

Propagacijski potencijal kod proračuna FirEUrisk požarnog rizika



2025.

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

Propagacijski potencijal kod proračuna FirEURisk požarnog rizika

Identifikator dokumenta:	Diseminacija rezultata projekta FirEURisk za području Republike Hrvatske.
Rok za izradu dokumenta:	31/03/2025
Datum izrade dokumenta:	01/03/2025
Verzija:	1.0
Glavni dokument:	D1.1 – Report on methodological frameworks for each danger modelling process
Autor glavnog dokumenta i glavni partner ovih istraživanja:	Fermín Alcasena, Elena Aragonese, Vadim Bogomolov, Marin Bugarić, David Caballero, Emilio Chuvieco, Àngel Cunill Camprubí, Mariano García, Pere Joan Gelabert, Adrián Jimenez-Ruano, Ana Miranda, Diogo Lopes, Viktor Myroniuk, Clara Ochoa Velez, Nadia Politi, Carlos Prado, Michele Salis, Victor Resco de Dios, Luis Mario Ribeiro, Marcos Rodrigues, Ángela Rivera, Thanasis Sfetsos, Darko Stipaničev, Luis Torres, Mandy Vlachogianni, Sergiy Zibtsev, Cristina Vega-Garcia
Prijevod, obrada karata i prilagodba za Hrvatsku:	Darko Stipaničev, Marin Bugarić, Damir Krstinić, Ljiljana Šerić, Maja Braović Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, Split, Hrvatska
Radni paket:	WP1 - Procjena rizika od požara radi poboljšanja zaštite
Zadatak:	Zadatak 1.1: Procjena rizika od požara Aktivnost A1.1.5. Propagacijski potencijal
Razina širenja:	☒ PU: Javno ☐ 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

Propagation potential in calculation of FirEURisk wildfire risk

Deliverable Identifier:	FirEURisk dissemination documents for the territory of the Republic of Croatia
Deliverable Due Date:	31/03/2025
Deliverable Submission Date:	01/03/2025
Deliverable Version:	1.0
Main Document:	D1.1 – Report on methodological frameworks for each danger modelling process
Author of Main Deliverable and Lead Partner of this work:	Fermín Alcasena, Elena Aragoneses, Vadim Bogomolov, Marin Bugarić, David Caballero, Emilio Chuvieco, Àngel Cunill Camprubí, Mariano García, Pere Joan Gelabert, Adrián Jimenez-Ruano, Ana Miranda, Diogo Lopes, Viktor Myroniuk, Clara Ochoa Velez, Nadia Politi, Carlos Prado, Michele Salis, Victor Resco de Dios, Luis Mario Ribeiro, Marcos Rodrigues, Ángela Rivera, Thanasis Sfetsos, Darko Stipaničev, Luis Torres, Mandy Vlachogianni, Sergiy Zibtsev, Cristina Vega-Garcia
Translation, Map preparation and Adaptation for Croatia:	Darko Stipaničev, Marin Bugarić, Damir Krstinić, Ljiljana Šerić, Maja Braović Faculty of Electrical Engineering, Machine Engineering and Naval Architecture, University of Split, Split, Croatia
Work Package:	WP1 - Fire risk assessment to improve prevention
Task:	Task 1.1 Fire Danger Assessment A1.1.5 Propagation potential
Dissemination Level:	☒ PU: Public ☐ CO: Confidential, only for members of the Consortium (including the Commission Services)



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 kojeg drugog razloga 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 i korištenje svih materijala je dopušteno uz navođenje izvora:

Stipaničev, D., Bugarić, M., Krstinić, D., Šerić, Lj., Braović, M. (2025.) **Propagacijski potencijal kod proračuna FirEURisk požarnog rizika**, FirEURisk Dissemination Report, 2025. <https://cipop.fesb.hr/index.php/fireurisk/propagacijski-potencijal-kod-proracuna-fireurisk-pozarnog-rizika>

xxx



Sažetak

Ovaj dokument je nastao na temelju istraživanja provedenih u Radnom paketu 1 projekta FirEUrisk Zadatku 1.1. posvećenom procjeni rizika od požara, aktivnosti 1.1.5. **Propagation potential** koja se bavila analizom propagacijskog potencijala na razini cijele Europe u rezoluciji 1km i na razini pilot područja u rezoluciji 100m. Rezultati su objavljeni u FirEUrisk izvještajima:

Marin Bugarić, Fermin Alcasena, Marcos Rodrigues Mimbbrero, Darko Stipaničev (2023.) **D1.1.5 - Del.1 Propagation potential - calculation methodology for Pilot Sites (PS)**, FirEUrisk Internal Report, 2023.

Darko Stipaničev, Marin Bugarić, Luis Torres, David Caballero, Emilio Chuveco, (2023.) **D1.1.5 - Del.2 Propagation potential for Europe Territory**, FirEUrisk Internal Report, 2023.

Darko Stipaničev, Elena Aragoneses, Marin Bugarić, Emilio Chuveco (2023.) **D1.1.5 - Del.3 Propagation potential - Crown Fire Indicators for Europe Territory (ET)**, FirEUrisk Internal Report, 2023.

objedinjenih u konačnom službenom FirEUrisk izvještaju:

Fermín Alcasena, Elena Aragoneses, Vadim Bogomolov, Marin Bugarić, David Caballero, Emilio Chuvieco, Àngel Cunill Camprubí, Mariano García, Pere Joan Gelabert, Adrián Jimenez-Ruano, Ana Miranda, Diogo Lopes, Viktor Myroniuk, Clara Ochoa Velez, Nadia Politi, Carlos Prado, Michele Salis, Victor Resco de Dios, Luis Mario Ribeiro, Marcos Rodrigues, Ángela Rivera, Thanasis Sfetsos, Darko Stipaničev, Luis Torres, Mandy Vlachogianni, Sergiy Zibtsev, Cristina Vega-Garcia, (2023.) **D1.1 – Report on methodological frameworks for each danger modelling process**, FirEUrisk Report, 2023.

U okviru ovih istraživanja istraživači s FESB-a koji su bili zadužen za proračun propagacijskog potencijala požara proveli su pilot istraživanje na razini našeg demonstracijskog područja (DA20 - Splitsko-dalmatinske županije) koja su kasnije proširena na razinu cijele Europe i FirEUrisk pilot područja. Rezultati su prezentirani u radu:

(Stipaničev et al., 2024.) Stipaničev, D., Bugarić, M., Božić Štulić, D., Šerić, Lji., Krstinić, D., **Wildfire propagation potential for Split-Dalmatian County in Croatia**, Proceedings for the 7th International Fire Behavior and Fuels Conference, April 15-19, 2024, Boise, Idaho, USA – Tralee, Ireland – Canberra, Australia, Published by the International Association of Wildland Fire, Missoula, Montana, USA

U ovom izvještaju prenosimo najvažnije dijelove ovih istraživanja, na temelju kojih smo izradili i karte propagacijskog potencijala za područje Hrvatske, koje uz ovaj izvještaj također objavljujemo.

Svi materijali se mogu slobodno koristiti uz navođenje izvora u skladu s Copyrightom.

Abstract

This document is based on research conducted within Work Package 1 of the FirEURisk project, specifically Task 1.1, dedicated to fire risk assessment, and Activity 1.1.5 – Propagation Potential, which focused on analyzing fire propagation potential at the European scale (1 km resolution) and at the pilot site level (100 m resolution). The results have been published in the internal FirEURisk reports:

Marin Bugarić, Fermin Alcasena, Marcos Rodrigues Mimbbrero, Darko Stipaničev (2023.) **D1.1.5 - Del.1 Propagation potential - calculation methodology for Pilot Sites (PS)**, FirEURisk Internal Report, 2023.

Darko Stipaničev, Marin Bugarić, Luis Torres, David Caballero, Emilio Chuveco, (2023.) **D1.1.5 - Del.2 Propagation potential for Europe Territory (ET)**, FirEURisk Internal Report, 2023.

These reports are consolidated in the final official FirEURisk report:

Fermín Alcasena, Elena Aragoneses, Vadim Bogomolov, Marin Bugarić, David Caballero, Emilio Chuvieco, Àngel Cunill Camprubí, Mariano García, Pere Joan Gelabert, Adrián Jimenez-Ruano, Ana Miranda, Diogo Lopes, Viktor Myroniuk, Clara Ochoa Velez, Nadia Politi, Carlos Prado, Michele Salis, Victor Resco de Dios, Luis Mario Ribeiro, Marcos Rodrigues, Ángela Rivera, Thanasis Sfetsos, Darko Stipaničev, Luis Torres, Mandy Vlachogianni, Sergiy Zibtsev, Cristina Vega-Garcia, (2023.) **D1.1 – Report on methodological frameworks for each danger modelling process**, FirEURisk Report, 2023.

Within this research, the FESB research team, responsible for fire propagation potential calculations, conducted a pilot study for our demonstration area (DA20 - Split-Dalmatia County). This study was later expanded to the entire European territory and FirEURisk pilot sites. The results were presented in the following paper:

(Stipaničev et al. (2024) – Stipaničev, D., Bugarić, M., Božić Štulić, D., Šerić, Lj., Krstinić, D., **Wildfire propagation potential for Split-Dalmatian County in Croatia**, Proceedings for the 7th International Fire Behavior and Fuels Conference, April 15-19, 2024, Boise, Idaho, USA – Tralee, Ireland – Canberra, Australia, Published by the International Association of Wildland Fire, Missoula, Montana, USA.

This report presents the key findings from these studies, which were used to develop fire propagation potential maps for Croatia, also published alongside this report.

All materials can be freely used with proper attribution in accordance with Copyright regulations.

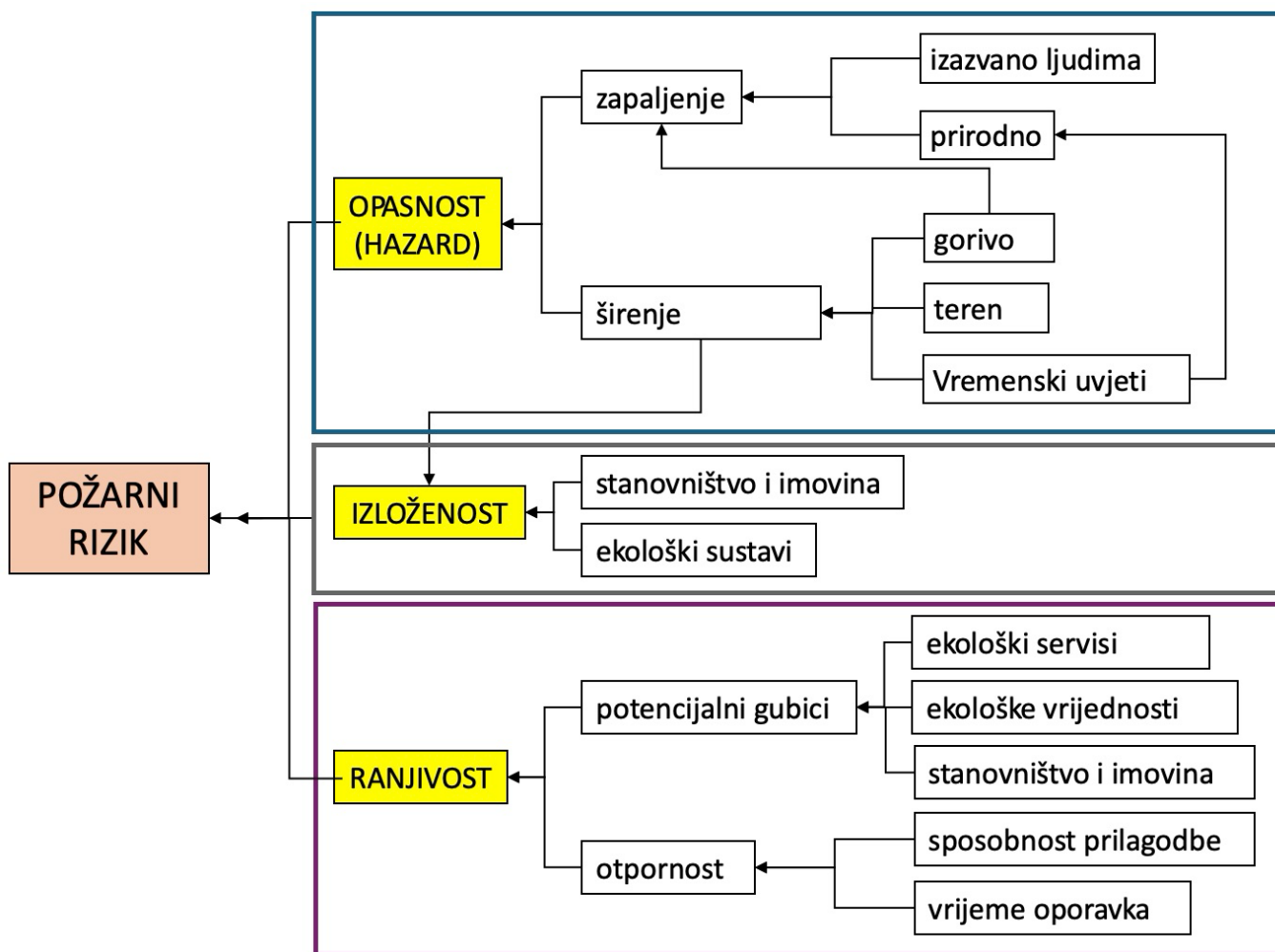
Sadržaj

Sažetak	ii
Abstract	iii
Sadržaj	iv
1. Uvod	1
2. Indikatori propagacijskog potencijala	2
3. Određivanje propagacijskog potencijala korištenjem simulacijskog programa FlamMap	5
4. Određivanje propagacijskog potencijala simulacijom na razini piksela rasterskih GIS karata	7
4.1. Matematički modeli proračuna indikatora propagacijskog potencijala	8
4.1.1. Rothermelov model prizemnog (površinskog) širenja požara	8
4.1.2. Eruptivno razbuktavanje prizemnog (površinskog) požara	10
4.1.2.1. Zašto se požar kreće ubrzano (eruptivno)?	10
4.1.2.2. Matematički model eruptivnog širenja požara	13
4.1.2.3. Pojava lako hlapljivih organskih komponenata kod mediteranske vegetacije koje potiču eruptivno razbuktavanje požara	16
4.1.2.4. Kako se braniti od eruptivnog razbuktavanja požara?	17
4.1.2.5. Indikatori potencijalnog eruptivnog razbuktavanja požara	18
4.1.3. Modeli širenja požara u krošnjama	23
4.1.3.1. Brzina širenja požara u krošnjama (CROS)	27
4.1.3.2. Aktivnost požara u krošnjama (CFA)	28
4.1.3.3. Udio izgorjele krošnje (CFB)	29
4.1.3.4. Toplinska energija požara u krošnjama po jedinici površine (CHA)	29
4.1.3.5. Intenzitet požara u krošnjama na vatrenoj liniji (CFI)	30
4.1.3.6. Duljina plamena požara u krošnjama (CFL)	30
5. Pripreme meteoroloških podataka za proračun propagacijskog potencijala vezanog uz povijesne požare	31
5.1. Postupak 1. - priprema meteoroloških podataka za povijesne požare na području Europe veće od 2000 ha u rezoluciji 1 km	31
5.2. Postupak 2. - priprema meteoroloških podataka za povijesne požare na području manjih regija u rezoluciji 100 m	33
5.3. Usporedba rezultata dobivenih postupkom 1. i postupkom 2. pripreme meteoroloških podataka za povijesne požare	37
6. Proračun indikatora propagacijskog potencijala na temelju stvarnih meteoroloških podataka	40
6. FirEURisk vjerojatnost propagacijskog potencijala	42
4. Zaključak	44
Literatura	45

1. Uvod

Prema metodologiji projekta FirEurisk požarni rizik (engl. *Wildfire Risk*) je kompleksna veličina koja ovisi o tri faktora (Slika 1.):

1. požarnoj opasnosti (hazardu) (engl. *Wildfire Danger (Hazard)*)
2. požarnoj izloženosti (engl. *Wildfire Exposure*)
3. požarnoj ranjivosti (engl. *Wildfire Vulnerability*).



Slika 1. Proračun požarnog rizika u okviru projekta FirEurisk

Požarna opasnost (hazard) (engl. *Wildfire Danger/Hazard*) se određuje na temelju procjene vjerojatnosti zapaljenja (engl. *Ignition*) i procjene **propagacijskog potencijala** područja na temelju analize mogućeg **širenja** požara (engl. *Propagation*). Propagacijski potencijal je isto tako važan ulazni parametar za procjenu požarne izloženosti (engl. *Wildfire Exposure*).

2. Indikatori propagacijskog potencijala

Propagacijski potencijal (engl. *Propagation Potential*) se procjenjuje na temelju **indikatora propagacijskog potencijala** (engl. *Propagation Potential Indicators*). Indikatori propagacijskog potencijala su indikatori koji iskazuju koliki je mogući potencijal širenja požara na određenom području, pa se koriste za procjenu potencijalnog rizika od požara određenog području. Indikatori propagacijskog potencijala vezani su uz meteorološke uvjete, topografiju, gorivo opterećenje i povijest požara:

- **Meteorologija** - vruće, suho i vjetrovito vrijeme može pogodovati brzom širenju požara. Temperatura, vlaga, brzina i smjer vjetra ključni su indikatori koje treba uzeti u obzir. Isto tako količina vlage u vegetaciji (živoj i mrtvoj) (Stipaničev et al., 2024b.) može značajno utjecati na brzinu širenja požara. Suha vegetacija znači veći rizik od požara.
- **Topografija** - nagib, ekspozicija i nadmorska visina terena također mogu utjecati na širenje požara. Strmi nagibi i uske doline mogu poslužiti kao kanali za brzo širenje plamena.
- **Gorivno opterećenje** – količina i raspored goriva (vegetacije) u određenom području može utjecati na intenzitet i brzinu širenja požara. Područja s gustim naslagama suhe vegetacije imaju veći rizik.
- **Povijest požara** – prošle pojave šumskih požara mogu biti dobar pokazatelj budućeg rizika. Područja koja su već gorjela često su sklonija novim požarima.

Obično se svi ovi parametri povezuju zajedno kroz **modele ponašanje i širenja požara** (engl. *Fire Behavior and Spread Models*) koji računaju veličine važne uz moguće širenje požara. Moguće širenje požara obično dijelimo u dvije grupe povezana s dva osnovna tipa požara¹ (Slika 2.).



Slika 2. Lijevo: Prizemni (površinski) požari kod kojih relativno sporo gori živa i mrtva vegetacija na tlu područja zahvaćenog požarom. Desno: Požari u krošnjama kod kojih relativno brzo gori vegetacija u krošnjama zato što požar prenosi vjetar od krošnje do krošnje.

¹Osim ova dva tipa požara postoje i **podzemni požari** (engl. *Ground Fires*) – požari koji se šire obično bez plamena ispod površine tla, trošeći organski materijal prisutan u sloju humusa ili treseta i **iskrenje (spot požari)** (engl. *Spot Fires*) – 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, ali se oni obično ne uzimaju u obzir kroz procjene propagacijskog potencijala.

- **Prizemni požari (površinski požari)** (engl. *Surface Fires*) – požari koji se šire obično s plamenim požarnim frontom, trošeći goriva koja se nalaze iznad tla, poput lišća, trave, grmlja i malih stabala.
- **Požari u krošnjama (visoki požari)** (engl. *Crown Fires*) – požari koji se šire trošeći lišće krošnja stabala, obično uz podršku prizemnih požara ispod krošnja te se šireći s jednog stabla na drugo.

