J. (2015). Experimental analysis of fire spread across a two-dimensional ridge under wind conditions. *International Journal of Wildland Fire*, 24(7), 1008. <https://doi.org/10.1071/WF14150>
- Raposo, J. R., Viegas, D. X., Xie, X., Almeida, M., Figueiredo, A. R., Porto, L., & Sharples, J. (2018). Analysis of the physical processes associated with junction fires at laboratory and field scales. *International Journal of Wildland Fire*, 27(1), 52. <https://doi.org/10.1071/WF16173>
- Rea, G., Paton-Walsh, C., Turquety, S., Cope, M., Griffith, D. (2016). Impact of the New South Wales Fires during October 2013 on regional air quality in eastern Australia. *Atmospheric Environment*, 131, 150-163. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.01.034>.
- Rego, F. C., Morgan, P., Fernandes, P., & Hoffman, C. (2021). Fire Science. In *Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-69815-7>
- Reid, C. E., Brauer, M., Johnston, F. H., Jerrett, M., Balmes, J. R., Elliott, C. T. (2016). Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure. *Environmental Health Perspectives* 124, 1334–1343. doi:10.1289/ehp.1409277.
- Rehberg, S., Maybauer, M. O., Enkhbaatar, P., Maybauer, D. M., Yamamoto, Y., Traber, D. L. (2009). Pathophysiology, management and treatment of smoke inhalation injury. Expert review of respiratory medicine. 3(3):283-97.
- Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., Palacios-Orueta, A., & Bastarrika, A. (2002). Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(8), 1301–1315. <https://doi.org/10.1139/x02-052>
- Ribeiro, C., Xavier Viegas, D., Raposo, J., Reis, L., & Sharples, J. (2023). Slope effect on junction fire with two non-symmetric fire fronts. *International Journal of Wildland Fire*, 32(3), 328–335. <https://doi.org/10.1071/WF22152>
- Ribeiro, L. (2011). Interface Urbano-Florestal. In D. X. Viegas (Ed.), *Incêndios Florestais*. Verlag Dasshöfer.
- Ribeiro, L. M., & Almeida, M. (2020). *Report on real scale experiments. Deliverable D2.1. Wuiview Project*.
- Ribeiro, L. M., Rodrigues, A., Lucas, D., & Viegas, D. X. (2020). The Impact on Structures of the Pedrógão Grande Fire Complex in June 2017 (Portugal). *Fire*, 3(4), 57. <https://doi.org/10.3390/fire3040057>
- Ribeiro, L. M., Viegas, D. X., Almeida, M., Alves, D., Barbosa, T., & Modarres, M. (2021). *Planeamento da gestão de combustíveis: Efeito da distância e da frequência das limpezas na proteção das estruturas e rede viária*. ForestWISE (Coord.) - Projetos AGIF 2021 (P32100231). Vila Real, 160p. https://www.agif.pt/app/uploads/2022/07/Relatório-Projeto-Distancia-e-frequencia-de-intervenções_FW_final_06072022.pdf
- Ribeiro, L. M., Viegas, D. X., Almeida, M., McGee, T. K., Pereira, M. G., Parente, J., Xanthopoulos, G., Leone, V., Delogu, G. M., & Hardin, H. (2020). Extreme wildfires and disasters around the world: lessons to be learned. In F. Tedim, V. Leone, & T. McGee (Eds.), *Extreme Wildfire Events and Disasters* (pp. 31–51). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815721-3.00002-3>
- Rorison, D. G., McPherson, S. J. (1992). Acute toxic inhalations. *Emergency medicine clinics of North*

- America. 10(2):409-35.
- Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. Research Paper INT-115. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Schroeder, M. J., & Buck, C. C. (1970). Fire Weather : A Guide for Application of Meteorological Information to Forest Fire Control Operations. In *USDA Forest Service, Agriculture Handbook 360*.
- Scott, J. H., & Burgan, R. E. (2005). Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. In *USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR: Vol. RMRS-GTR-1* (Issues 153 RMRS-GTR). <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-153>
- Sebastião, R., Sorte, S., Valente, J., Miranda, A. I., Fernandes, J. M. (2019). Detecting changes in the heart rate of firefighters to prevent smoke inhalation and health effects. *Evol. Syst.* 10, 295–304. <https://doi.org/10.1007/s12530-018-9241-0>
- Sharples, J. J., McRae, R. H. D., & Wilkes, S. R. (2012). Wind-terrain effects on the propagation of wildfires in rugged terrain: Fire channelling. *International Journal of Wildland Fire*, 21(3), 282–296. <https://doi.org/10.1071/WF10055>
- Sharples, J., Towers, I., Wheeler, G., Wheeler, V., & McCoy, J. (2013). Modelling fire line merging using plane curvature flow. *20th International Congress on Modelling and Simulation*, 256–262.