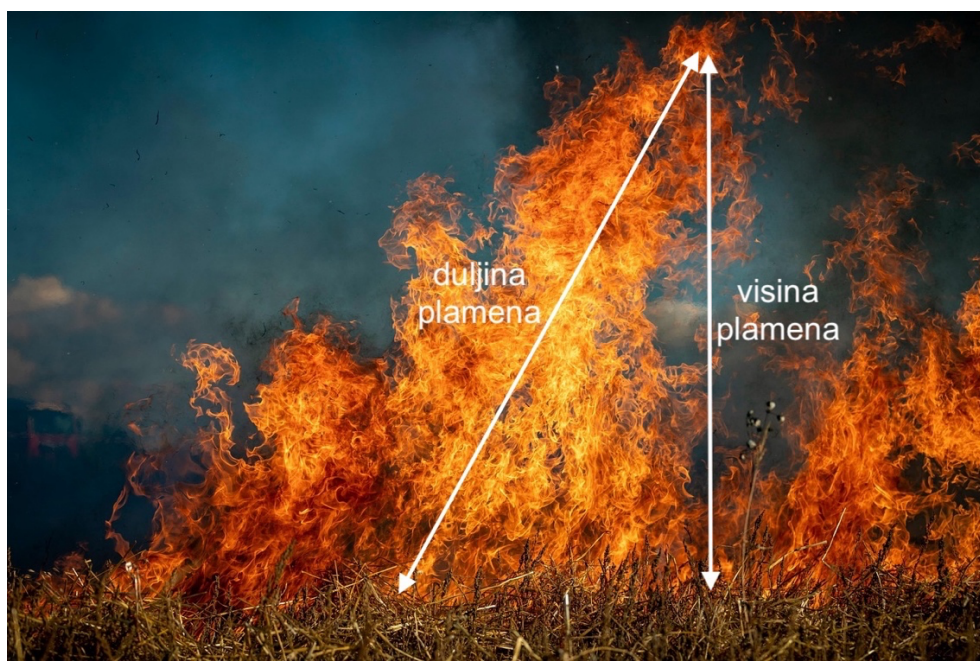
Indikatori propagacijskog potencijala obično se odvojeno računaju za ova dva osnovna tipa požara. Najčešće korišteni indikatori prizemnog širenja požara su:

- **Intenzitet vatrene linije (FI)** [kW/m] [kJ/(m·s)] (engl. *Fireline Intensity*) – također poznat kao Byramov intenzitet požara, koji predstavlja osnovnu karakteristiku požara. Ovaj pokazatelj izražava količinu toplinske energije oslobođene u jedinici vremena iz jednog metra širokog dijela gorivog sloja, protežući se od prednje do stražnje strane goruće zone kako ilustrira Slika 3. Najbolje ga opisuje sam Byram: „ (Intenzitet vatrene linije) daje najviše informacija o ponašanju vatre koliko se može sažeti u jedan broj.“



Slika 3. Ilustracija intenziteta vatrene linije

- **Duljina plamena (FL)** [m] (engl. *Flame Length*) – pokazatelj intenziteta vatrene linije direktno je proporcionalna s intenzitetom vatrene linije. Mjeri se od sredine aktivne zone plamenog izgaranja do prosječnog vrha plamena i razlikuje se od visine plamena (engl. *Flame Height*) koja se mjeri okomito na podlogu kako prikazuje Slika 4.
- **Brzina širenja požara (ROS)** [m/s] (engl. *Rate of Spread*) – linearna brzina napredovanja plamene fronte u neizgoreno gorivo u smjeru okomitom na požarnu frontu. To je značajan faktor koji utječe na intenzitet vatrene linije i veličinu plamena, što je važno za određivanje konačnog učinka požara.



Slika 4. Ilustracija razlike između duljine plamena i visine plamena

- **Toplina po jedinici površine (HA)** [kJ/m^2] (engl. *Heat per Area Unit*) – Količina topline oslobođena po jedinici površine tijekom kratkog perioda kontinuiranog plamena. Na ovu varijablu ne utječu brzina vjetra, nagib terena ili smjer širenja požara.
- **Intenzitet reakcije (RI)** [$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] (engl. *Reaction Intensity*) – količina topline oslobođena po jedinici površine na frontalnom dijelu požara.

Za požare u krošnjama, samo se još doda slovo C (za *Crown*) pa imamo *CFI*, *CFL*, *CROS*, *CHA* i *CRI*. Jedinice su iste, a kao dodatni indikatori dobiju se i:

1. **Udio izgorjene krošnje (CFB)** [frakcija] (engl. *Crown Fraction Burned*) - Frakcija između 0 i 1 koja označava ozbiljnost krunskog požara. To je udio krošnji drveća zahvaćenih požarom na određenom području. Manje od 10 posto se smatra površinskim požarom, između 10 i 89 posto je povremeni požar, dok je više od 90 posto kontinuirani požar.
2. **Aktivnost požara u krošnjama (CFA)** (engl. *Crown Fire Activity*) kojom se dodjeljuje vrsta požara na temelju dva parametra: **prijelaz na požar u krošnjama** [da/ne] koji se određuje na temelju površinskog intenziteta vatrene linije (*FI*) [kW/m] i kritičnog površinskog intenziteta vatrene linije (*FI₀*) i **uvjeta za aktivne krune požara** [da/ne] koji se temeljeni na brzini širenja aktivne krune požara (*CROS*) i kritičnoj brzini širenja krune požara (*ROS₀*). Razlikuju se četiri vrste požara: površinski požar (prijelaz=ne, aktivni=ne), uvjetni krunski požar (prijelaz=da, aktivni=ne), pasivni krunski požar – zapaljenje (prijelaz=ne, aktivni=da) i aktivni krunski požar (prijelaz=da, aktivni=da).

U ovom izvještaju bavimo se s dva načina određivanja potencijalnog (statičkog) propagacijskog potencijala na temelju povijesti požara. Prvi se temelji na simulacijskom programu FlamMap, a drugi, razvijen u okviru FirEUriisk projekta, na simulaciji na razini piksela rasterskih GIS karata. Ovaj drugi postupak pogodan je i za dinamičko određivanje propagacijskog potencijala na temelju stvarnih, trenutnih vremenskih podataka, pa ćemo njemu posvetiti posebnu pažnju. U okviru FirEUriisk projekta izračunate su i karte potencijalnog (statičkog) propagacijskog potencijala za područje cijele Europe u rezoluciji 1km za podatke povijesnih požara. Iz ovih karata izvukli smo karte za područje Hrvatske koje su i sastavni dio ovog izvještaja. Karte prilažemo u osnovnoj 1km rezoluciji ali i u preuzorkovanoj verziji na rezoluciju 100 m.

3. Određivanje propagacijskog potencijala korištenjem simulacijskog programa FlamMap

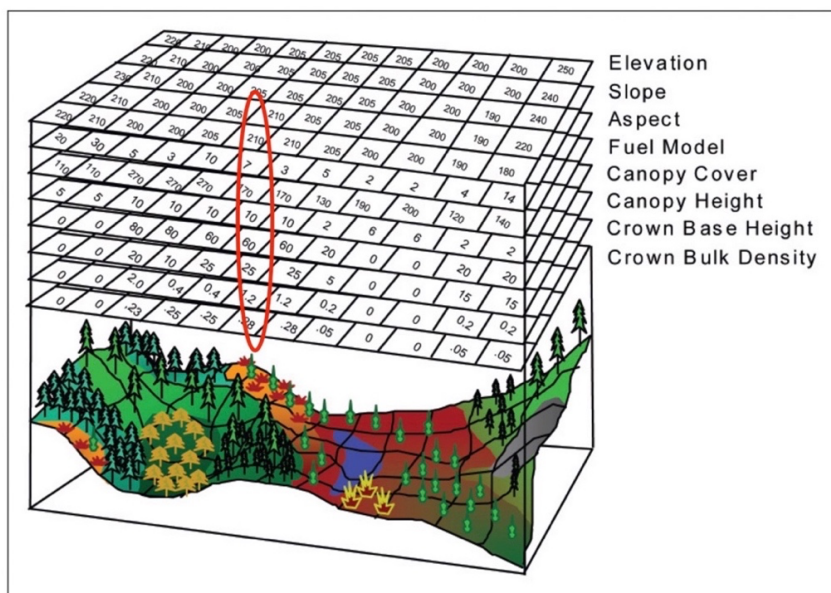
FlamMap² je dobro poznati softver za simulaciju ponašanja šumskih požara koji sadrži nekoliko alata koji se mogu koristiti za procjenu propagacijskog potencijala:

- osnovno ponašanje požara - Basic Fire Behaviour (BFB) ili Landscape Fire Behaviour (Basic) koji se temelji na standardnom i provjerenom Rothermel-ovom modelu za površinsko širenje vatre (Rothermel, 1972.; Andrews, 2018.) i standardnim modelima za širenje vatre u krošnjama (Scott & Reinhard, 2001.).
- simulacija širenja požara algoritmom minimalnog vremena širenja (Minimum Travel Time Fire Spread (MTT)) i
- vjerojatnost izgaranja područja (Landscape Burn Probability (LBP)).

Svaki od njih daje različite izlazne podatke koji se mogu koristiti za procjenu potencijala širenja požara. U okviru FirEURisk projekta i to za analizu propagacijskog potencijala na razini pilot područja prvenstveno je korišten FlamMap Basic Fire Behaviour kako bi se izradile 'statičke' karte propagacijskog potencijala temeljene na povijesnim požarima u analiziranom području u posljednjih 20 godina. Ograničeno je korišten i modul FlamMap Landscape Burn Probability za izradu 'dinamičkih' karti potencijala širenja požara, s izlaznim parametrom vjerojatnost izgaranja krajolika (engl. *Landscape Burn Probability*). Pri tome je korištena verzija FlamMap softvera³ je 6.2.7 iz studenog 2022.

Postupak pripreme simulacije je formiranje ulaznih datoteka i to:

- Statička datoteka .lcp koja sadrži sve GeoTiff datoteke potrebne za provođenje simulacije (nagib, aspekt, elevacije, modele goriva u Scott-Burganovoj klasifikaciji sa 40 klasa, pokrivenost krošnjama, visina krošnji, visina baze krošnji i gustoća krošnji) kako prikazuje Slika 5.



Slika 5. Ulazna .lcp datoteka programa FlamMap sa svim relevantnim slojevima.

² <https://research.fs.usda.gov/firelab/products/dataandtools/software/flammap>

³ Dokumentacija o načinu korištenja programa: <https://owfflammaphelp62.firenet.gov>

Slojevi vezani s gorivom i gorivom u krošnjama za Hrvatsku u 100m rezoluciji objavljeni su u našim diseminacijskim izvještajima (Stipaničev et al., 2024c.; Stipaničev et al., 2024d.), a slojeve vezane s elevacijom, nagibom i aspektom u 100 m rezoluciji objavljujemo uz ovaj diseminacijski izvještaj.

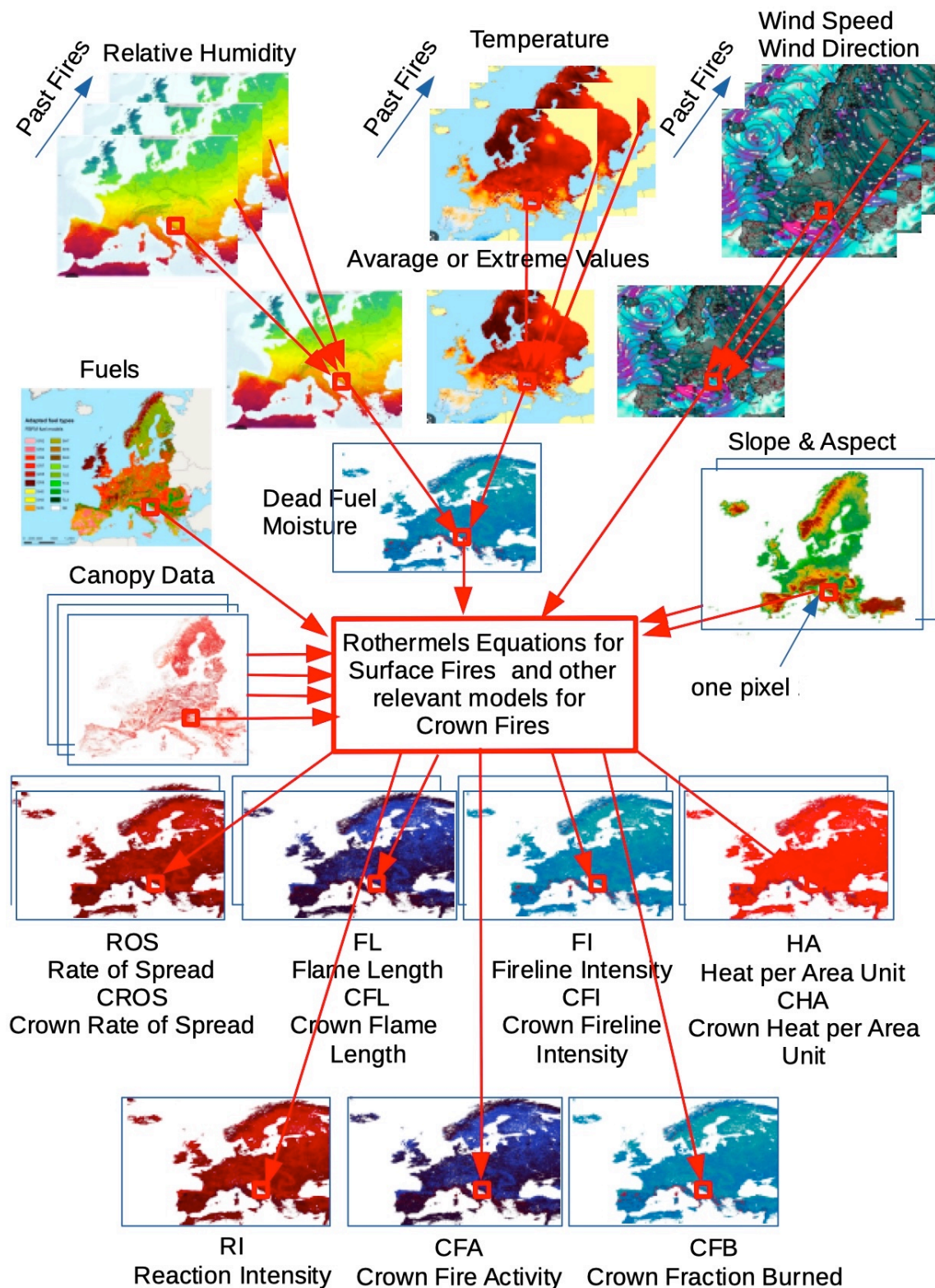
- Dinamičke datoteke s meteorološkim podacima: podacima o početnoj vrijednosti vlažnosti goriva (.fms) izračunatih na temelju vremenskim varijabli (.wtr) i brzini i smjeru vjetra (.wnd). Detalji o tome ako se one formiraju nalaze se u dokumentaciji FlamMap-a. Vlažnosti goriva smo posvetili i poseban diseminacijski izvještaj (Stipaničev et al., 2025e.)

U FirEUrisk projektu ovaj je postupak korišten za procjenu propagacijskog potencijala na razini pilot područja i to samo za izradu statičkih karti na temelju meteoroloških podataka vezanih s povijesnim požarima.

Pri tome su meteorološki podaci vezani s povijesnim požarima interpretirani na specifičan način o čemu više u nastavku nakon opisa drugog postupa koji je korišten za određivanje propagacijskog potencijala na razini Europe. Temelji se na istim matematičkim modelima (Rothermel, 1972.; Andrews, 2018.; Scott & Reinhard, 2001.), ali je sam način jednostavniji i možda univerzalniji, zato što se može koristiti za određivanje i statičkih i dinamičkih karata propagacijskog potencijala za bilo kakve ulazne meteorološke podatke. Zbog toga ga u nastavku opisujemo s više detalja.

4. Određivanje propagacijskog potencijala simulacijom na razini piksela rasterskih GIS karata

Slika 6. prikazuje principijelnu shemu proračuna indikatora propagacijskog potencijala na razini piksela rasterskih GIS karata.



Slika 6. Princip proračuna indikatora propagacijskog potencijala na razini piksela rasterskih GIS karata.

Za svaki piksel pročitaju se vrijednosti svih ulaznih rasterskih karata, primjene su odgovarajući matematički modeli i njihovim formulama izračunaju vrijednosti indikatora propagacijskog potencijala za taj piksel. Na kraju kada se izračunaju vrijednosti za sve piksele formiraju se izlazne rasterske karte. Veličina piksela može biti bilo koja, samo je bitno da sve ulazne karte imaju istu projekciju, istu rezoluciju i isti obuhvat (engl. *Extend*) tako da sve ulazne karte imaju isti broj redova i stupaca. Program proračuna razvijen je u okviru FirEUriks projekta na FESB-u i napisan u Pythonu.

4.1. Matematički modeli proračuna indikatora propagacijskog potencijala

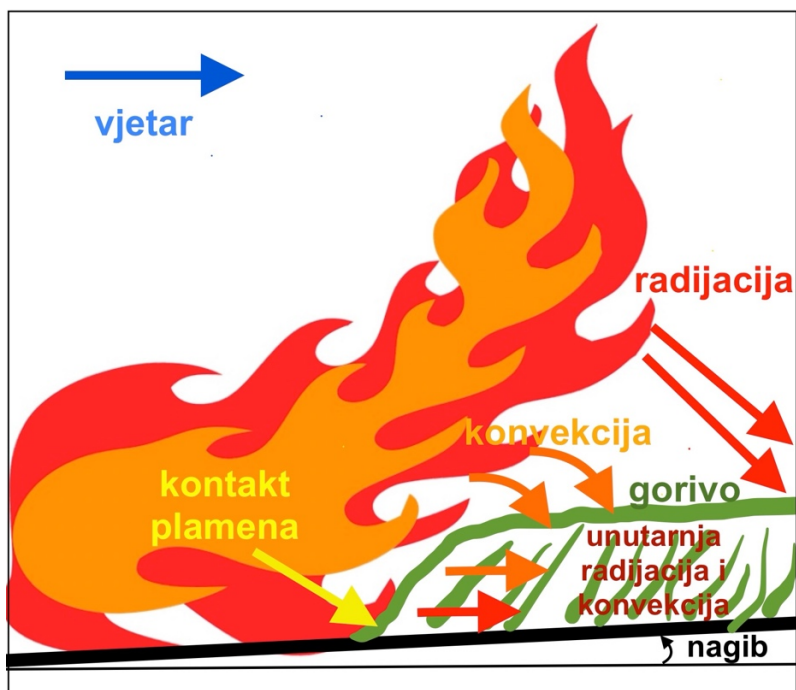
Matematički modeli koji se koriste za proračun indikatora propagacijskog potencijala površinskih požara i požara u krošnjama su standardni, dobro poznati i provjereni modeli koji su ugrađeni u većinu simulacijske programe ponašanja požara (FlamMap, Behave +, Firesite). To su:

- **Rothermel model** (Rothermel, 1972.; Andrews, 2018.) za prizemno (površinsko) širenje vatre u heterogenim gorivima i
- standardni modeli širenja požara u krošnjama (Scott & Reinhard, 2001.):
 - **Van Wagnerov model** inicijacije požara u krošnjama iz 1977.g.
 - **Rothermel model** širenja požara u krošnjama iz 1991.g.
 - **Finney model** ponašanja požara u krošnjama iz 1998.g. i
 - **Scott & Reinhart model** ponašanja požara u krošnjama iz 2001.g.

4.1.1. Rothermelov model prizemnog (površinskog) širenja požara

Temeljni model je Rothermel model kao semi-empirijski model koji kombinira temeljne zakone termodinamike prenošenja topline konvekcijom i radijacijom s parametrima dobivenim eksperimentalno:

$$ROS = \frac{\text{Heat Source}}{\text{Heat Sink}} = \frac{RI * \xi * (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b * \varepsilon * Q_{ig}} \quad (1)$$



Slika 7. Osnovni principi širenja požara prema Rothermelovom modelu (Rothermel, 1972.)

Slika 7. objašnjava osnovni princip koji je jednostavan. Brzina širenja požara (ROS) je kvocijent **izvora topline** (engl. *Heat Source*) i **prijamnika topline** (engl. *Heat Sink*).

Izvor topline u brojniku ovisi o:

- Intenzitetu reakcije (RI) (engl. *Reaction Intensity*) koji iskazuje efektivnu brzinu oslobađanja topline tijekom sagorijevanja goriva po jedinici površine i vremenu.
- Učinkovitosti prijenosa topline ξ (engl. *Propagation Flux Ratio*) koji je kvocijent efektivne količina topline prenesene na novo gorivo (engl. *Heat Received by Unburned Fuel*) i ukupne količine topline proizvedene tijekom izgaranja (engl. *Heat Produced by Combustion*). Rothermel ga je nazvao *Moisture Damping*.
- Utjecaja vjetra kroz faktor Φ_w i utjecaja nagiba kroz faktor Φ_s . Za situaciju bez vjetra i nagiba ovi faktori su jednaki 0. Ovi faktori osim o vjetru (ili nagibu) ovise i o karakteristikama goriva.

Prijemnik topline u nazivniku predstavlja energija potrebnu za zapaljenje novog goriva i ovisi o:

- ρ_b – efektivnoj gustoći goriva (engl. *Effective Bulk Density*), što pokazuje koliko goriva postoji po jedinici volumena.
- ε - učinkovitost prijenosa topline (engl. *Heat Transfer Efficiency* ili *Effective Heating*) koja određuje koliko topline stvarno doprinosi zapaljenju novog goriva.
- Q_{ig} - energiji potrebna za zapaljenje goriva (engl. *Heat of Pre-Ignition*), tj. količina topline koju gorivo mora apsorbirati prije nego što se zapali.

Rothermelov model daje samo brzinu širenja požarne fronte (ROS) a kao indikatori propagacijskog potencijala koriste se još neke veličine vezane uz širenje požara.

Toplina po jedinici površine (HA) [kJ/m^2] (engl. *Heat per Area Unit*) računa se izrazom (Rothermel, 1983.):

$$HA = RI * t_R \quad (2)$$

gdje je RI intenzitet reakcije, a t_R je **vrijeme trajanja (zadržavanja) plamena** (engl. *Residence Time*). Vrijeme trajanja plamena ovisi o omjeru površine i volumena goriva (SAV) [$1/\text{m}$] (engl. *Surface-area-to-volume Ratio*) koji iskazuje kakav je odnos između površine goriva izložene oksidaciji i njegovog ukupnog volumena. Gorivo s većim omjerom površine i volumena (npr. suha trava, iglice) brže se zagrijava i sagorijeva, dok gorivo s manjim omjerom (npr. debla, veliki komadi drva) sporije sagorijeva. Jednadžbu je izveo još 1969.g. Anderson (Anderson, 1969.):

$$t_R [\text{min}] = (3.2808 * 384) / SAV [\text{m}] \quad (3)$$

Intenzitet vatrene linije (FI) [kW/m] [$\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{s})$] (engl. *Fireline Intensity*) računa se Byramovom jednadžbom iz 1959.g. (Byram, 1959.).

$$FI [\text{kW/m}] = (11,3565 * HA [\text{kJ/m}^2] * ROS [\text{m/s}]) / 60 \quad (4)$$

Dužina plamena (FL) [m] (engl. *Flame Length*) je direktno proporcionalna intenzitetu vatrene linije Byramovom jednadžbom (Byram, 1959.):

$$FL [\text{m}] = 0.3048 * 0,45 * (17,334 * FI [\text{kW/m}])^{0,46} \quad (5)$$

Više detalja o modelu i načinu proračuna svih parametara potrebnih za određivanje indikatora propagacijskog potencijala u izvrsnom preglednom radu (Andrews, 2018.).

Slika 8. prikazuje Richard C. Rothermela 2022.g. kada je imao 92 godine i priključio se video vezom skupu IX. *International Conference on Forest Fire Research* u Coimbri, Portugal povodom 50 godišnjice objavljivanja njegove formule⁴.



Slika 8. Richard C. Rothermel se obraća sudionicima IX. International Conference on Forest Fire Research u Coimbri, Portugal povodom 50 godišnjice objavljivanja formule za širenje površinskog požara. Cijeli Rothermelov govor možete naći na stranicama CIPOP-a⁴

4.1.2. Eruptivno razbuktavanje prizemnog (površinskog) požara

Rothermelova jednadžba računa brzinu širenja požara uz pretpostavku da je za stalnu brzinu vjetra, stalni nagib i homogeno goriva brzina širenja požara konstantna, što je dosta pojednostavljen model. Požar se u stvarnosti širi ubrzano, a koliko će ubrzanje biti ovisi o brzini vjetra i nagibu. Ovaj efekt širenja požara poznat je po nazivu **eruptivno razbuktavanje požara** (engl. *Eruptive Fire* ili *Blow-Up*). Kako je eruptivno razbuktavanje požara često uzrok požarnih nesreća smatramo da se i ovaj način širenja požara treba uključiti kao posebne indikatore propagacijskog potencijala nazvan **indikator potencijalnog eruptivnog razbuktavanja požara**.

4.1.2.1. Zašto se požar kreće ubrzano (eruptivno)?

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. Rothermelova jednadžba pretpostavlja da će se požar na travnatoj podlozi kada 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, 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

⁴ Video s govorom Rothermela možete pronaći na stranicama CIPOP-a - <https://cipop.fesb.hr/index.php/novosti/9th-international-conference-on-forest-fire-research>

kraju padine, bez obzira koliko je padina duga. Drugim riječima kazano, jednadžba kojom se određuje brzina širenja požara isključivo ovisi o tri vrijednosti: nagib terena – vegetacija – meteorologija. Eruptivni efekt je 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.

Prema priručniku (FirEUrisk Del.2.6., 2024.) eruptivno razbuktavanje požara povezano je s vrlo velikim ubrzanjem požara, koje se može usporediti s erupcijom, pa se po tome i nazivaju. 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 eruptivno ili ubrzano širenje vatre.

Ovaj tip ekstremnog ponašanja požara sustavno su prvi proučavali (Viegas i Pita, 2002.), koji su otkrili da je eruptivno 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. Primjer laboratorijskog eksperimenta s eruptivnim širenjem požara u Laboratoriju za istraživanje požara raslinja Sveučilišta u Coimbri u Louisi kojeg je osnovao i još uvijek vodi prof. Domigos Viegas prikazuje Slika 9.



Slika 9. Primjer laboratorijskog eksperimenta eruptivnog širenja požara u laboratoriju u Louisi.

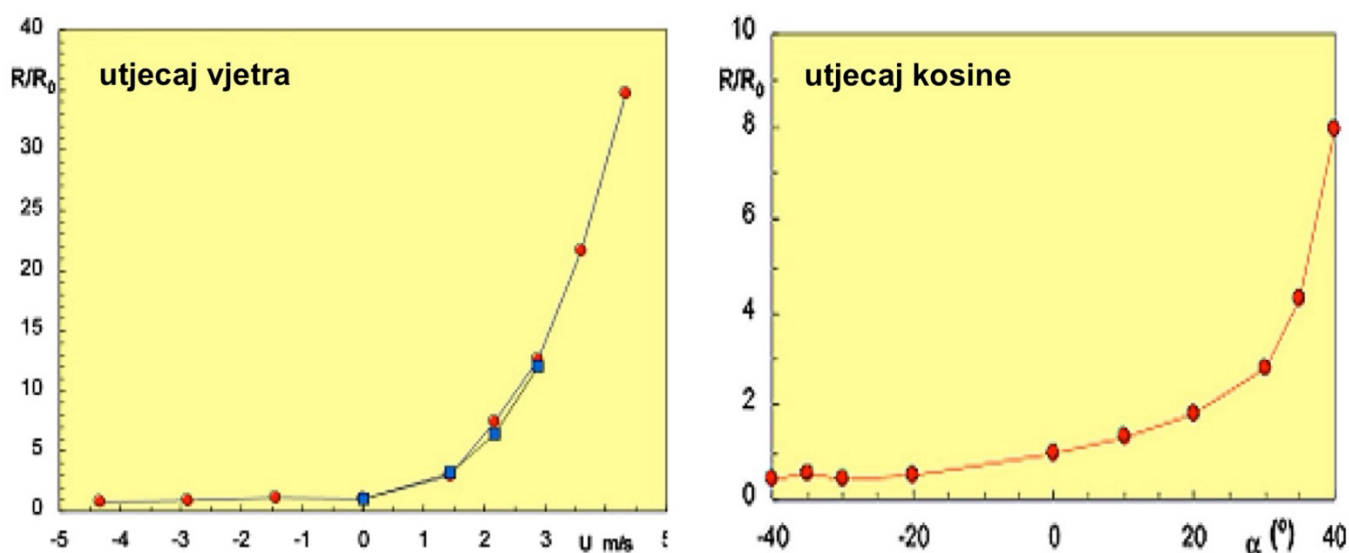
Dvije su vrste eruptivnog razbuktavanja: **eruptivno razbuktavanje izazvano kosinom** (engl. *Slope-driven Eruptive Fire*) i **eruptivno razbuktavanje izazvano vjetrom** (engl. *Wind-driven Eruptive Fire*). Kako je pojava eruptivnog razbuktavanja izazvana kosinom češća, uobičajeno je da se pod pojmom eruptivno razbuktavanje obično misli na ovaj tip ubrzanog širenja vatre izazvano kosinom, iako se ne smije zaboraviti da se eruptivni efekt može pojaviti i izazvan vjetrom. Viegas je još 2004.g. (Viegas, 2004.) dokazao ovaj dualitet i mogućnost jedinstvenog tretiranja utjecaja vjetra i nagiba na mogućnost razvoja eruptivnog požara. Ove Viegasove rezultate istraživanja najbolje ilustrira Slika 10 dobivena ispitivanjima na platformi sličnoj onoj prikazanoj na Slici 9. Slika prikazuje relativni omjer brzine širenja požara u odnosu na početnu brzinu u ovisnosti o brzini vjetra bez nagiba, te u ovisnosti o nagibu, bez vjetra (Viegas, 2004.). Očito je da su efekti vrlo slični.

U rezultatima na slici brzina se promatra u istom vremenskom razmaku nakon početka pojave, što znači da se faktor vremena ne razmatra. Međutim kod eruptivnog efekta koji rezultira u eruptivnom razbuktavanjem, vrijeme je jako bitan faktor. Viegas naglašava da se u biti klasični trokut širenja požara otvorenog prostora:

vegetacija – konfiguracija – meteorologija

treba nadopuniti na četverokut:

vegetacija – konfiguracija – meteorologija – vrijeme.



Slika 10. Relativni odnos brzina širenja požara R u odnosu na ulazne brzine R₀ nakon istog vremenskog razmaka za (Viegas 2005.). a) različite brzine vjetra uz nulti nagib padine, b) različite nagibe padine za situaciju bez vjetra

Eruptivno razbuktavanje izazvano kosinom je, najkraće kazano, pojava koja se javlja kada požarna fronta naiđe na padinu ili klanac koji je po svojoj osnovnoj osi dovoljno nagnut te na terenu postoji odgovarajuća goriva materija. Za pojavu ovog tipa eruptivnog razbuktavanja postojanje vjetra nije presudno. Eruptivno razbuktavanje će se javiti i u slučajevima kada vjetra nema, ako je padina ili klanac dovoljno nagnut i dovoljno dug. Koliko nagnut i koliko dug, ovisi o vegetaciji na padini ili u klancu. Kosina je važna za pojavu eruptivnog razbuktavanja izazvanog kosinom koji će se javiti za dovoljno nagnutu kosinu čak i onda kada puše vjetar suprotnoga smjera od smjera nagiba kosine. Eruptivni efekt je toliko jak da će nadvladati vjetar suprotnog smjera. Pri tome se spominje nužni nagib kosine od 10^0 . Međutim eruptivni efekt i eruptivno razbuktavanje mogu se javiti i kada nagib nije toliko ako puše vjetar u smjeru rasta kosine

i širenja požara. Takav vjetar pogodnoga smjera pospješuje i pojačava eruptivne efekte, pa do eruptivnog efekta dolazi i na kraćim padinama ili klancima manjeg nagiba, uz uvjet da je vjetar dovoljno jak.

Što se u biti fizikalno događa? Pretpostavimo u prvom trenu da vjetra nema. Ukoliko se požar kreće po ravnom terenu brzina njegovog širenja biti će više-manje stalna i ovisiti prije svega o značajkama vegetacije, a oblik požarne fronte biti će kružni. Označimo brzinu kretanja požara po ravnoj plohi bez vjetra s R_0 . Dolaskom do padine ili nagnutog klanca, požar se u početku nastavlja širiti ulaznom brzinom. Međutim vrlo brzo visina plamena na početku požarne fronte počinje rasti, a brzina širenja požara postaje sve veća i veća. Razlog je pojava u tehnici poznata kao **pozitivna povratna veza**. Požar na vrhu se kontinuirano potpomaže toplinom iz plamena ispod sebe što pojačava njegov efekt, a on nakon toga još više potpomaže požar koji će se razviti ispred njega. Povećanjem intenziteta gorenja pojačava se i strujanje zraka u njegovoj blizini što još više potpomaže gorenje i povećava brzinu širenja požarne fronte.

I tako redom, jedan efekt potpomaže drugog, pa požar vrlo brzo nekontrolirano eruptira. Otuda mu i ime eruptivno razbuktavanje, iako se u Americi ovaj efekt često naziva i "blow-up" što se hrvatski može prevesti kao eksplodirajući, uvećavajući ili napuhavajući požar. Zabilježeno je da se brzina požara na kraju padine ili klanca (koju ćemo označiti sa R) u odnosu na brzinu kojom je požar došao na dnu padine ili ulazu klanca (koju smo označili s R_0) može povećati i više od 100 puta ($R/R_0 > 100$) u relativno kratkom vremenu.

Ovakav nagli razvoj velike količine topline uzrokuje pojavu vrlo jakih vjetrova koji proizvode **zvuk sličan zavijanju ili huku** dolazeće lokomotive. Ovo su svjedočili i brojni svjedoci koji su preživjeli nalet eruptivnog požara.

Prisustvo vjetra koji puše u smjeru padine ili u smjeru uspona klanca sve to još dodatno pojačava, na način da prividno povećava nagib terena. Zbog puhanja vjetra plameni jezici su polegnuti pa kosina ili klanac izgledaju prividno još više nagnuti, nego li su stvarno, čime je efekt erupcije brži i jači, pa ne treba velika duljina padine da do eruptivnog efekta dođe. Uz prisustvo vjetra eruptivno razbuktavanje se javlja i u klancima u koji nisu dovoljno dugi i/ili nisu niti previše nagnuti da bi se dosegla točku erupcije.

Brzina dolaska do eruptivne faze ovisi i o vegetaciji na padini ili u klancu. Što je gorivo lakše, to do će do erupcije prije doći. Najopasnija je suha travnata podloga u kojoj do eruptivne faze dolazi i nekoliko puta brže nego na primjer na padini koja je obrasla grmolikom vegetacijom ili šibljem. Ukoliko je na padini šuma sa malim udjelom prizemne travnate podloge onda je dolazak do eruptivne faze još sporiji, pa se često dogodi da se na šumovitim obroncima požarna fronta dođe do vrha padine, a ne dosegne točku prelaska u eruptivnu fazu.

4.1.2.2. Matematički model eruptivnog širenja požara

Osnovna jednadžba eruptivnog širenja požara prema Viegasu i njegovim koautorima (Viegas & Pita, 2004.; Viegas, 2004.; Viegas 2005.; Viegas et al., 2005.) je semi-empirijska jednadžba koja povezuje prirast brzine požarne fronte u odnosu na brzinu kojom bi se požar širio ukoliko efekta eruptivnog požara ne bi bilo. Odmah na početku napominjemo da su jednadžbe izvedene za kretanje požara po kosoj plohi a ne po terenu oblika klanca. U klancu bi svi ovi efekti bili još izražajniji, a brzine još i veće, što je i eksperimentalno dokazano (Viegas et al. 2002., Viegas 2004.).

Prva hipoteza modela eruptivnog požara (koja je u istraživanjima prof.Viegasa i eksperimentalno dokazana) jest da postoji veza između brzine strujanja zraka U i relativnog prirasta brzine širenja požarne fronte R' . Relativni prirast brzine širenja požarne fronte je bez-dimenzionalna veličina

$$R' = R/R_0 \quad (6)$$

gdje je R_0 ulazna brzina (eng. *ROS – Rate of Spread*) – brzina kojom bi se požar uz padinu kretao da nema eruptivnog efekta izračunata Rothermelovom jednadžbom. Ovisnost brzine strujanja zraka i relativne brzine širenja požarne fronte opisana je jednadžbom:

$$R' = 1 + a_1 * U^{b_1} \quad (7)$$

gdje su a_1 i b_1 koeficijenti koji ovise o tipu goriva.

Druga hipoteza jest da se trenutna brzina vjetra mijenja pod utjecajem strujanja zraka induciranog vatrom. Doprinos promjene brzine vjetra pod utjecajem brzine širenja vatre jest:

$$dU = a_2 * (R')^{b_2} * dt \quad (8)$$

Vrijednosti koeficijenta a_2 i b_2 isto tako ovise o tipu goriva.

Iz jednadžbi (7) i (8) izvodi se nelinearna diferencijalna jednadžba koja modelira relativnu brzinu širenja eruptivni požara:

$$\frac{dR'}{dt} = (a_1)^{\frac{1}{b_1}} * a_2 * b_1 * \left(\frac{R'-1}{a_1}\right)^{\left(1-\frac{1}{b_1}\right)} * (R')^{b_2} \quad (9)$$

odnosno u bez-dimenzionalnoj formi:

$$\frac{dR'}{dt'} = (a_1')^{\frac{1}{b_1}} * a_2' * b_1 * (R' - 1)^{\left(1-\frac{1}{b_1}\right)} * (R')^{b_2} \quad (10)$$

gdje su:

$$a_1' = a_1 * (U_0)^{b_1} = a_1$$

$$a_2' = a_2 * t_R$$

$$t' = t/t_R$$

a R_0 , t_0 i U_0 su referentni parametri:

R_0 – Osnovna ulazna brzina širenja požarne fronte – brzina kojom bi se požar uz padinu kretao da nema eruptivnog efekta. Ovisi o konfiguraciji terena, vjetru, o tipu i količini vegetacije, te količini vlage u finom gorivu.

t_R – Vrijeme izgaranja goriva (engl. *Residence Time*) – mjera dinamičkih svojstava goriva. karakterizira se vremenom gorenja na određenom mjestu gorive tvari. Može se povezati samo s fazom gorenja kada postoji plamen, ali može uključivati i fazu usijanja zato što se i tijekom ove faze oslobađa toplinska energija. Određuje se pokusima u laboratoriju.

U_0 – referentna brzina vjetra od 1 m/s u odnosu na koju se iskazuje skalirana brzina vjetra $U' = U/U_0$.

Jednadžba (10) temeljni je Viegasov matematički model eruptivnog širenja požara koja za $R' > 1$ daje pozitivno ubrzanje vatrene fronte i vrijedi $1 < R' < \infty$. Za $R' = 1$ model odgovara početnom stanju kada se požar širi ulaznom brzinom i nema ubrzanja požarne fronte. Ulazni parametri ovog modela su koeficijenti a_1 , b_1 , a_2 i b_2 , te referentni parametri R_0 i t_0 , a svi oni prije svega ovise o tipu i karakteristikama goriva. Viegas (Viegas, 2006.) je odredio vrijednosti parametara za različite tipove gorivog materijala koje prikazuje Tablica 1. Slika 11. prikazuje vremenska ovisnost promijene brzine širenja požara $R = R' \cdot R_0$ i prijedeni put požarne linije za travnatu vegetaciju, početnu brzinu širenja požara od $R_0 = 0.18$ m/s i različite vrijednosti parametara koji odgovaraju:

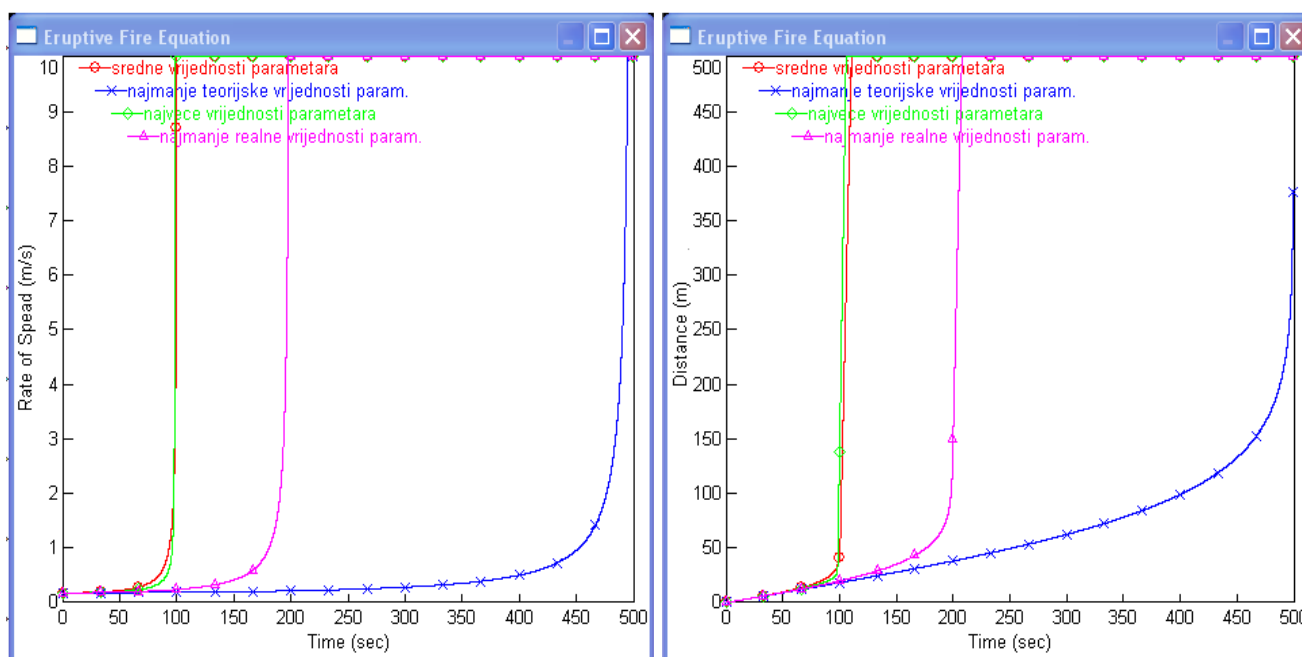
1. srednjim vrijednostima iz tablice 1: $a_1=1,4$; $b_1=2,3$; $a_2=0,01$; $b_2=1.5$ i $t_R=12$ s

2. najmanjim teorijskim vrijednostima koje daju najduže teorijsko vrijeme do izbijanja eruptivnog efekta: $a_1=1,0$; $b_1=2,0$; $a_2=0,002^*$ $b_2=1,5$ i $t_R=12$ s
3. najmanjim vrijednostima koje se mogu realno očekivati: $a_1=1,0$; $b_1=2,0$; $a_2=0,005^*$; $b_2=1,5$ i $t_R=12$ s i
4. najvećim koji daju najkraće vrijeme do izbijanja eruptivnog efekta: $a_1=3,0$; $b_1=2,5$; $a_2=0,01$; $b_2=2,0$ i $t_R=12$ s.