- Sjöström, J. & Granström, A. (2023a). Human activity and demographics drive the fire regime in a highly developed European boreal region. *Fire Safety Journal*, 136, 103743. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103743>
- Sjöström, J., & Granström, A. (2023b). A phenology-driven fire danger index for northern grasslands. *International journal of wildland fire*, 32, 1332-1346.
- Sjöström, J. & Granström, A. (2024). Analys av 160 års brandväder i Sverige: Skogsbrandsrisken sedan 1860 för nio lokaler. MSB2300. (Swedish Civil Contingencies Agency, Karlstad). ISBN 978-91-7927-468-9 (In Swedish)
- Sofiev, M., Vankevich, R., Lotjonen, M., Prank, M., Petukhov, V., Ermakova, T., Koskinen, J., Kukkonen, J. (2009). An operational system for the assimilation of the satellite information on wild-land fires for the needs of air quality modelling and forecasting. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9, 6833–6847. doi:10.5194/acp-9-6833-2009.
- Spinou, A., Koulouris, N. G. (2018) .Current clinical management of smoke inhalation injuries: a reality check. *The European respiratory journal* ; 52(6).
- Stec, A., Hull, T. R. (2010)., *Fire Toxicity*. 1st Ed. Woodhead Publishing Limited. Cambridge.
- Thomas, C., Sharples, J., & Evans, J. (2017). Modelling the dynamic behaviour of junction fires with a coupled atmosphere–fire model. *International Journal of Wildland Fire*, 26, 331. <https://doi.org/10.1071/WF16079>
- Thorburn, R. W., & Alexander, M. E. (2001). LACES versus LCES: adopting an “A” for “anchor points” to improve wildland firefighter safety. In Association of Wildland Fire (Ed.), *Proceedings of the 2001 International Wildland Fire Safety Summit* (p. 10). Association of Wildland Fire.
- Toon, M. H., Maybauer, M. O., Greenwood, J. E., Maybauer, D. M., Fraser, J. F. (2010). Management of acute smoke inhalation injury. *Critical care and resuscitation : journal of the Australasian Academy of Critical Care Medicine* ; 12(1):53-61.
- Turquety, S., Menut, L., Siour, G., Mailler, S., Hadji-lazaro, J., George, M., Clerbaux, C., Hurtmans, D.,

- Coheur, P. F. (2020). APIFLAME v2.0 biomass burning emissions model: impact of refined input parameters on atmospheric concentration in Portugal in summer 2016. *Geoscientific Model Development*, 13(7), 2981–3009. doi.org/10.5194/gmd-13-2981-2020
- Urbanski, S. P. (2013). Combustion efficiency and emission factors for wildfire-season fires in mixed conifer forests of the northern Rocky Mountains, US. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 7241–7262. doi:10.5194/acp-13-7241-2013.
- USDA/Forest Service. (2023). *National Fire Danger Rating System*.
- USDA Forest Service. (1957). *Report of Task Force to Recommend Action to Reduce the Chances of Firefighters Being Killed by Burning While Fighting Fire*.
https://www.fs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb5393525.pdf
- UNISDR. (2009). UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction. In *United Nations International Strategy for Disaster Reduction*. <https://doi.org/10.1021/cen-v064n005.p003>
- Valente, J., Miranda, A. I., Lopes, A. G., Borrego, C., Viegas, D. X., Lopes, M. (2007). Local-scale modelling system to simulate smoke dispersion. *International Journal of Wildland Fire* 16, 196–203. doi:10.1071/WF06085.
- van der Kamp, D. W., Moore, R. D., & McKendry, I. G. (2017). A model for simulating the moisture content of standardized fuel sticks of various sizes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 236, 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.01.013>
- Van Der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Mu, M., Kasibhatla, P. S., Morton, D. C., Defries, R. S., Jin, Y., Van Leeuwen, T. T. (2010). Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). *Atmospheric Chemistry and Physics* 10, 11707–11735. doi:10.5194/acp-10-11707-2010.