* *Napomena vezana uz parametar a_2 u kombinacijama 2. i 3.:* Ovaj je parametar najvažniji u odnosu na vrijeme od ulaska požarne fronte do početka eruptivnog efekta. Viegas navodi da se ovaj parametar teorijski može kretati u granicama od 0,001 do 0,01 za travnatu vegetaciju, s tim da je donja vrijednost određena proizvoljno i nije utvrđena mjerenjima. Realne vrijednosti kretale su se od 0,005 – 0,01. na primjer u pokusima sa suhim borovim iglicama vrijednost parametra a_2 je bila 0,0062. U simulacijama na Slici 11. ograničili smo donju najmanju teorijsku vrijednost na 0,002, smatrajući da manje od toga ne može biti, ali teško da se i ova vrijednost može postići. Puno realnija donja vrijednost ovog parametra je 0,005 pa smo zato u analizu uvrstili i ovu vrijednost kao najmanju koja se može realno očekivati.

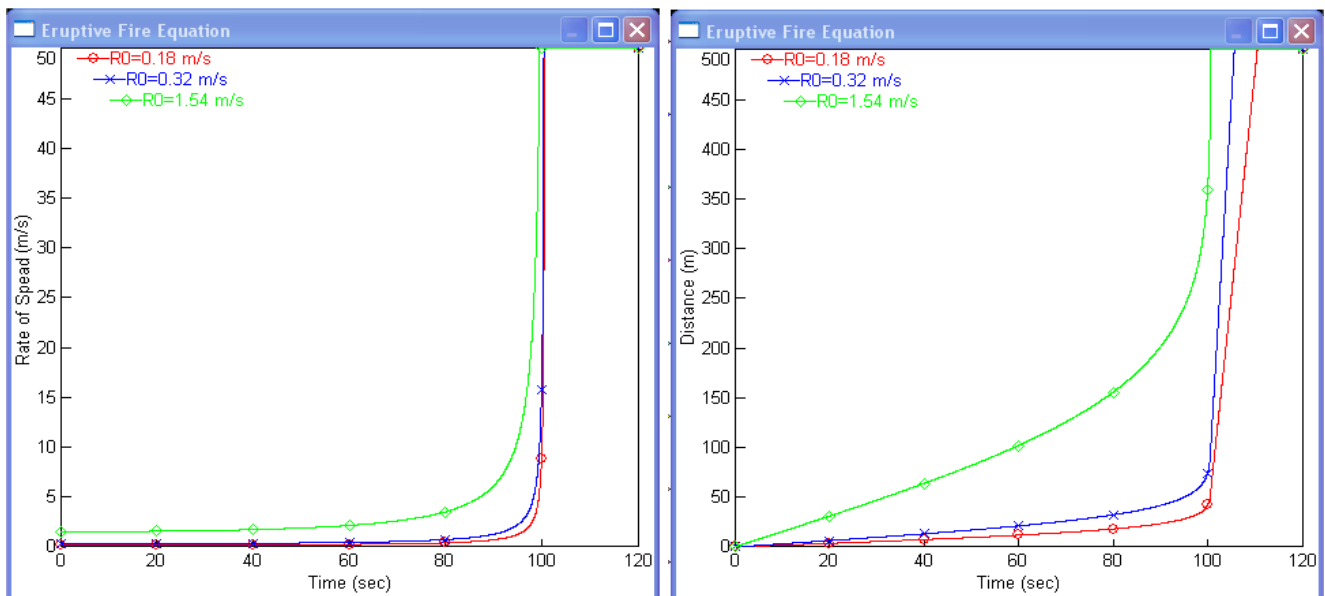
Tablica 1. Kretanje parametara modela eruptivnog požara za različite tipove goriva (Viegas, 2006.)

parametar	zeljasta vegetacija (engl. <i>Herbaceous</i>)	otpadni material (engl. <i>Litter</i>)	grmovi (engl. <i>Shrubs</i>)	posječeni ostaci (engl. <i>Slash</i>)
a_1	1 - 3	0,5 – 1,5	0,2 – 1	0,1 – 0,5
b_1	2 – 2,5	2 – 2,5	1,5 – 2,5	1 – 1,5
a_2	0,001 – 0,01	0,001 – 0,01	0,001 – 0,01	$10^{-5} - 10^{-4}$
b_2	1,5 - 2	1 – 1,5	1 – 1,5	0,5 - 1
t_R	10 - 50	30 - 100	100 - 1000	1000 - 10000
a_1'	1 - 3	0,5 – 1,5	0,2 - 1	0,1 – 0,5
a_2'	0,1 – 0,5	0,1 – 0,3	0,1 - 1	0,1 - 1



Slika 11. Vremenska promjena brzine širenja požara R (lijevo) i prijeđeni put požarne linije (desno)

Slika 12. prikazuje vremensku promjenu brzine širenja požara $R = R' \cdot R_0$ i prijeđeni put požarne fronte za travnatu vegetaciju, srednje vrijednosti parametara $a_1=1,4$; $b_1=2,3$; $a_2=0,01$; $b_2=1.5$ i $t_R=12$ s i različite početne vrijednosti osnovne ulazna brzina širenja požarne fronte brzina R_0 od 0,18 m/s, 0,32 m/s i 1,54 m/s.



Slika 12. Vremenska promjena brzine širenja požara R (lijevo) i prijeđeni put požarne linije (desno)

Vrijeme izgaranja t_R je stavljeno na 12 sekundi što je utvrđeno eksperimentima vezanim uz suhu travnatu vegetaciju Dalmacije (Španjol et al., 2011.). Trebamo i napomenuti da su početni uvjeti brzine $R'(0) = 1,000001$ (ova vrijednost mora biti bar malo veća od 1 da bi se diferencijalna jednadžba (10) mogla riješiti), a metoda integracije je adaptivni Runge Kutta petoga reda.

4.1.2.3. Pojava lako hlapljivih organskih komponenata kod mediteranske vegetacije koje potiču eruptivno razbuktavanje požara

Napomenimo i to da francuski autori kod eruptivnog razbuktavanja kada je gorivo mediteransko bilje naglašavaju značaj i drugih čimbenika osim pozitivne povratne veze i samo-prihrane energije. To je prije svega pojava lako hlapljivih organskih komponenata koje za vrućeg vremena ispušta vegetacija mediteranskog tipa pa se gomilaju u prostoru iznad vegetacijskog sloja. Tijekom vrućih ljetnih moguće je pojačano hlapljenje lako hlapljivih organskih komponenti mediteranske vegetacije koje se mogu gomilati na prostoru iznad vegetacije. Naglo zapaljenje ovih, inače lako zapaljivih para, može biti "okidač" pojave eruptivnog požara. Smatra se da su brojni mediteranski požari, kao na primjer požar u Palacu Corsica 2000 (2 poginula i 6 teško ranjenih) i požar u Les Pennes-Mirabeau na jugu Francuske 1989 (1 poginuli 1 teško ranjen) upravo uzrokovani ovom pojavom. Konzistentni matematički model ovakvog nastajanja eruptivnog efekta još ne postoji, a u literaturi je moguće pronaći samo detaljne opise događanja u kojima se može pronaći sličnosti i s Kornatskom nesrećom. Na primjer Peuch (Peuch, 2007.) detaljno analizira tri takva požara, uključujući i prije spomenuta dva, te zaključio da su u svim slučajevima bili ispunjeni slijedeći uvjeti:

- period: ljeto
- vrijeme: tijekom ili pri kraju dana
- meteorološki uvjeti: vrlo suho, vjetrovito i sunčano vrijeme
- vegetacija: mediteranska niska i grmolika vegetacija – rijetka stabla

- reljef: mali klanca ili usjeka i blagi nagibi
- vjetar na mikrolokaciji: uz samo tlo na području gomilanja hlapivih tvari male brzine, iako na lokaciji može biti i jaki .

Primijećeno je da se efekt nikada ne pojavljuje odmah nakon izbijanja požara, a uvijek je bila prisutna topologija klanca ili usjeka. Osnovno napredovanje vatre je bilo relativno sporo uz padinu ili niz padinu.

Kvalitativni opi događanja je slijedeći: Iz vegetacije se pod utjecajem sunca, ali i topline požara ubrzava hlapljenje lako hlapivih destilacijskih komponenti koje su teže od zraka. U normalnim uvjetima prolaskom požara izgara samo manji dio ovih para, a većina biva raspršena u prostor. Međutim moguće je i naglo izgaranje cjelokupne količine ovih para, a pogotovo ukoliko je gorenje popraćeno vjetrom izazvanim eruptivnim efektom izazvanim kosinom ili vjetrom opisanom u prošlom poglavlju. Naglo izgaranje cjelokupne količine hlapivih para izaziva dodatnu požarnu erupciju. U pojedinim slučajevima pogotovo vezanim uz konfiguraciju klanca ili usjeka moguće je da se u samom dnu klanca gomilaju hlapive komponente iz cijelog područja, pa je eruptivna reakcija još snažnija.

Posebno je zanimljivo jedno opažanje Peucha (Peuch, 2007.) koje u slobodnom prijevodu glasi:

"Ponekad je mogući naglo zapaljenje koncentriranih plinova i za jakog vjetra. Ukoliko struja vjetra, u posebnoj konfiguraciji reljefa, puše preko kanjona, sa jednog ruba prema drugom, ona može spriječiti dim i plinove da izađu iz kanjona. Plinovi su zatvoreni u virtualnom prostoru u kojem se koncentriraju. Ako vatrogasci uđu u zonu koncentracije, u trenu kada dođe do zapaljenja mješavine zraka i plinova izazvanih osnovnim požarom, vatrogasci su u velikoj opasnosti od požarne erupcije (blow-up) izazvane naglim zapaljenjem ovih lako zapaljivih plinova."

Požar u Les Pennes-Mirabeau na jugu Francuske 198.9 je i detaljno analiziran i na način da je se efekt nastojao ponoviti u kontroliranim laboratorijskim uvjetima, a posebna pažnja je dana analizi lako hlapivih komponenti iz uzoraka bilja. Iako se mediteranska eterična komponenta vegetacije temeljila na ružmarinu (*Rosmarinus officinalis*). Identificirane su slijedeće lako hlapive organske komponente (engl. VOC – Volatile Organic Components): Tricyclen, p-Cymen, α -Pinene, Limonene, Camphene, 1-8 Cineole, β -Pinene, γ -Terpinene, β -Myrcene, α -Terpinolene, α -Phellandrene, Camphor, β -Carene, Borneol, α -Terpinene . Značajno je i to da su ove hlapive komponente nevidljive i da se ne mogu detektirati standardnim detektorom plinova.

4.1.2.4. Kako se braniti od eruptivnog razbuktavanja požara?

Kako se braniti od eruptivnog razbuktavanja požara? Nikako. Količina energije koja se pri eruptivnom efektu oslobađa je tolika da se požar u ovoj fazi jednostavno ne može gasiti. Posljedica eruptivnog efekta je istovremeno gorenje velikog dijela padine ili klanca. Vegetacija na vrhu se upali prije nego prestane gorenje vegetacije na početku. Količina topline koja se oslobađa pri eruptivnom efektu je jednaka ukupnom zbroju količine topline oslobođene izgaranjem vegetacije na cijeloj padini, odnosno u cijelom klanecu koji gori, a tu se radi o ogromnim količinama toplinske energije i u slučaju vrlo oskudne vegetacije.

Zamislimo situaciju nagnutog klanca poluzatvorenog s gornje strane u kojem se razvio eruptivni efekt, a vjetar puše u smjeru osi klanca. Veliki dio energije izgaranja vegetacije na cijelom potezu koji gori biti će vjetrom "nabijen" u gornji poluzatvoreni dio klanca. Ilustrirati ćemo primjerom o kakvim se energijama može raditi i u slučaju relativno oskudne vegetacije. Neka je površina od 50.000 m², obrasla travnatom vegetacijom mediteranskog tipa s prosječno 0.6 kg/m². Gornja toplinska moć ovakvog goriva je oko 18.000 kJ/kg. Uz 12% vlage u gorivu prosječna toplinska energija oslobođena u prostor izgaranjem ovakvog goriva je oko 5.500 kJ/m², što znači da bi istovremeno gorenje površine od 50.000 m², što otprilike

odgovara području od 350 x 145 m, oslobodilo količinu topline od 275.000 MJ, odnosno oko 76 MWh. O kakvoj se energiji radi najbolje ilustrira podataka da je energija od 76 MWh dovoljna da žarulja od 100 W neprekidno gori 87 godina !

Jedina obrana od požara u eruptivnoj fazi je ne naći se na putu njegovog širenja. Eruptivno razbuktavanje požara se ne može zaustaviti. Od eruptivnog razbuktavanja požara se treba skloniti. Portugal je zemlja koja po konfiguraciji terena i tipu vegetacije ima dosta mjesta u kojima se eruptivni požar može pojaviti. Zbog toga svi portugalski vatrogasci prolaze posebnu obuku vezanu uz prepoznavanje uvjeta u kojima se eruptivno razbuktavanje požara može pojaviti. Kao najjednostavnije pravilo kojega se lako držati navodi se da se **požar raslinja, pogotovo lakih i brzo zapaljivih goriva poput suhe trave ne gasi sa padine iznad požara ili sa mjesta u gornjem višem dijelu nagnutog klanca iznad požara, ukoliko između požarne fronte i gasitelja postoji dovoljno goriva tvar.**

Što više, savjetuje se izbjegavanje položaji poput grebena i platoa iznad klanca ili strme padine. Velika količina topline i toplih plinova koju razvija eruptivno razbuktavanje požara može svojim naglim dolaskom ugroziti živote vatrogasaca i na takvim mjestima. Uz to posebno je opasno ukoliko vjetar puše u smjeru nagiba padine ili nagiba osnovne osi klanca. Događalo se da stradali zbog konfiguracije terena često i ne vide požar do trenutka kada se on eruptivnom brzinom penje uz padinu ili klanac, a tada je najčešće već kasno. Prof. Viegas, često ističe da je poseban problem podcjenjivanje požara travnatih površina, a one su u odnosu na eruptivno razbuktavanje požara izuzetno opasne.

4.1.2.5. Indikatori potencijalnog eruptivnog razbuktavanja požara

Na indikatorima potencijalnog eruptivnog širenja požara smo radili još tijekom razvoja protupožarnog nadzornog sustava STRIBOR OiV AI Fire Detect⁵, pa ga ovdje prenosimo u unaprijeđenoj verziji temeljenoj na radovima Viegasa o eruptivnom raspirivanju požara (Viegas, 2004.) i posebno na radu (Charleton et al., 2015.). Razlika u odnosu na dosadašnju verziju razvijenu u okviru EU projekta IPA Adriatic Holistic što se predlaže 1 klasa više (vidi Sliku 13.). Ovdje predlažemo ukupno 5 klasa, jednu vezanu s **eruptivnim razbuktavanjem izazvano kosinom** (engl *Slope-driven Eruptive Fire*) i 4 vezane s **eruptivnim razbuktavanjem izazvanim vjetrom** (engl. *Wind-driven Eruptive Fire*):

1. Eruptivno razbuktavanjem izazvano kosinom terena:

- Klasa I. – Mogućnost eruptivnog razbuktavanja požara uzrokovanog kosinom terena.

2. Eruptivno razbuktavanjem izazvano vjetrom i kosinom:

- Klasa II. – Mogućnost eruptivnog razbuktavanja požara uzrokovanog vjetrom i kosinom.
- Klasa III. – Velika mogućnost eruptivnog razbuktavanja požara uzrokovanog vjetrom i kosinom.
- Klasa IV. – Vrlo velika mogućnost eruptivnog eruptivnog razbuktavanja požara uzrokovanog vjetrom i kosinom.
- Klasa V. – Ekstremna mogućnost eruptivnog eruptivnog razbuktavanja požara uzrokovanog vjetrom, kosinom i vremenskim uvjetima.

Krenimo od osnovnih definicija:

⁵ <https://oiv.hr/en/services-and-platforms/oiv-fire-detect-ai/>

- **Brzina vjetra - MFWS** [m/s](engl. *Midflame Wind Speed*) – brzina vjetra na srednjoj visini plamena skalirana sa standardne 10 m visine. Skaliranje s 10 m na polovicu visine plamena ovisi o vrsti vegetacije (Scott, 2007.; Andrews, 2012.).
- **Smjer vjetra - WD** [°] (engl. *Wind Direction*) odgovara smjeru iz kojeg puše vjetar. Smjer vjetra 90° znači da vjetar puše s istoka (90°) prema zapadu (270°).
- **Ekspozicija - A** [°] (engl. *Aspect*) je podatak vezan uz teren koji kaže prema kojoj strani je nagnut teren (u kojem smjeru teren opada). Izražava se u °. Vrijednost 0° znači da je nagib okrenut prema sjeveru (npr. sjeverna strana planine, tako da se teren spušta sa juga prema sjeveru, pa planina “gleda” prema sjeveru).
- **Nagib - S** [° ili %] (engl. *Slope*) vezan je s kutom nagiba α [°] ili s % povećanja (+) ili smanjenja visine (-) terena:

$$S[\%] = \tan(\alpha) * 100\% \quad (11)$$

- **Podudarnost (korelacija) smjera vjetra i ekspozicije – rWDA**
 - Ako se ekspozicija A i smjer vjetra WD podudaraju: rWDA = 1 (npr. vjetar puše s istoka (90°), a ekspozicija je također orijentirana prema istoku (90°) što znači da teren pada prema istoku).
 - Ako su ekspozicija i smjer vjetra sa suprotnih strana: rWDA = 0 (npr. vjetar puše s istoka (90°), a ekspozicija je orijentirana prema zapadu (180°) što znači da teren raste prema istoku).
 - Za sve ostale kombinacije **rWDA** je između 0 i 1 a računa se jednadžbom normalizacije vektorske orijentacije koja se izvodi iz kosinusne sličnosti:

$$rWDA = 0,5 + 0,5 * \cos(WD - A) \quad (12)$$

Ako se kutovi podudaraju $\cos(0) = 1$, pa vrijednost rWDA = 1. Ako su kutovi suprotnog smjera $\cos(180) = -1$, pa vrijednost rWDA = 0. Za ostale kombinacije vrijednost je između 0 i 1.

- **Korekcija brzine vjetra zbog nagiba – MFWS_S** - poznato je da požar može uzrokovati povećanje brzine vjetra u odnosu na stanje da vjetra nema. Jedan od presudnih faktora je pora tome nagib. Korekcija brzine vjetra na polovici visine plamena definira se empirijskom jednadžbom (brzine vjetra su u m/s):

$$MFWS_S = MFWS + k * 0,447 \quad (13)$$

gdje koeficijent k ovisi o nagibu S:

$$\begin{aligned} k &= 0 \text{ za } S < 20^\circ \\ k &= 1 \text{ za } 20^\circ \leq S < 40^\circ \\ k &= 2 \text{ za } 40^\circ \leq S < 60^\circ \\ k &= 3 \text{ za } 60^\circ \leq S \end{aligned}$$

- **Kumulativni utjecaj nagiba i podudaranosti smjera vjetra i ekspozicije na brzinu vjetra na polovici visine plamena – MFWS_S_A**

$$MFWS_S_A = MFWS_S * rWDA \quad (14)$$

Na temelju ovako izračunatih veličina, kriteriji za određivanje klasa indikatora eruptivnog razbuktavanja požara su:

1. Klasa I. – Mogućnost eruptivnog razbuktavanja požara uzrokovanog kosinom terena – ako je nagib terena $S \geq 25^\circ$, bez obzira na smjer i brzinu vjetra. Granični nagib S od 25° je određen na temelju eksperimentalnog istraživanja (Charleton et al., 2015.) gdje na stranici 1356 autori kažu: „Eksperimenti se sastoje od pet pokusnih požara na laboratorij platformi pri nagibima od 15° , 20° , 25° , 30° i 35° . Kod tri manja nagiba požar se širi na uobičajen način, dok se pri dva veća nagiba opaža vrlo brzo širenje. Dakle, do eruptivnog požara dolazi između 25° i 30° nagiba.“ Ovu vrijednost potvrđuje i Slika 10. (Viegas, 2004.).
2. Klasa II. – Mogućnost eruptivnog razbuktavanja požara uzrokovanog vjetrom i kosinom – $MFWS_S_A \geq 2 \text{ m/s}$. Granična brzina vjetra od 2 m/s je određena na temelju eksperimenata prikazanih na Slici 10. (Viegas, 2004.) koji su potvrdili dualitet eruptivnog razbuktavanja uzrokovanog kosinom i vjetrom i pokazuje da eruptivno razbuktavanje počinje upravo kod ove brzine vjetra.
3. Klasa III. – Velika mogućnost eruptivnog razbuktavanja požara uzrokovanog vjetrom i kosinom – $MFWS_S_A \geq 2 \text{ m/s}$ i ekspozicija je južne orijentacije, što znači da teren pada prema južnim smjerovima, pa je više izložen insolaciji $A \in [135^\circ, 225^\circ]$. Zbog veće izloženosti insolaciji smanjuje se sadržaj vlage u gorivom materijalu, što ubrzava izgaranje, te povećava mogućnost eruptivnog razbuktavanja.
4. Klasa IV. – Vrlo velika mogućnost eruptivnog razbuktavanja požara uzrokovanog vjetrom i kosinom – $MFWS_S_A \geq 2 \text{ m/s}$, $A \in [135^\circ, 225^\circ]$ i vegetacijske klase odgovaraju travnatoj i grmolikoj vegetaciji. Prema (Charleton et al., 2015., str.1356) jedan od uvjeta pojave eruptivnog razbuktavanja je: „Vegetacija s niskom uzgonosti, slabo drvenasta, s dovoljnim opterećenjem gorivom.“. To znači da vegetacija ne stvara jak uzgon toplog zraka koji bi mogao usporiti vatru, već omogućuje brzo širenje požara. Primjeri takve vegetacije su: niska trava, suho lišće, grmlje, koja prema Albini-Anderson podjeli odgovara klasama od 1 – 5, a prema Scott-Burganovoj klasifikaciji klasama GR (101-109), GS (121- 124) i SH (141 – 149) (Stipaničev et al., 2024c.).
5. Klasa V. – Ekstremna mogućnost eruptivnog razbuktavanja požara uzrokovanog vjetrom i kosinom – $MFWS_S_A \geq 2 \text{ m/s}$, $A \in [135^\circ, 225^\circ]$, vegetacijske klase odgovaraju travnatoj i grmolikoj vegetaciji, visoka temperatura zraka ($T_a \geq 35^\circ\text{C}$) i mala relativna vlažnost zraka ($RH \leq 20\%$). Prema (Charleton et al., 2015., str. 1356) jedan od uvjeta pojave eruptivnog razbuktavanja je: „Loši meteorološki uvjeti za požare (visoka temperatura zraka i mala relativna vlažnost zraka.“ Visoka temperatura zraka povećava isušivanje vegetacije i olakšava zapaljivost, a niska relativna vlažnost smanjuje vlagu u gorivom materijalu, što ubrzava izgaranje. Za određivanje numeričkih pragova “loših meteoroloških uvjeta” u kontekstu požarne opasnosti, najbolje je koristiti pragove koji se obično primjenjuju u indeksima požarne opasnosti, poput kanadskog Fire Weather Index (FWI) i US National Fire Danger Rating System (NFDRS). Numerički pragovi za „visoku temperaturu” i „nisku relativnu vlažnost” su:

Visoka temperatura zraka (engl. *High Ambient Temperature T_a*):

$\geq 30^\circ\text{C}$ – općenito se smatra opasnim za šumske požare

$\geq 35^\circ\text{C}$ – vrlo visoka požarna opasnost

$\geq 40^\circ\text{C}$ – ekstremni uvjeti za požare koji se pojavljuju u mediteranskim područjima.

Niska relativna vlažnost (engl. *Low Relative Humidity RH*):

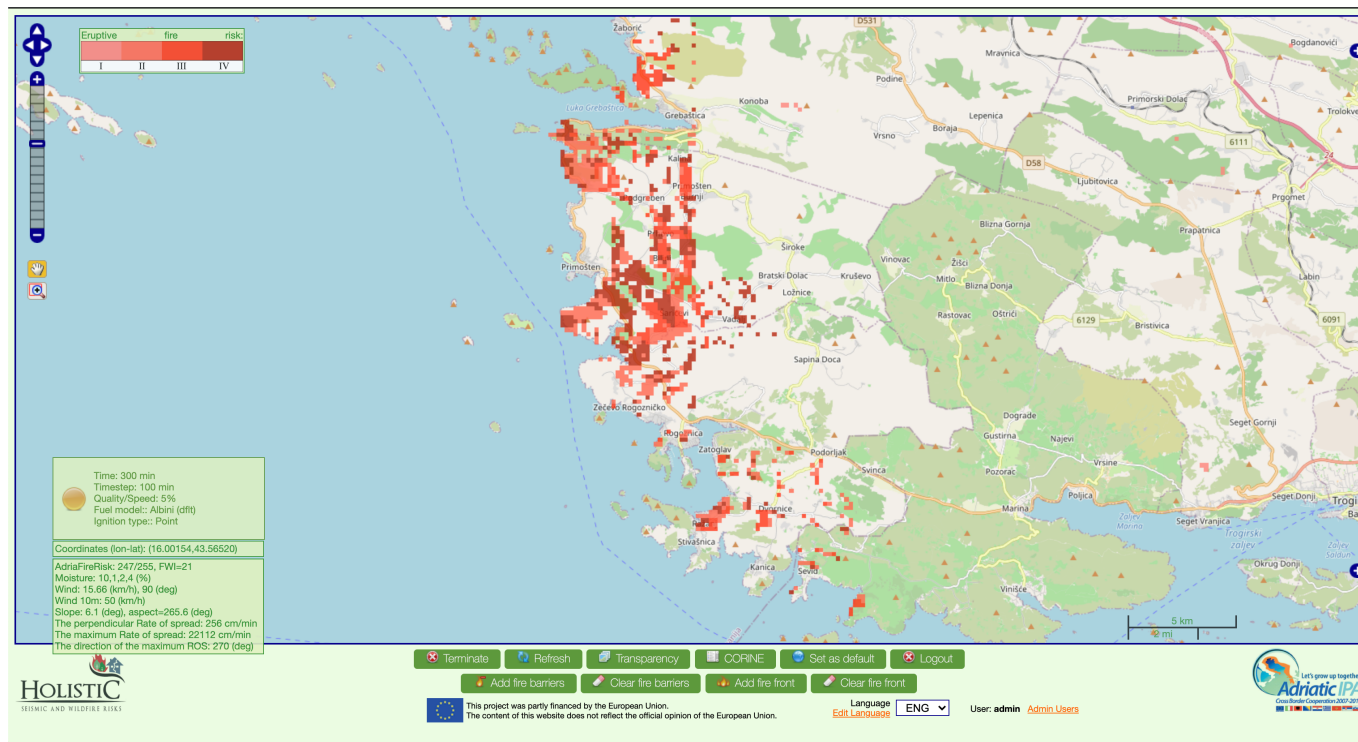
$< 30\%$ – požarna opasnost raste

$< 20\%$ – vrlo nepovoljni uvjeti koji pospješuju brzo širenje požara

$< 15\%$ – ekstremna opasnost od brzog širenja požara.

Na temelju ovih vrijednosti određeni su pragovi $T_a \geq 35^\circ\text{C}$ i $RH \leq 20\%$. Napomenimo i to da je istraživanje (Chetehouna et al., 2009) pokazalo da, ako su ljetne temperature ekstremne ($\geq 40^\circ\text{C}$), neki hlapljivi organski spojevi (engl. VOC - Volatile Organic Compounds) vjerojatno bivaju ispušteni iz goriva u dovoljnoj količini da zapaljenje počne na temperaturi nižoj od uobičajene temperature zapaljenja T_i koja je oko 550 K (277°C). Ovo posebno vrijedi za mediteransko područje.

Slika 13. prikazuje kartu dijela Dalmatinskih županija s označenim indikatorima mogućeg eruptivnog razbuktavanja požara u verziji razvijenoj tijekom EU projekta IPA Adriatic Holistic kod kojeg su postojale samo 4 klase. U ovoj unaprjeđenoj verziji dodana je i 5. klasa s ekstremnom mogućnosti pojave eruptivnog razbuktavanja požara.



Slika 13. Prikaz dijela Dalmatinskih županija s indikatorima mogućeg eruptivnog razbuktavanja požara različitih klasa eksperimentalno realiziranog u okviru IPA Adriatic Holistic projekta kod kojeg su definirane samo 4 klase

U okviru ovog izvještaja prilažemo i karte nagiba S i ekspozicije A za područje Hrvatske u rezoluciji 100 m. Prikazuju ih Slike 14. i 15. Izvor karti u 100 m rezoluciji je EU projekt Fire-Res - <https://www.cirgeo.unipd.it/fire-res/app/> prebačene u standardnu projekciju FirEUrisk projekta:

Coordinate Reference System (CRS)

Name: EPSG:3035 - ETRS89-extended / LAEA Europe

Units: meters

Method: Lambert Azimuthal Equal Area

Celestial Body: Earth

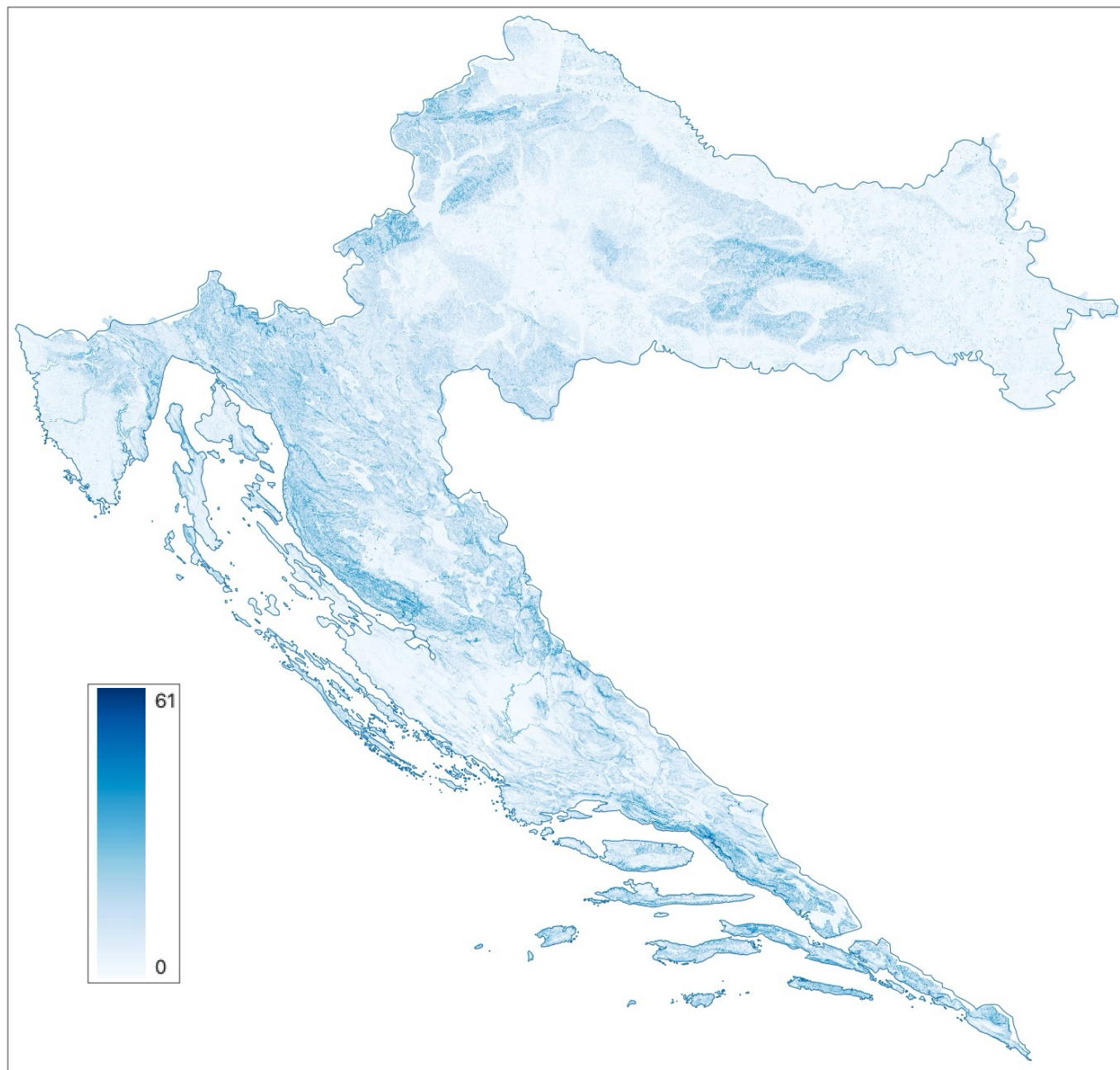
Accuracy: Based on European Terrestrial Reference System 1989 ensemble (EPSG:6258), which has a limited accuracy of at best 0.1 meters.

Reference: Static (relies on a datum which is plate-fixed)

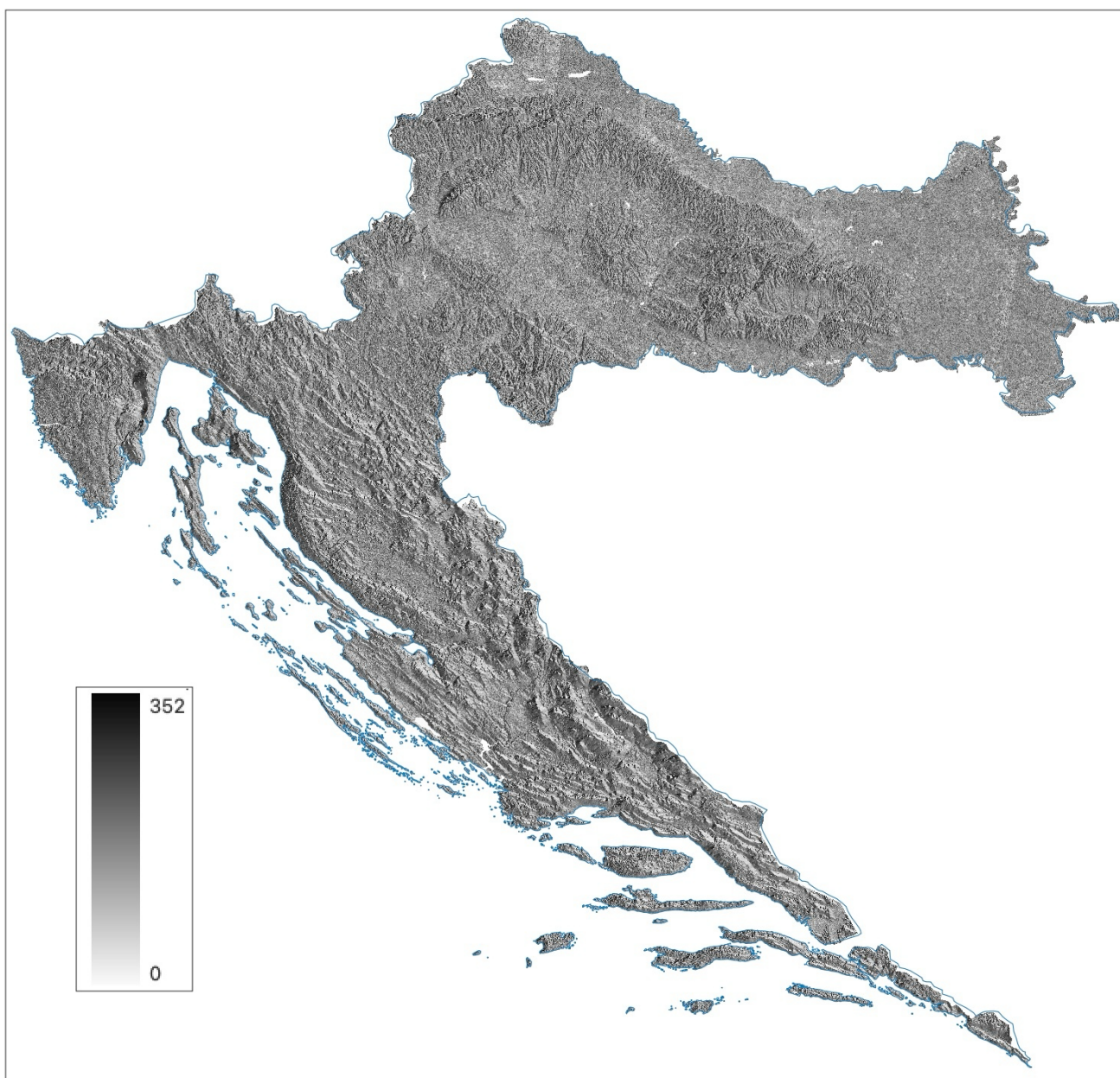
Extent: 4594914.0000000000000000,2163917.0000000000000000 :

5060914.0000000000000000,2624917.0000000000000000

Width: 4660
Height 4610
Pixel Size: 100,-100
No Value: -32768



Slika 14. Nagib S u $^{\circ}$ za područje republike Hrvatske u rezoluciji 100 m (izvor Fire-Res projekt - <https://www.cirgeo.unipd.it/fire-res/app/>)



Slika 15. Usmjerenost A u $[\text{m}]$ za područje republike Hrvatske u rezoluciji 100 m (izvor Fire-Res projekt - <https://www.cirgeo.unipd.it/fire-res/app/>)

4.1.3. Modeli širenja požara u krošnjama

Širenje goriva u krošnjama je malo kompleksnije i razvijalo se kroz nekoliko različitih modela. U FirEUrisk projektu korišteni su modeli (Scott & Reinhard, 2001.) koji se oslanjaju na sve prethodne modele. Detaljni opis modela i jednadžbi koje smo koristili prelazi okvire ovog diseminacijskog izvještaja, pa ćemo samo naglasiti neke značajke. Indikatori propagacijskog potencijala vezani uz požare u krošnjama su isti kao kod prizemnog (površinskog) širenja požara s tim da se može dodatno razlikovati o kojem tipu požara u krošnjama se radi. U kontekstu širenja požara kroz krošnje stabala postoje 4 osnovna tipa požara u krošnjama:

1. **Pasivni požar u krošnjama** (engl. *Passive Crown Fire*) je požar koji zahvaća krošnje stabala tako da pojedinačna stabla ili grupe stabala sagorijevaju (engl. *Torching*), zapaljena prolaskom vatrene fronte. Požar u kojem stabla discontinuirano sagorijevaju, ali brzina širenja požara je i dalje pod kontrolom površinskog požara. Sinonim je **intermitentni požar u krošnjama** (engl.

Intermittent Crown Fire). Plameni stupovi iz stabala pojačavaju brzinu širenja, ali ovi požari nisu bitno drugačiji od površinskih požara. Ilustrira ga Slika 16. (lijevo gore).

2. **Aktivni požar u krošnjama** (engl. *Active Crown Fire*) je požar koji napreduje s jasno definiranim zidom plamena, protežući se od površine tla do iznad sloja goriva u krošnjama. To je požar u kojem se razvija kontinuirani plamen unutar krošnji stabala, ali faze površinskog i krošnjastog požara napreduju kao povezana cjelina, međusobno ovisna. Vjerojatno je većina požara u krošnjama upravo ove vrste. Razvoj aktivnog požara krošnji zahtijeva značajan površinski požar, nakon čega se faze površinskog i krošnjastog požara šire kao jedinstvena cjelina. Sinonim je **ovisni požar u krošnjama** (engl. *Dependent Crown Fire*). Ilustrira ga Slika 16. (desno gore).
3. **Neovisni požar u krošnjama** (engl. *Independent Crown Fire*). Požar koji se širi isključivo kroz zračne slojeve goriva, bez oslanjanja na površinsku fazu požara. Ovaj tip požara više ne ovisi o površinskom požaru i može se samostalno širiti naprijed. Sinonim je brzopomični požar u krošnjama (engl. *Running Crown Fire*). Ilustrira ga Slika 16. (lijevo dolje).
4. **Uvjetni požar u krošnjama** (engl. *Conditional Crown Fire*). Požar se ne može razviti u požar u krošnjama ovom području, ali aktivni požar u krošnjama je moguć ako požar prijeđe na višu etažu šume izvan tog područja i proširi se u krošnje. Ilustrira ga Slika 16. (lijevo dolje).



Slika 16. Ilustracija razlike između pasivnog (gore-lijevo), aktivnog (gore-desno), neovisnog (dolje-lijevo) i uvjetnog (dolje-desno) požara u krošnjama.

Neovisni i uvjetni požari u krošnjama su rijetki, pa se indikatori propagacijskog potencijala vezani uz požare u krošnjama vežu samo uz pasivne i aktivne požare u krošnjama. Najprije se izračunaju standardni specifični indikatori:

1. **Aktivnost požara u krošnjama (CFA)** (engl. *Crown Fire Activity*) kojom se dodjeljuje vrsta požara na temelju dva parametra: **prijelaz na požar u krošnjama** [da/ne] koji se određuje na temelju površinskog intenziteta vatrene linije (FI) [kW/m] i kritičnog površinskog intenziteta vatrene linije (FI_0) koji definiraju kriterij za iniciranje požara u krošnjama ($CCFI$) i **uvjeta za aktivne požara u krošnjama** [da/ne] koji se temeljeni na brzini širenja požara u krošnjama ($CROS$) i kritičnoj brzini širenja požara u krošnjama ($CROS_0$) koji definiraju kriterij za aktivne požare u krošnjama (CAC). Razlikuju se četiri vrste požara (koje se obično na kartama označavaju brojevima od 0 do 3): 0 - površinski požar (prijelaz=ne, aktivni=ne), 1 - uvjetni požar u krošnjama (prijelaz=da, aktivni=ne), 2 - pasivni požar u krošnjama – zapaljenje (prijelaz=ne, aktivni=da) i 3 - aktivni požar u krošnjama (prijelaz=da, aktivni=da).