- Van Wagner, C. E. (1977). Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research*, 7(1), 23–34. <https://doi.org/10.1139/x77-004>
- Van Wagner, C. E. (1987). Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. In *Forestry*. <https://doi.org/19927>
- Vermina Plathner, F., Sjöström, J., & Granström, A. (2022). Influence of tree species on surface fuel structure in Swedish forests. *Advances in Forest Fire Research*, 14–18.
- Vermina Plathner, F., Sjöström, J., & Granström, A. (2023). Garden structure is critical for building survival in northern forest fires—An analysis using large Swedish wildfires. *Safety science*, 157, 105928.
- Vicente, A., Alves, C., Monteiro, C., Nunes, T., Mirante, F., Cerqueira, M., Calvo, A., Pio, C. (2012). Organic speciation of aerosols from wildfires in central Portugal during summer 2009. *Atmospheric Environment* 57, 186–196. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.04.030.
- Vicente, A., Calvo, A., Fernandes, A. P., Nunes, T., Monteiro, C., Pio, C., Alves, C. (2017). Hydrocarbons in particulate samples from wildfire events in central Portugal in summer 2010. *Journal of Environmental Sciences (China)* 53, 122–131. doi:10.1016/j.jes.2016.02.022.
- Viegas, D., & Viegas, M. (1994). 1994 - Viegas_Relationship between rainfall burne.pdf. *International Journal of Wildland Fire*, 4(1), 11–16.
- Viegas, D. X. (2004). A Mathematical Model For Forest Fires Blowup. *Combustion Science and Technology*, 177(1), 27–51. <https://doi.org/10.1080/00102200590883624>
- Viegas, D. X. (2004). *Cercados pelo Fogo*. (in Portuguese), Minerva Editora. Coimbra, Portugal.

- Viegas, D. X. (2006). Parametric study of an eruptive fire behaviour model. *International Journal of Wildland Fire*, 15(2), 169. <https://doi.org/10.1071/WF05050>
- Viegas, D. X. (2009). *Cercados pelo Fogo, Parte 2*. (in Portuguese), Minerva Editora. Coimbra, Portugal.
- Viegas, D. X. (2013). *Cercados pelo Fogo em Armamar. O Acidente de Armamar em 8 de setembro de 1985*. (in Portuguese), Ediliber. Coimbra, Portugal.
- Viegas, D. X. (2017). *Cercados pelo Fogo em Águeda - Relato do acidente ocorrido em Águeda em 14 de junho de 1986* (P. (in Portuguese), FIG – Indústrias Gráficas, SA., Coimbra (ed.)).
- Viegas, D. X., Almeida, M. A., Ribeiro, L. M., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Rodrigues, A., Ribeiro, C., Lopes, S., Jorge, H., & Viegas, C. X. (2019). *Análise dos Incêndios Florestais Ocorridos a 15 de outubro de 2017*. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA). Coimbra, Portugal. <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc21/comunicacao/documento?i=analise-dos-incendios-florestais-ocorridos-a-15-de-outubro-de-2017>
- Viegas, D. X., Almeida, M. F., Ribeiro, L. M., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Jorge, H., Rodrigues, A., Lucas, D., Lopes, S., & Silva, L. F. (2017). *O complexo de incêndios de Pedrógão Grande e concelhos limítrofes, iniciado a 17 de junho de 2017*. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA).
- Viegas, D. X., Almeida, M., Raposo, J., Oliveira, R., & Viegas, C. X. (2014). Ignition of Mediterranean Fuel Beds by Several Types of Firebrands. *Fire Technology*, 50(1), 61–77. <https://doi.org/10.1007/s10694-012-0267-8>
- Viegas, D. X. D., Bovio, G., Ferreira, A., Nosenzo, A., & Sol, B. (1999). Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe. *International Journal of Wildland Fire*, 9(4), 235–246. <https://doi.org/10.1071/WF00015>
- Viegas, D. X. D., & Pita, L. L. P. (2004). Fire spread in canyons. *International Journal of Wildland Fire*, 13(3), 253–274. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1071/wf03050>
- Viegas, D. X. F. C., Raposo, J. R. N., Ribeiro, C. F. M., Reis, L. C. D., Abouali, A., & Viegas, C. X. P. (2021). On the non-monotonic behaviour of fire spread. *International Journal of Wildland Fire*, 30(9), 702–719. <https://doi.org/10.1071/WF21016>
- Viegas, D. X., Figueiredo Almeida, M., Ribeiro, L. M., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Jorge, H., Rodrigues, A., Lucas, D., Lopes, S., Silva, L. F., Almeida, M. F., Ribeiro, L. M., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., ... Silva, L. F. (2017). *O complexo de incêndios de Pedrógão Grande e concelhos limítrofes, iniciado a 17 de junho de 2017* (Vol. 2017). Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA). Coimbra, Portugal. <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc21/comunicacao/documento?i=o-complexo-de-incendios-de-pedrogao-grande-e-concelhos-limitrofes-iniciado-a-17-de-junho-de-2017>
- Viegas, D. X., Pita, L. P., Ribeiro, L. M., & Palheiro, P. (2005). Eruptive Fire Behaviour in Past Fatal Accidents. *Eighth International Wildland Fire Safety Summit, April 26-28, 2005 Missoula, MT.*, 1–8.