O načinu određivanja FI_0 i $CROS_0$ malo kasnije. Za sada spomenimo još i ostale indikatore propagacijskog potencijala požara u krošnjama:

2. **Udio izgorjele krošnje (CFB)** [frakcija] (engl. *Crown Fraction Burned*) - Frakcija između 0 i 1 koja označava ozbiljnost požara u krošnjama. Predstavlja udio krošnji drveća zahvaćenih požarom na određenom području koje će izgorjeti. I on se može koristiti za procjenu da li se radi o površinskom požaru, pasivnom požaru u krošnjama ili aktivnom požaru u krošnjama. Ako je CFB manji od 10% požar se smatra površinskim, ako je između 10 i 90% pasivnim požarom u krošnjama, dok je se za više od 90% smatra da se radi o aktivnom požaru u krošnjama.

Slijedeći korak je proračun standardnih indikatora propagacijskog potencijala:

3. **Brzina širenja požara u krošnjama (CROS)** [m/s]. Linearna brzina napredovanja plamene fronte krošnjastog požara (aktivnog ili pasivnog) prema nezapaljenom gorivu okomito na vatrenu liniju.
4. **Toplinska energija požara u krošnjama po jedinici površine (CHA)** [kJ/m²]. Količina oslobođene topline po jedinici površine plamene fronte krošnjastog i površinskog požara.
5. **Intenzitet požara u krošnjama na vatrenoj liniji (CFI)** [kW/m] [kJ/(m·s)]. Također poznat kao Byramov požarni intenzitet. Osnovna karakteristika požara koja izražava toplinsku energiju oslobođenu po jedinici vremena iz pojasa širine jednog metra u sloju goriva od prednje do stražnje strane plamene zone.
6. **Duljina plamena požara u krošnjama (CFL)** [m]. Koristi se kao indikator intenziteta vatrene linije.

Kod proračuna indikatora propagacijskog potencijala požara u krošnjama ulazni podaci su:

Standardnim parametri vremena, terena i goriva:

- **Brzina vjetra i smjer** - Jaki vjetrovi mogu uzrokovati brzo širenje požara i mogu prenijeti plamen u krošnje drveća.
- **Teren** - Strme padine, kanjoni ili područja sa složenom topografijom mogu stvoriti zračne tunele i druge uvjete koji povećavaju rizik od požara. Parametri terena su nadmorska visina, nagib i aspekt.
- **Vlažnost goriva** - Suha goriva poput suvog lišća, grana i iglica mogu povećati vjerojatnost paljenja i širenja požara. Za požare u krošnjama posebno je važan **sadržaj vlage u lišću**.

- **Vremenski uvjeti** - Visoke temperature, niska relativna vlažnost zraka i sušni uvjeti mogu povećati rizik od paljenja i širenja požara. Vremenski uvjeti obično su uključeni u izračun vlažnosti goriva.
- **Karte goriva i modeli goriva** – Krunski požari povezani su samo s modelima goriva u šumi, stoga je važno imati karte goriva s odgovarajućom kategorizacijom modela goriva. U modelima šumskog goriva FirEUrisk kategorije goriva počinju s 1 kao što pokazuje Tablica 2:

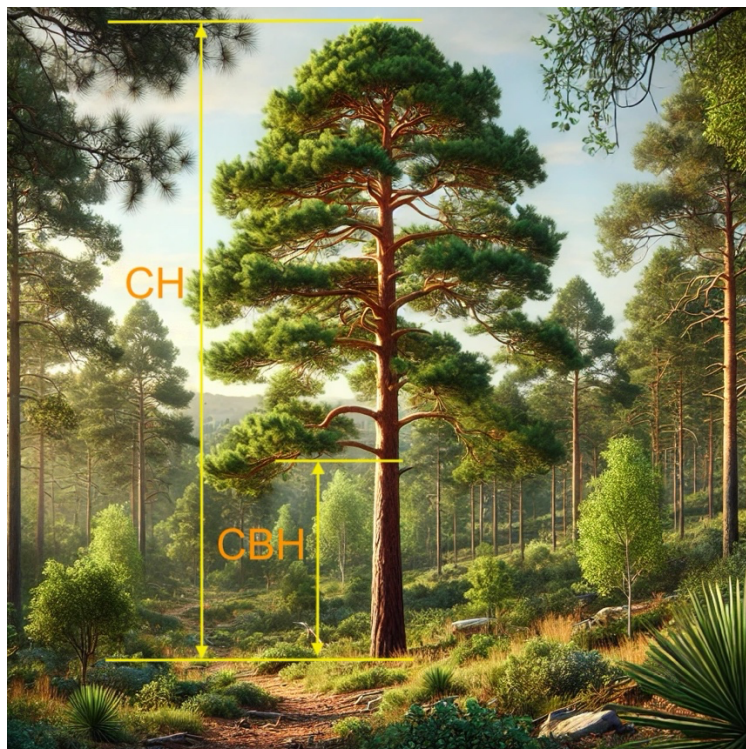
Tablica 2: FirEUrisk hijerarhijski sustav klasifikacije goriva za šumska goriva prisutna na teritoriju EU (Stipaničev et al., 2024d.)

Prva razina		
	Vrsta lista - Fenologija	Gustoća pokrova (%)
1. Šume	11. Širokolisni 112. Listopadni	1121. Otvoreno [15-70%]
		1122. Zatvori [70-100%]
	12. Igličasta 121. Zimzelena	1211. Otvoreno [15-70%]
		1212. Zatvori [70-100%]
	13. Mješoviti	1301. Otvoreno [15-70%]
		1302. Zatvori [70-100%]

Specifični parametri vezani uz karakteristike krošnje šume su:

- **Visina krošnje** (engl. *CH - Canopy Height*) [m] je mjera vertikalne udaljenosti između površine tla i vrha vegetacijske krošnje. Visina krošnje opisuje prosječnu visinu stabala unutar sastojine. U modelima širenja požara krošnji, visina krošnje množi se s volumetrijskom gustoćom krošnji kako bi se dobila masa krošnje, koja se koristi za izračun duljine plamena krošnje.
- **Pokrov krošnje** (engl. *CC - Canopy Cover*) [udio ili %] je mjera gustoće krošnje. Drveće s gušćim krošnjama ima veću vjerojatnost da će omogućiti širenje vatre s jedne krošnje na drugu, stvarajući kontinuirani put kojim se vatra može širiti. Odnosi se na količinu područja na određenoj lokaciji koje je prekriveno vegetacijom kada se gleda odozgo. Pokrov krošnje obično se izražava kao postotak ukupne površine i može značajno varirati ovisno o vrsti i gustoći prisutne vegetacije.
- **Visina baze krošnje** ((engl. *CBH - Canopy Base Height*) [m] označava vertikalnu udaljenost od tla do najnižih grana krošnje stabla. Visina baze krošnje pojedinog stabla definira se kao visina na kojoj postoji dovoljna gustoća goriva da podrži zapaljenje krošnje. Visina baze krošnje uzima u obzir i glavni sloj krošnje i ljestvičasta goriva u podrastu koja se odnose na vegetaciju između tla i krošnji stabala te omogućuju vatri da se širi s tla prema krošnjama. CGH je važan parametar za rizik od požara krošnji. Visina baze krošnje i sadržaj vlage u lišću koriste se za izračunavanje kritičnog intenziteta požara potrebnog za prijelaz s požara površine na požar krošnji. Stabla s nižim visinama baze krošnje imaju veću vjerojatnost da će omogućiti požarima na tlu da se popnu u krošnje, potencijalno zapalivši krošnje i dovodeći do požara krošnji. Visina baze krošnje može se značajno razlikovati ovisno o vrsti, starosti i uvjetima staništa stabla, a može biti pod utjecajem praksi upravljanja poput prorjeđivanja ili orezivanja. Na slici 15. prikazana je razlika između visine krošnje (CH) i visine baze krošnje (CBH).
- **Volumetrijska gustoća krošnje** (engl. *CBD - Canopy Bulk Density*) [kg/m³] je mjera mase krošnje stabla po jedinici volumena krošnje. Ona opisuje težinu goriva krošnje po jedinici volumena krošnje. Koristi se za izračun ulaznih podataka o masi goriva krošnje za generiranje topline po jedinici površine tijekom aktivnog požara krošnje. Volumetrijska gustoća krošnje također se koristi za izračunavanje kritične brzine širenja požara krošnje, što određuje prag potreban za prijelaz na aktivni požar krošnje. Izračunava se dijeljenjem suhe mase krošnje njezinim

volumenom. Volumetrijska gustoća krošnje može pružiti informacije o strukturi i stanju krošnje stabla, kao i o njegovom potencijalu za rizik od požara. Veća volumetrijska gustoća krošnje može ukazivati na kompaktnije i potencijalno zapaljivije lišće, dok manja volumetrijska gustoća krošnje može ukazivati na otvorenije i manje zapaljivo lišće.



Slika 17. Uz definiciju visine krošnje (CH) i visine baze krošnje (CBH).

Sve ove mape za Hrvatsku smo objavili uz diseminacijski izvještaj (Stipaničev et al., 2024d.)

U nastavku kratko opisujemo kako se računaju svi indikatori požarnog potencijala požara u krošnjama.

4.1.3.1. Brzina širenja požara u krošnjama (CROS)

Rothermelov model širenja požara u krošnjama (Rothermel, 1991) izračunava brzinu širenja (ROS) za aktivne požare u krošnjama. Za pasivne požare u krošnjama pretpostavlja se da je brzina širenja jednaka brzini širenja površinskog požara.

Brzina širenja aktivnog požara u krošnjama odnosi se na brzinu širenja požara prema naprijed, tj. na čelnoj liniji. To predstavlja ukupnu brzinu širenja požara tijekom duljeg vremenskog razdoblja (nekoliko sati) i implicitno uključuje učinke prijenosa požara iskrenjem (engl. *Spotting*). Model ne uzima u obzir strukturu krošnje drveća (engl. *Overstory*). Brzina širenja aktivnog požara u krošnjama izračunava se na temelju brzine vjetra i vlažnosti goriva na površini tla.

Rothermelov model širenja aktivnog krošnjanskog požara nije temeljen na fizičkim zakonima, već je jednostavna korelacija između brzina širenja nekoliko krošnjanskih požara i izračuna Rothermelovog modela površinskog požara (Rothermel, 1972). Model ne uključuje opis niti površinskog niti goriva u krošnjama. Ovisi samo o brzini vjetra na visini od 6,1 m (20 stopa) i vlažnosti goriva na površini tla, te se vezuje uz brzinu širenja površinskog požara Albini-Anderson modela 10 (A-A 10) – drvo (stelja i podzemlje) ROS_{10} (Anderson, 1982.). Napomenimo da se pretpostavlja se da brzina vjetra na srednjoj visini plamena u modelu goriva 10 iznosi 40% brzine vjetra na visini od 6,1 m (20 stopa).

Rothermel je definirao dvije vrijednosti brzine požara u krošnjama. Prvu je nazvao *prosječnom brzinom širenja*. Također sugerira da *skoro maksimalna brzina širenja* može biti 1,7 puta veća od ove prosječne vrijednosti.

$$\text{prosječni CROS} = 3,34 \cdot \text{ROS}_{10} \quad (15)$$

$$\text{skoro maksimalni CROS} = 1,7 \cdot \text{prosječni CROS} = 5,678 \cdot \text{ROS}_{10} \quad (16)$$

2005. god. (Cruz et al., 2005.) je predložio i treći model koji po vrijednosti daje još veću vrijednost CROS. Naše istraživanje u okviru FirEUriSk projekta (Stipaničev et al., 2023b.) je pokazalo da je za određivanje kriterija CAC najbolje uzeti *skoro maksimalni CROS* prema Rothermelovom modelu koji daje vrijednost između *srednjeg CROS* i Cruz et al. modela:

$$\text{CROS} = \text{skoro maksimalni CROS} \quad (17)$$

4.1.3.2. Aktivnost požara u krošnjama (CFA)

Kod aktivnost požara u krošnjama (CFA) važna su dva specifična parametra:

- da li je moguć prijelaz na požar u krošnjama i
- da li su ispunjeni uvjeti za aktivne požare u krošnjama.

Ispunjenje prvog uvjeta vezano je uz kriterij za iniciranje požara u krošnjama (engl. *CCFI - Criterion for Crown Fire Initiation*) koje je definirao davne 1977. g. Van Wagner (Van Wagner, 1977.). *CCFI* ovisi o intenzitet površinskog požara na vatrenoj liniji FI i kritičnom intenzitetu požara na vatrenoj liniji FI_0 koji se računa jednadžbom:

$$FI_0[kW/m] = (C \cdot CBH[m] \cdot (460 + 25,9 \cdot FMC[\%]))^{1,5} \quad (15)$$

C je konstanta koju je Van Wagner procijenio na 0,01 na temelju jednog eksperimentalnog požara provedenog u sastojini plantaže crvenog bora (*Pinus resinosa*) ($CBH = 6$ m, $FMC = 100\%$, $I_0 = 2500$ kW/m). CBH je visina baze krošnje, a FMC sadržaj vlage u lišću (engl. *Fuel Moisture Content*) koji predstavlja sadržaj vlage iglica četinjaka u krošnjama.

Umjesto intenziteta vatrene linije može se koristiti i duljina plamena FL [m], jer ona ovisi samo o intenzitetu vatrene linije. Kritična duljina plamena može se izračunati pomoću jednadžbe:

$$FL_0[m] = 0,13716 \cdot (I_0[kW/m])^{0,46} = 0,13716 \cdot (C \cdot CBH \cdot (460 + 25,9 \cdot FMC))^{0,69} \quad (16)$$

Kriterij za iniciranje požara u krošnjama (*CCFI*) definira se jednadžbom:

$$CCFI = FI / FI_0 = FL / FL_0 \quad (17)$$

Van Wagner kriterij za mogućnost pojave požara u krošnjama je:

- (i) Ako je $CCFI < 1$ imamo samo prizemni (površinski) požar.
- (ii) Ako je $CCFI \sim 1$ imamo prijelaz s površinskog požara na požar u krošnjama.
- (iii) Ako je $CCFI > 1$ imamo požar u krošnjama.

Iako su u međuvremenu predloženi drugi modeli inicijacije požara u krošnjama (Cruz & Alexander, 2010.) Van Wagnerov model inicijacije požara u krošnjama i danas se koristi u gotovo svim sjevernoameričkim sustavima za predviđanje ponašanja požara (kanadski FBA i Prometheus, BehavePlus, Firesite i FlamMap), ali uvijek s nekim početnim ograničenjima na ulazne varijable:

- Minimalna volumetrijska gustoća krošnje (CBD) za definiranje visine baze krošnje (CBH). Predložene su različite vrijednosti, a najniža je za Scot i Reinhard model (Scott & Reinhard, 2001.): $0,011 \text{ kg/m}^3$.

- Prag za kritični intenzitet površinskog požara da bi uopće moglo doći do požara u krošnjama koji je predložio Rothermel (Rothermel, 1983.): 3460 kW/m.

Ispunjenje uvjeta da li požar u krošnjama može biti i aktivni požar ovisi o kriteriju za pojavu aktivnog požara u krošnjama (engl. *CAC - Criterion for Active Crowning*) koji se definira kao omjer brzini širenja požara u krošnjama (*CROS*) i kritičnoj brzini širenja požara u krošnjama (*CROS₀*):

$$CAC = CROS / CROS_0 \quad (18)$$

Kritična brzina širenja požara u krošnjama (*CROS₀*) jednostavno se računa na temelju volumetrijske gustoće krošnji *CBD* [kg/m³]:

$$CROS_0 = 0,05 / CBD \quad (18)$$

CBD ima i dodatna ograničenja (Cruz et al., 2005.):

- Nema pasivnih požara u krošnjama ako je $CBD < 0,05 \text{ kg/m}^3$
- Nema aktivnih požara u krošnjama ako je $CBD < 0,11 \text{ kg/m}^3$

Pravilo za određivanje mogućih aktivnih požara u krošnjama su:

- Ako je $CAC < 1$ očekuje se da će prevladati površinska vatra ili pasivni požar u krošnjama.
- Ako je $CAC > 1$ mogući je aktivni požar u krošnjama.

Vraćamo se sada do određivanja aktivnosti požara u krošnjama (*CFA*). Moguće su četiri situacije:

- $CCFI < 1$ & $CAC < 1 \rightarrow$ prizemni (površinski) požar
- $CCFI < 1$ & $CAC \geq 1 \rightarrow$ uvjetni požar u krošnjama
- $CCFI \geq 1$ & $CAC < 1 \rightarrow$ pasivni požar u krošnjama
- $CCFI \geq 1$ & $CAC \geq 1 \rightarrow$ aktivni požar u krošnjama.

4.1.3.3. Udio izgorjele krošnje (*CFB*)

Van Wagner (Van Wagner 1993.) predložio je metodu za izračunavanje udjela izgorjele površine (*CFB*) [frakcija] koja uzima u obzir volumetrijsku gustoću krošnje (*CBD*) kroz kritičnu brzinu širenja požara u krošnjama (*CROS₀*):

$$CFB[\text{frakcija}] = 1 - e^{(-0.23 \cdot (ROS[m/s] - CROS_0[m/s]))} \quad (21)$$

4.1.3.4. Toplinska energija požara u krošnjama po jedinici površine (*CHA*)

Količina oslobođene topline po jedinici površine plamene fronte požara u krošnjama [kJ/m²] računa se izrazom:

$$CHA[\text{kJ/m}^2] = CFB[\text{frakcija}] \cdot CFL[\text{kg/m}^2] \cdot h_c[\text{kJ/kg}] \quad (22)$$

CFB je prethodno spomenuti udio izgorjele krošnje, *CFL* je količina goriva u krošnjama [kg/m²] koja se može izračunati iz volumetrijske gustoće krošnje (*CBD*) [kg/m³] i dubine krošnje (*CD*) [m]:

$$CFL[\text{kg/m}^2] = CBD[\text{kg/m}^3] \cdot CD[\text{m}] \quad (23)$$

Dubina krošnje (*CD*) može se procijeniti iz visine krošnje (*CH*) i visine baze krošnje (*CBH*):

$$CD[\text{m}] = CH[\text{m}] - CBH[\text{m}] \quad (24)$$

Važno je naglasiti da se dubina krošnje ponekad definira drugačije, ali ovo bi mogla biti zadovoljavajuća procjena. Također u tablicama parametara modela goriva za različite kategorije modela goriva (Scott & Burgan, 2005.) postoji parametar pod nazivom *količina živog goriva*, odvojeno definiran za živo zeljasto i živo drvenasto gorivo. Živo drvenasto bi se mogao koristiti za procjenu *CFL*, pa bi bilo 0 za sve modele goriva bez drva. Na primjer, za Albini-Andersonov model goriva 10 - Drvo (stelja i podzemlje) (Anderson, 1982.) koji koristi Rothermel za definiranje aktivnog požara u krošnjama količina živog drvenastog goriva je $4,4834 \text{ [t/ha]} = 0,44834 \text{ [kg/m}^2\text{]}$.

h_c je toplinski sadržaj goriva u krošnjama. On za sva goriva 18622 kJ/kg ili 8000 Btu/lb.

4.1.3.5. Intenzitet požara u krošnjama na vatrenoj liniji (CFI)

Također poznat kao Byramov požarni intenzitet. Predstavlja osnovnu karakteristiku požara koja izražava toplinsku energiju oslobođenu po jedinici vremena iz pojasa širine jednog metra u sloju goriva od prednje do stražnje strane plamene zone, a računa se jednadžbom:

$$CFI[kW/m] = CHA[kJ/m^2] \cdot CROS[m/s] \quad (25)$$

4.1.3.6. Duljina plamena požara u krošnjama (CFL)

Koristi se kao indikator intenziteta vatrene linije i direktno je proporcionalan intenzitetu požara u krošnjama na vatrenoj liniji. Računa se izrazom (Thomas, 1963.):

$$CFL [m] = 0,02665 \cdot (CFI[kW/m])^{0,667} \quad (26)$$

Ova formula se razlikuje od jednadžbe (5) za površinske požare prema (Byram, 1959.). Duljina plamena požara u krošnjama važna je varijabla za određivanje udaljenosti prebacivanja požara iskrenjem (engl. *Spotting*).