- Viegas, D. X., Raposo, J. R., Davim, D. A., & Rossa, C. G. (2012). Study of the jump fire produced by the interaction of two oblique fire fronts. Part 1. Analytical model and validation with no-slope laboratory experiments. *International Journal of Wildland Fire*, 21(7), 843–856. <https://doi.org/10.1071/WF10155>
- Viegas, D. X., Reis, R. M., Cruz, M. G., Viegas, M. T., Doutoramento, B. De, Silvicultura, E., Coimbra, U. De, Engenharia, D. De, & De, P. (2004). Calibração do Sistema Canadano de Perigo de Incêndio

- para Aplicação em Portugal. *Silva Lusitana*, 12(1), 77–93.
<http://www.scielo.oces.mctes.pt/pdf/slu/v12n1/12n1a07.pdf>
- Viegas, D. X., Ribeiro, L. M., Almeida, M. A., Oliveira, R., Viegas, M. T. P., Raposo, J. R., Reva, V., Figueiredo, A. R., & Lopes, S. (2013). *Os grandes incêndios florestais e os acidentes mortais ocorridos em 2013*. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA).
https://www.historico.portugal.gov.pt/media/1281135/Relatório_IF2013_parte1.pdf
- Viegas, D. X., Ribeiro, L. M., Gabbert, W., Viegas, M. T., Figueiredo, A. R., Oliveira, R., Reva, V., Raposo, J. R., & Almeida, M. A. (2012). *Relatório do Incêndio Florestal de Tavira/São Brás de Alportel, 18 a 22 de Julho de 2012*. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA).
https://www.historico.portugal.gov.pt/media/730414/rel_incendio_florestal_tavira_jul2012.pdf
- Viegas, D. X., Silva, A. M., & Cruz, M. G. (2001). Analysis of Three Fatal Accidents Involving Portuguese Firefighters. *Proc. 2001 Fire Safety Summit, Edmonton, Canada*.
- Viegas, D. X., & Simeoni, A. (2011). Eruptive Behaviour of Forest Fires. *Fire Technology*, 47(2), 303–320.
<https://doi.org/10.1007/s10694-010-0193-6>
- Viegas, D. X., Soares, J., & Almeida, M. (2013). Combustibility of a mixture of live and dead fuel components. *International Journal of Wildland Fire*, 22(7), 992–1002.
<https://doi.org/10.1071/WF12031>
- Viegas, D. X., Stipanicev, D., Ribeiro, L., Pita, L. P., & Rossa, C. (2008). The Kornati fire accident – eruptive fire in relatively low fuel load herbaceous fuel conditions. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 119, 365–375. <https://doi.org/10.2495/FIVA080361>
- Viney, N. R. (1991). A review of fine fuel moisture modelling. *International Journal of Wildland Fire*, 1(4), 215–234. <https://doi.org/10.1071/WF9910215>
- Walker, P. F., Buehner, M. F., Wood, L. A., Boyer, N. L., Driscoll, I. R., Lundy, J. B., et al. (2015). Diagnosis and management of inhalation injury: an updated review. *Critical care*. 19:351.
- Zikeloglou, I., Lekkas, E., Lozios, S., Stavropoulou, M. (2023). Is early evacuation the best and only strategy to protect and mitigate the effects of forest fires in WUI areas? A qualitative research on the residents' response during the 2021 forest fires in NE Attica, Greece. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103612>.
- Zimmerman, T. (2020). Watch Out Situations. In S. L. Manzello (Ed.), *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (pp. 1051–1054). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_262
- Zimmerman, T., & Parkinson, T. (2020). Standard Firefighting Orders. In *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (Vol. 21, Issue 5, pp. 958–962). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_221