5. Pripreme meteoroloških podataka za proračun propagacijskog potencijala vezanog uz povijesne požare

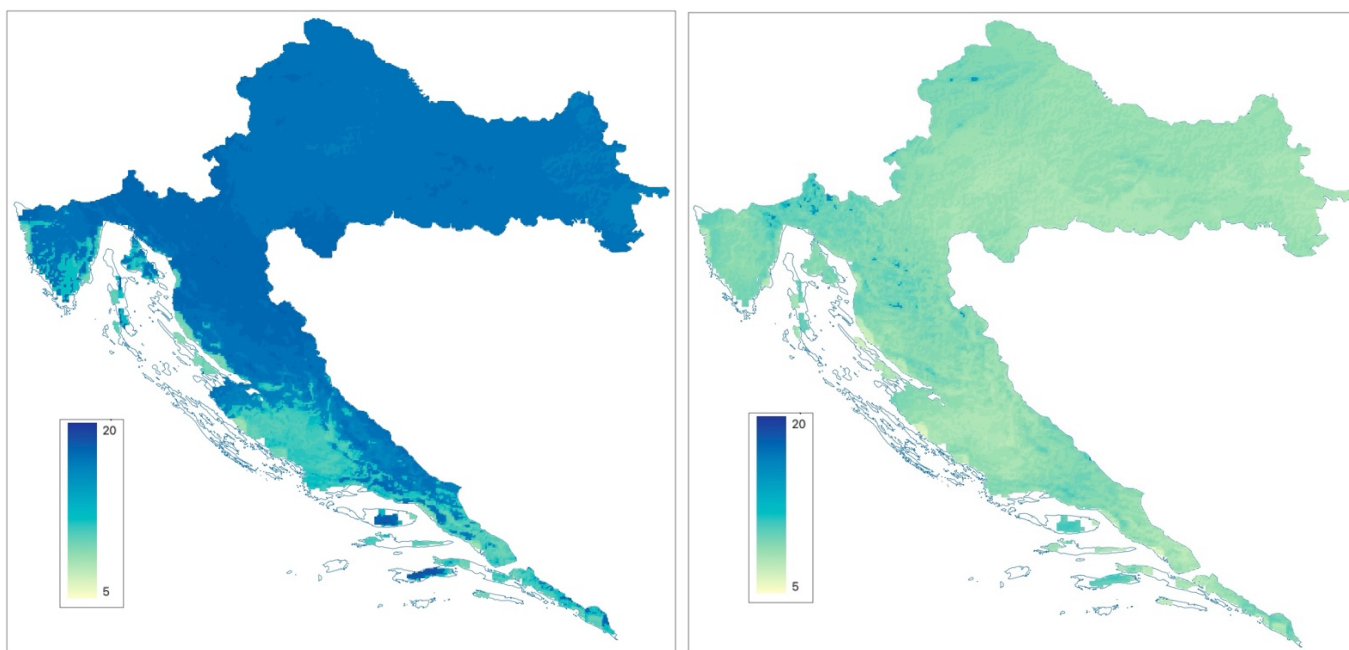
U okviru FirEURisk projekta propagacijski potencijal za povijesne požare računat je na dva različita načina, ovisno o tome da li se radi o području cijele Europe u rezoluciji 1 km ili o pilot područjima u rezoluciji 100 m. U fazi testiranja oba postupka smo primijenili na naše demonstracijsko područje DA20 – Splitsko – dalmatinsku županiju, pa ćemo na njenom primjeru objasniti razliku.

5.1. Postupak 1. - priprema meteoroloških podataka za povijesne požare na području Europe veće od 2000 ha u rezoluciji 1 km

Prvi postupak se temelji na povijesnim požarima Europi većih od 2000 ha od 1.01.2001.g. do 31.12.2019.g. Bilo ih je ukupno 403, od kojih je najmanji imao 2043 ha, najveći 304958 ha, a statistička sredina je bila 8877 ha. Za sve ove požare iz baze Copernicus baze ERA5 (ERA5, 2024.) izvučeni su podaci o vremenskim uvjetima na dane ovih velikih požara za cijelu Europu u rezoluciji 1 km. Na temelju 403 GeoTiff karti za sadržaj vlage srednjeg mrtvog goriva (10h goriva) i brzinu vjetra MeteoGrid je izračunao GetTiff karte za dva vremenska scenarija:

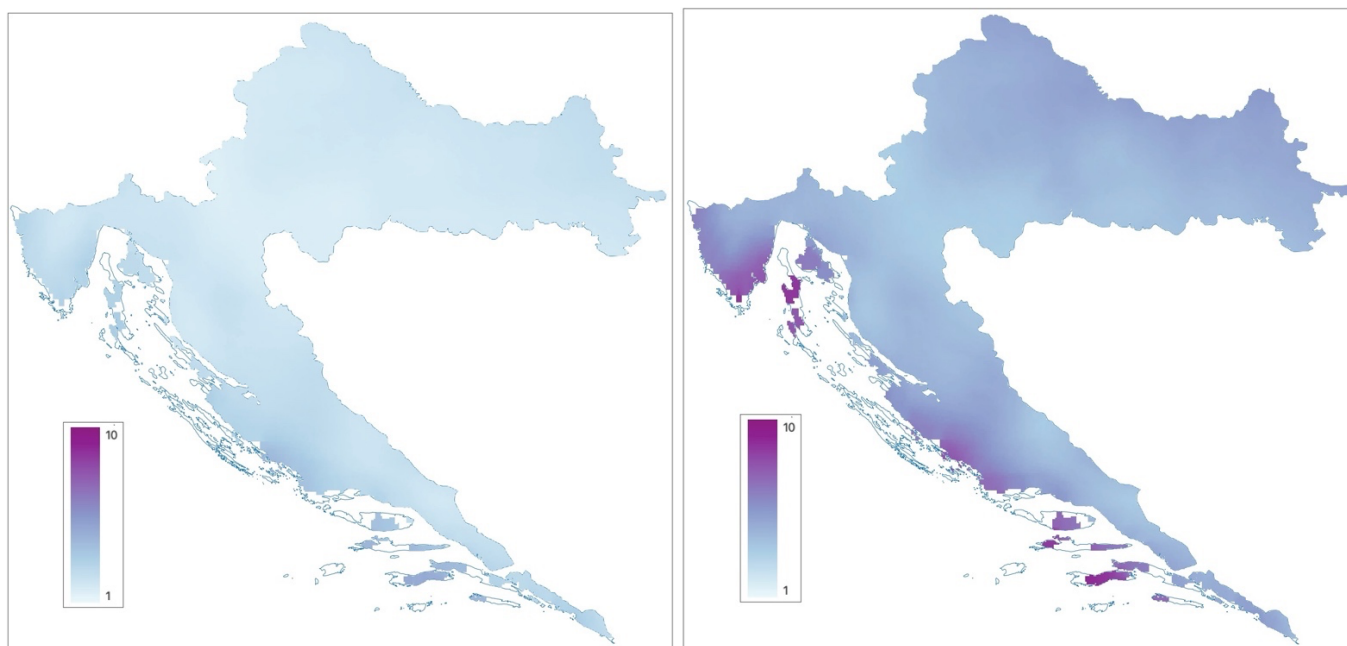
- (i) prosječni uvjeti (50. percentil) i
- (ii) ekstremni uvjeti (95. percentil za brzinu vjetra i 5. percentil za sadržaj vlage goriva).

Iz ovih karata izvukli smo karte Hrvatske koje su sastavni dio ovog dokumenta. Karte su iz izvorne rezolucije od 1 km prebačene u rezoluciju 100 m. Kao primjer Slike 18. i 19. prikazuju karte za ekstremne uvjete (5. percentil za sadržaj vlage i 95. percentil za brzinu vjetra) i srednje vrijednosti (50. percentile).



Slika 18. Srednje vrijednosti (50. percentil)(lijevo) i ekstremne vrijednosti (5. percentil) (desno) sadržaja vlage 10h (srednjeg) mrtvog goriva [%] za povijesne Europske požare veće od 2000 ha

Tablica 3. prikazuje minimalne, maksimalne i srednje vrijednosti sadržaja vlage 10h goriva i brzine vjetra za srednju i ekstremnu situaciju.



Slika 19. Srednje vrijednosti (50. percentil)(lijevo) i ekstremne vrijednosti (95. percentil) (desno) brzine vjetra [m/s] za povijesne Europske požare veće od 2000 ha

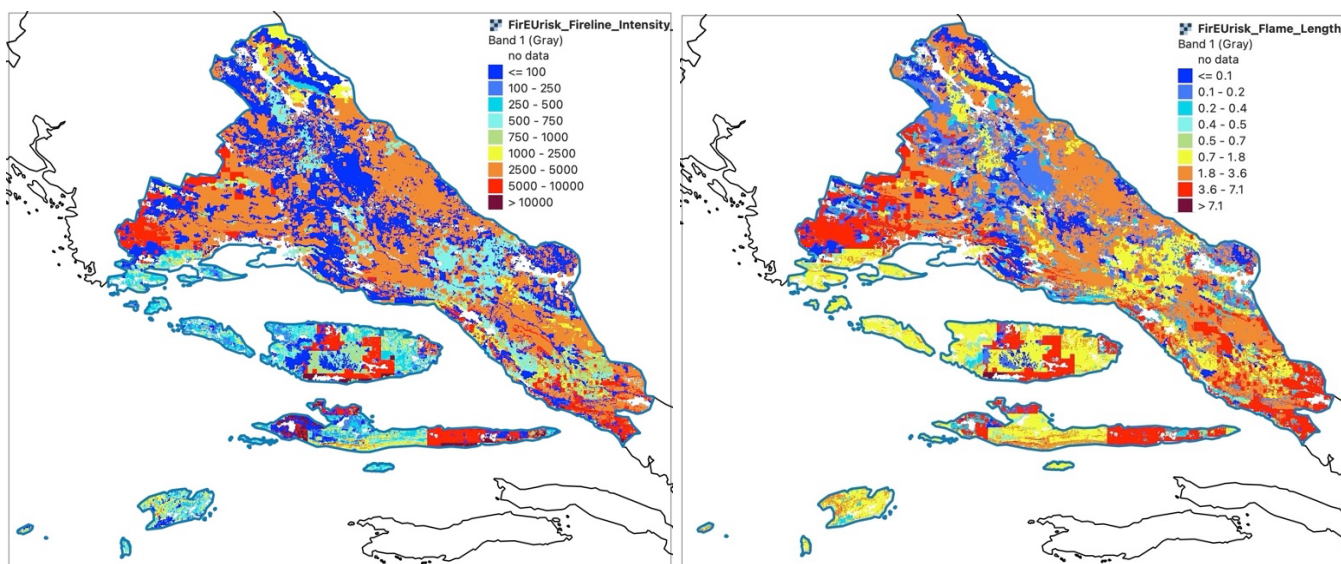
Tablica 3. Minimalne, maksimalne i srednje vrijednosti sadržaja vlage 10h goriva i brzine vjetra za srednju i ekstremnu situaciju

	minimalna	srednja	maksimalna
10h sadržaj vlage srednja [%]	8,33	16,18	18,67
10h sadržaj vlage ekstremna [%]	6,03	8,76	15,83
brzina vjetra srednja [%]	1,50	2,18	4,70
brzina vjetra ekstremna [%]	3,19	4,46	8,19

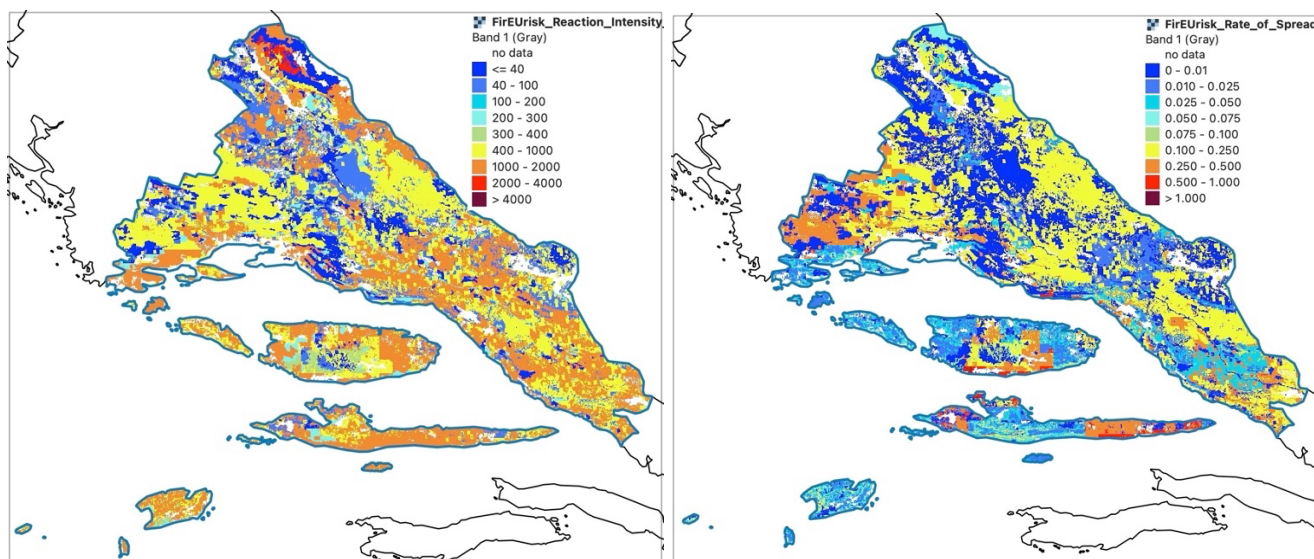
Na slikama se vidi da su karte dosta grube zbog velike početne rezolucije pa na primjer ne pokrivaju većinu otoka. Zbog toga smo kod proračuna propagacijskog potencijala za naše demonstracijsko područje DA20 – Splitsko – dalmatinsku županiju za dijelove otoka koji nisu imali vrijednosti ovih varijabli stavile srednje vrijednosti za DA20 područje koje se malo razlikovalo u odnosu na Hrvatsku (9% za ekstremni 10h sadržaj vlage, 4,51 m/s za ekstremnu brzinu vjetra, 14,38% za srednji 10h sadržaj vlage, 2,45 m/s za srednju brzinu vjetra,).

Slika 20. prikazuje primjer izračuna intenziteta požarne linije i duljine plamena za ove podatke temeljene na velikim Europskim požarima. Slika 21. prikazuje primjer izračuna intenziteta reakcije i brzine širenja požara za podatke temeljene na velikim Europskim požarima.

Ove rezultate ćemo u nastavku usporediti s rezultatima dobivenim drugim postupkom pripreme meteoroloških podataka temeljenih na povijesnim požarima.



Slika 20. Intenzitet vatrene linije (FI) [kW/m^2] i duljine plamena (FL)[m] za Splitsko – dalmatinskoj županiji na temelju meteoroloških podataka o povijesnim Europskim požarima većih od 2000 ha



Slika 21. Intenzitet reakcije (RI) [$\text{kJ}/(\text{m}^2 \text{s})$] i brzine širenja požara (ROS) [m/s] za Splitsko – dalmatinskoj županiji na temelju meteoroloških podataka o povijesnim Europskim požarima većih od 2000 ha

5.2. Postupak 2. - priprema meteoroloških podataka za povijesne požare na području manjih regija u rezoluciji 100 m

Kod drugog postupka, koji je u okviru FirEurisk projekta primijenjen na razini pilot područja u rezoluciji 100 m, ulazni podaci za karte vezane uz meteorologiju određeni su na temelju podataka o svim požarima većim od 1 ha. Na primjeru DA20 – Splitsko-dalmatinske županije prikupili smo podatke o povijesnim požarima u razdoblju od 1.01.2008. do 31.12.2022. Ukupno su evidentirana 117 požara, a prikazuje ih Slika 22.

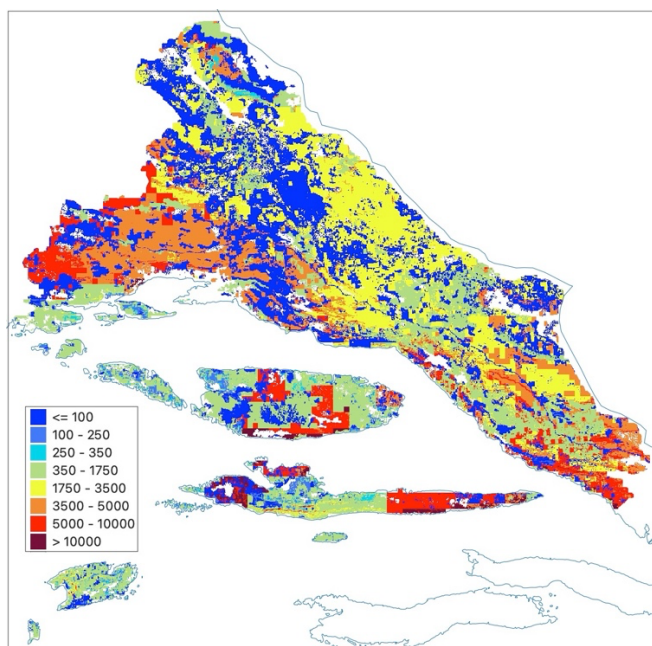
3. istok (E – East)
4. jugoistok (SE – Southeast)
5. jug (S – South)
6. jugozapad (SW – Southwest)
7. zapad (W – West)
8. sjeverozapad (NW - Northwest).

Za svaki scenarij izračunati su ulazni meteorološki podaci za prosječne uvjete 50. percentil i ekstremne uvjete 95. percentil za udare vjetra i 5. percentil za vlažnost goriva. Prikazuje ih Tablica 5. na način da smo požare grupirali prema 8 smjerova puhanja vjetra. Za svaki smjer puhanja vjetra prebrojeni su svi požari zajedno s ukupno izgorenom površinom. Zanimljivo je da se najveći broj požara dogodio uz jugozapadni vjetar (SW) (lebić ili garbin) iako brzina vjetra nije bila najveća.

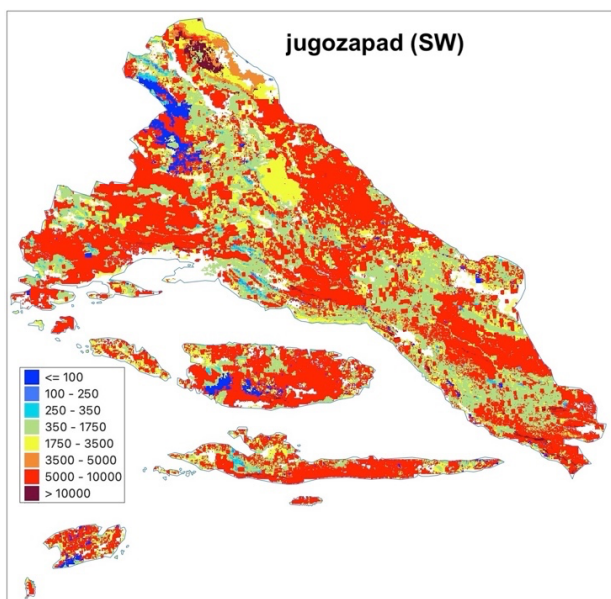
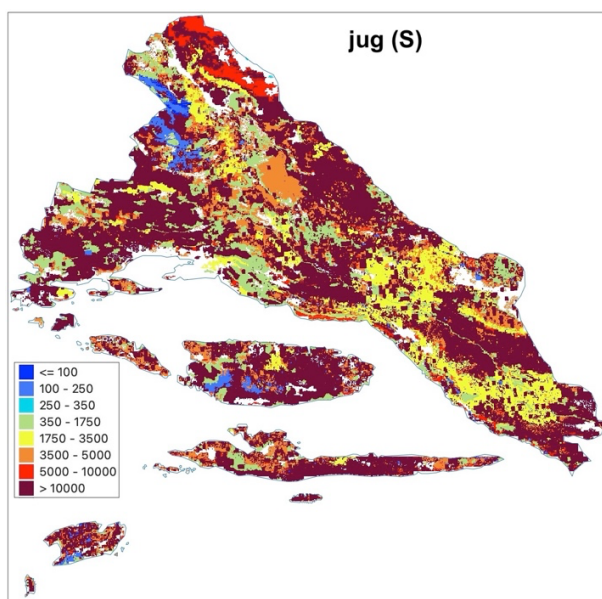
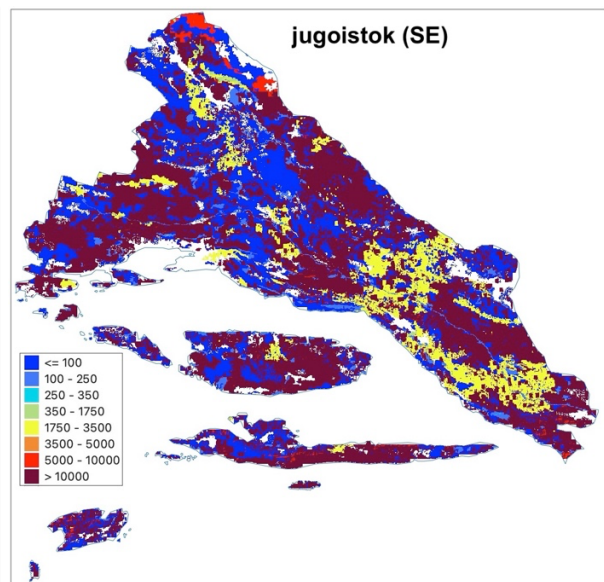
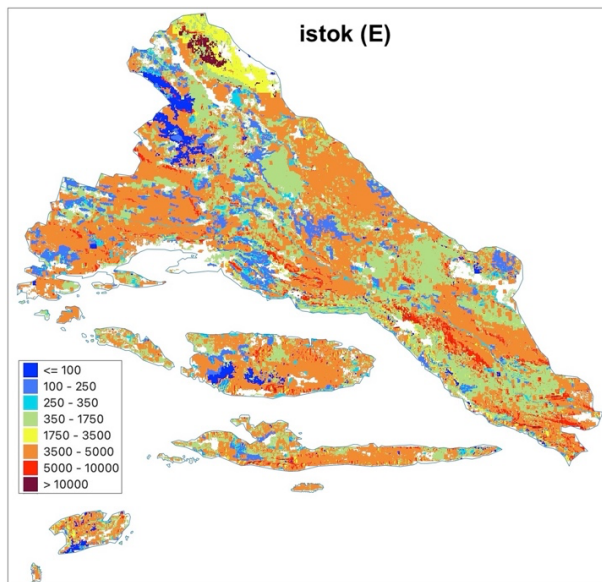
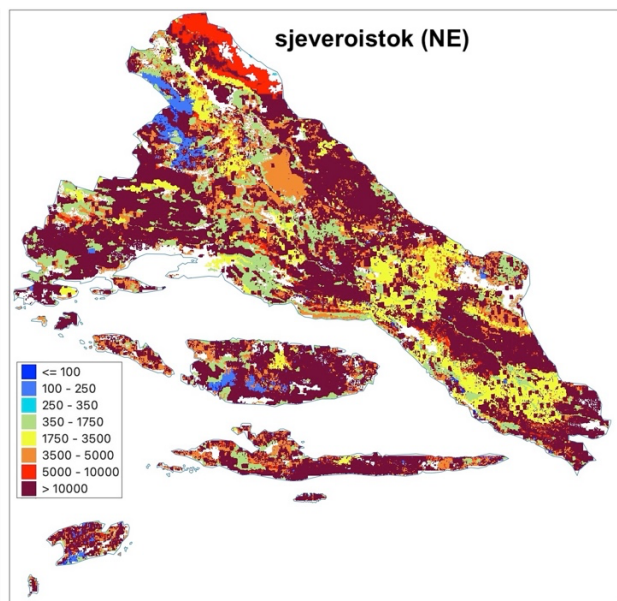
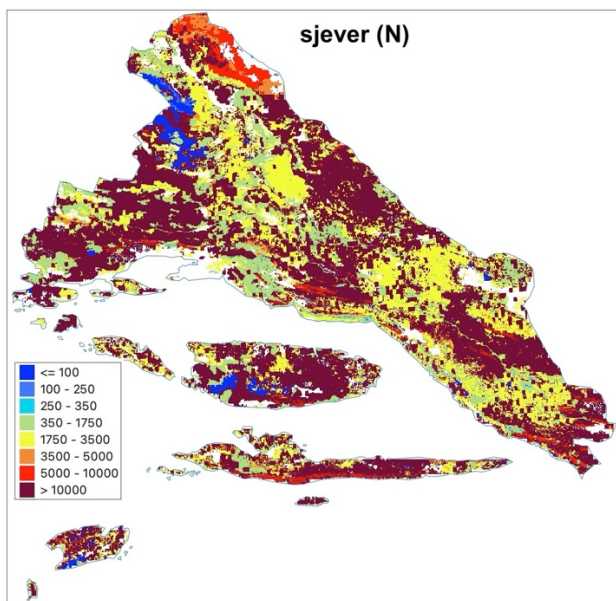
Tablica 5. Prosječni (50. percentil) i ekstremni (95. percentil za vjetar i 5. percentil za vlažnost goriva) podaci za povijesne požari u Splitsko-dalmatinskoj županiji od 2008. do 2022. veće od 1 ha.

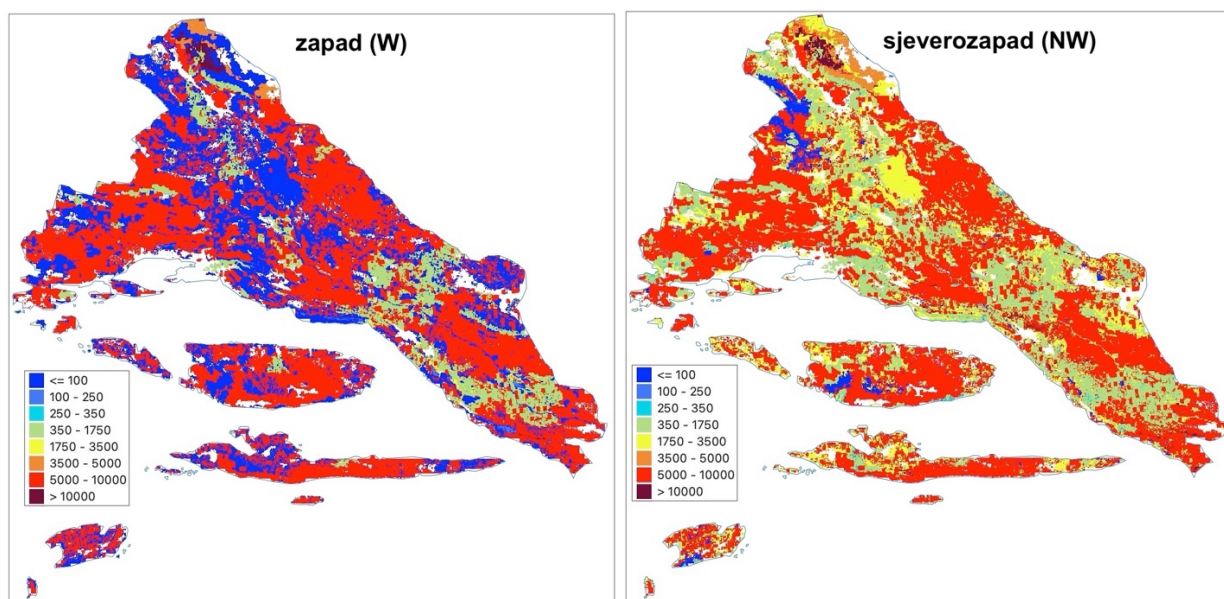
SCENARIO	PERCENTILI	BRZINA VJETRA [m/s]	UDAR VJETRA [m/s]	10hDFMC	IZGORJELA POVRŠINA [ha]	IZGORJELA POVRŠINA [%]	BROJ POŽARA	SREDNJA VELIČINA [ha]	ST.DEV. [ha]
sjever (N)	95.	5.24	10.25	5	3941	6.59	7	563	1230.43
sjever (N)	50.	2.44	6.61	6	2025	3.39	6	337.5	297.41
sjeвероисток (NE)	95.	6.61	17.57	4.85	269	0.45	6	44.83	39.73
sjeвероисток (NE)	50.	2.92	9.30	6	4313	7.21	12	359.42	341.24
istok (E)	95.	2.15	7.16	4.2	3754	6.28	3	1251.33	2065.19
istok (E)	50.	1.67	6.01	5	208	0.35	2	104	107.48
jugoistok (SE)	95.	9.01	14.27	6.9	213	0.36	3	71	96.81
jugoistok (SE)	50.	3.93	8.99	9.5	5516	9.22	7	788	2036.81
jug (S)	95.	6.67	14.44	5	3809	6.37	6	634.83	1282.65
jug (S)	50.	3.24	7.50	6	404	0.68	5	80.8	68.94
jugozapad (SW)	95.	3.27	9.41	5	13265	22.18	9	1473.89	2350.58
jugozapad (SW)	50.	1.93	6.32	7.5	4540	7.59	19	238.95	542.52
zapad (W)	95.	6.56	9.70	5.9	2789	4.66	6	464.83	369.92
zapad (W)	50.	2.93	7.55	8	2729	4.56	13	209.92	400.41
sjeвероzapad (NW)	95.	3.54	8.40	5	11237	18.78	5	2247.4	3015.47
sjeвероzapad (NW)	50.	2.02	6.59	8	797	1.33	8	99.62	104.84
UKUPNO					59809	100	117		

Na temelju ovih podataka izračunali smo indikatore propagacijskog potencijala za sve smjerove vjetra. Slika 23. prikazuje izračun intenziteta vatrene linije za europske povijesne požare, a Slika 24. za 8 smjerove vjetra i povijesne požare Splitsko-dalmatinske županije, s tim da smo legendu prilagodili Tablici 6. iz Poglavlja 5.3.



Slika 23. Intenzitet vatrene linije (FI) [kW/m] za povijesne europske požare i ekstremne uvjete.





Slika 24. Intenzitet vatrene linije (FI) [kW/m] za 8 smjerova vjetra za povijesne požare Splitsko – dalmatinske županije i ekstremne uvjete.

5.3. Usporedba rezultata dobivenih postupkom 1. i postupkom 2. pripreme meteoroloških podataka za povijesne požare

Razlika između postupaka je slijedeća:

Postupak 1. – veliki Europski požari (veći od 2000 ha) – ulazni meteorološki podaci su GeoTiff mape u rezoluciji 100 m dobivene preuzorkovanjem iz EU karti rezolucije 1 km.

Postupak 2 – za cijelo područje Splitsko – dalmatinske županije korišteni su jedinstveni podaci iz tablice 4. dobiveni na temelju povijesnih požara Splitsko – dalmatinske županije većih od 1 ha.

Iz Slika 23. i 24. očito je da postupak 2. daje veće vrijednosti intenziteta vatrene linije, te pretpostavlja veće veći rizik od propagacijskog potencijala. Kako je kod procjene rizika bolje precijeniti, nego podcijeniti požarni rizik kod procjene požarnog rizika na temelju povijesnih podataka postupak 2 je primjereniji iako su mu vrijednosti dosta velike, pa bi možda u skladu s analizom koja slijedi možda bilo bolje koristiti prosječne vrijednosti (50. percentil) koje bi davale umjerenije vrijednosti.

Što iz ovih statičkih karata propagacijskog potencijala možemo naučiti?

Analizirajući svih 9 karata lako možemo uočiti da su neka područja potencijalno opasnija u odnosu na propagacijski potencijal, ta bi u slučaju izbijanja požara na nekim dijelovima njegov intenzitet bio veći, pa bi i požarna izloženost stanovništva i prirodnih resursa bila veća (Stipaničev et al., 2025.).

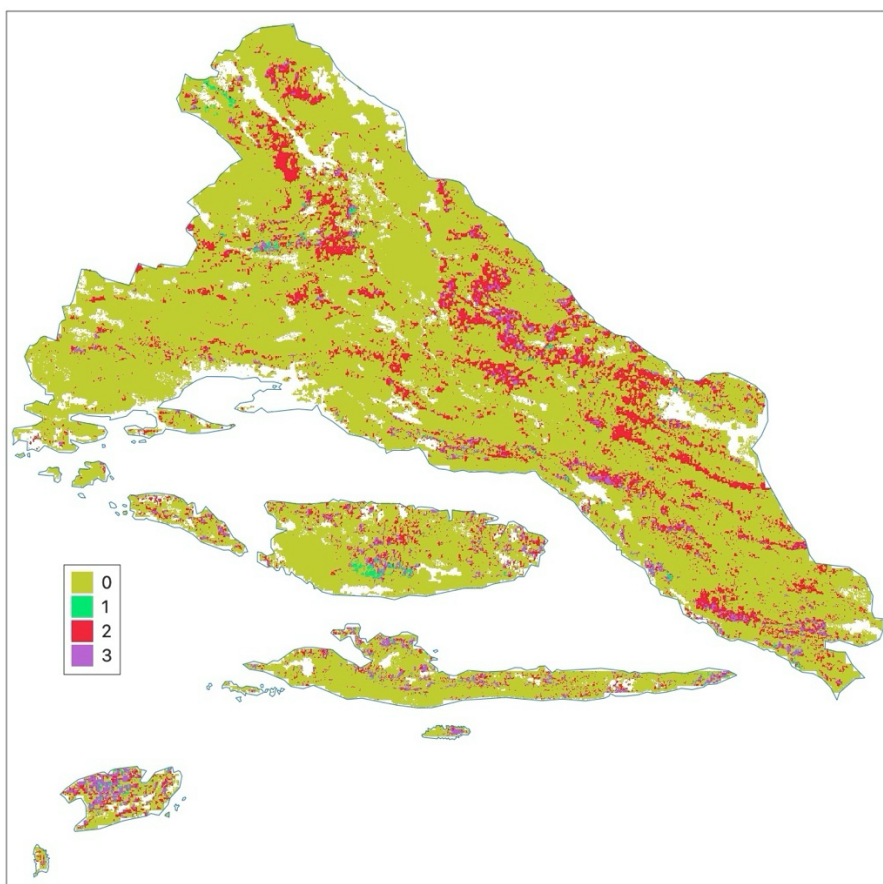
Intenzitet vatrene linije (ili duljine plamena koja je linearno povezana s njim) najvažniji su indikatori propagacijskog potencijala. Oni pokazuju koliko bi požar mogao biti žestok. Još 1982. g. (Andrews & Rothermel, 1982.) su dali tablicu u kojoj povezuju intenzitet požarne linije i duljine plamena s mogućim posljedicama vezanim uz gašenje požara (Tablica 6.)

Tablica 6. Interpretacija gašenja požara prema intenzitetu vatrene linije ili duljine plamena - adaptirano prema (Andrews & Rothermel, 1982.).

intenzitet požarne linije [kW/m]	duljina plamena [m]	interpretacija
< 346	< 1,2	Površinski požar niskog intenziteta Opis: Gori suha trava, niski grmovi i tanko gorivo. Požar se širi sporo, a visina plamena ostaje niska. Utjecaj: Neznatna oštećenja na višem raslinju, ne utječe na krošnje stabala. Gašenje: Može se gasiti ručnim alatima (lopate, metlanice, prskalice), a vatrogasna linija može zadržati požar. Primjer: Požari u travnatim područjima ili rubnim dijelovima šuma.
345 – 1731	1,2 – 2,4	Umjereno intenzivan požar Opis: Požar gori gušće raslinje i može se proširiti na niže dijelove stabala. Uz vjetar postaje opasniji. Utjecaj: Može oštetiti donje dijelove stabala, ali još uvijek ne prelazi u krošnje. Gašenje: Ručni alati nisu dovoljni, potrebni su vatrogasna vozila, buldožeri, cisterne i vodene crpke, a možda i zračni resursi. Primjer: Ljetni šumski požari u borovim šumama s niskim raslinjem.
1731 – 3500	2,4 – 3,4	Visoko intenzivan požar s mogućim prijenosom u krošnje Opis: Požar postaje snažan, plamen doseže donje krošnje stabala i može uzrokovati iznenadno zahvaćanje stabla vatrom (engl. <i>Torching</i>). vatra se može širiti iskrenjem na velike udaljenosti. Utjecaj: Značajna oštećenja stabala. Gašenje: Vatrogasne linije možda neće zadržati požar, potrebni su zračni resursi i široke preventivne vatrogasne linije. Primjer: Borove šume u mediteranskim područjima tijekom sušnih sezona.
> 3 500	> 3,4	Ekstremni požar Opis: Požar u potpunosti zahvaća krošnje, brzo se širi, stvara vlastiti vjetar i može dovesti do ekstremnih vatrene pojava kao što su vatrene oluje. Iskrenjem se prenosi na velike udaljenosti pa je mogućnost požarnih proboja velika. Utjecaj na šumu: Potpuno uništava šumu i sve što mu je na putu. Gašenje: Nema mogućnosti izravnog gašenja na čelnoj liniji, strategija se temelji na zračnim intervencijama. Potrebne su i preventivne mjere evakuacije. Primjer: Ekstremni požari koji se šire velikim brzinama i gutaju cijele šumske ekosustave..

Vratimo li se ponovo na Sliku 24. može se primijetiti da je skoro za sve smjerove vjetra intenzitet vatrene liniji veći od 3500 kW/m (narančasto, crveno i tamno crveno) što znači da bi ga bilo teško gasiti, međutim Tablica 6. se prije svega odnosi na šumska područja gdje su gorivi materijal krošnje kod kojih prevladavaju aktivni požari u krošnjama. Pogledamo li za Splitsko-dalmatinsku županiju kartu aktivnosti

požara u krošnjama (CFA) kojeg prikazuje Slika 25. za SE smjer vjetra, uočiti ćemo da na većem dijelu županije prevladavaju površinski požari ili pasivni požari u krošnjama, pa Tablica 6. u ovom slučaju ne bi bila primjerena, bar što se interpretacije tiče, ali i dalje ostaje da nam Slika 24. ukazuje na područja gdje će površinski požar biti intenzivniji.

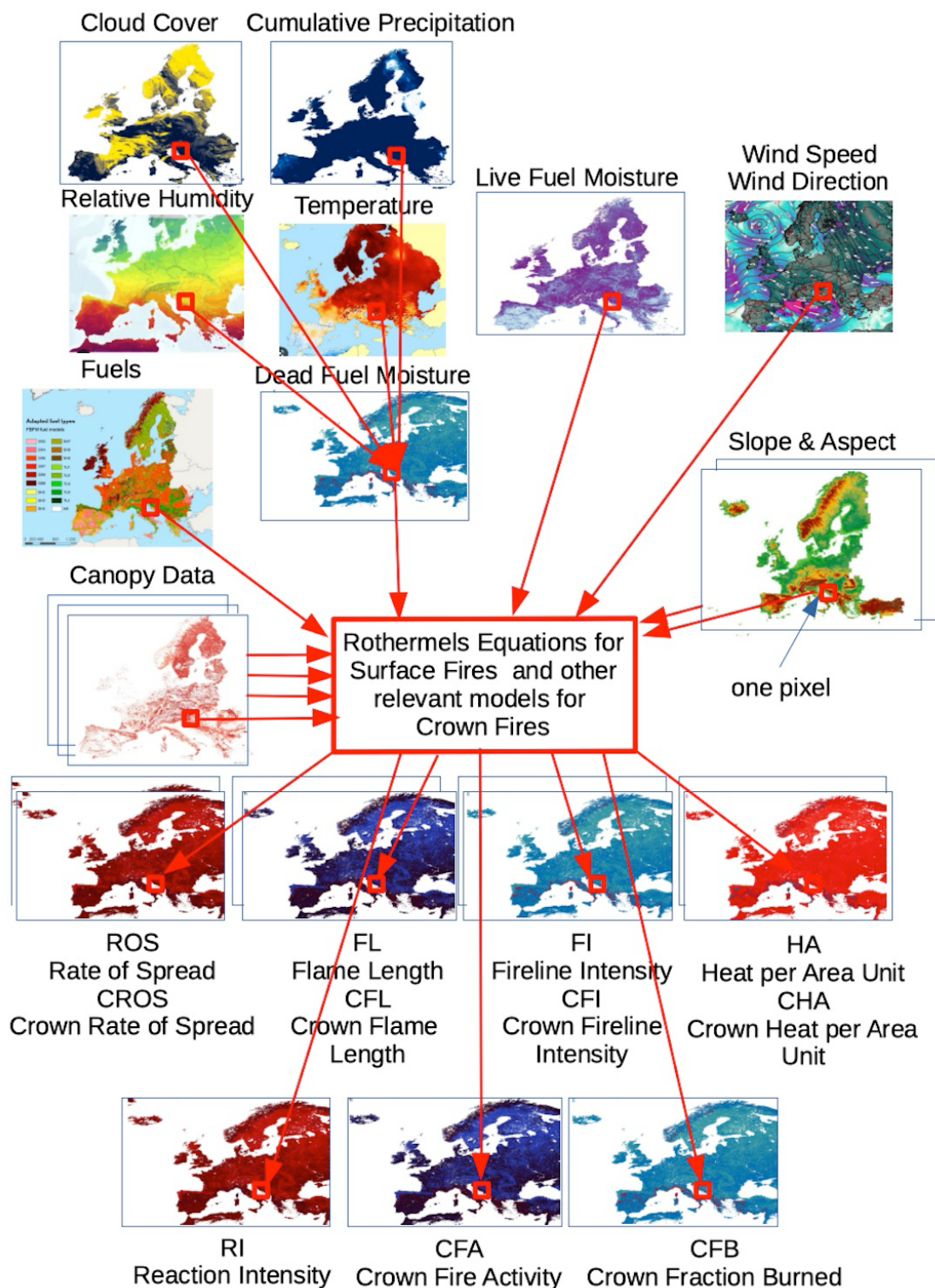


Slika 25. Aktivnosti požara u krošnjama (CFA) za SE smjer vjetra: 0 – površinski požar, 1 – uvjetni požar u krošnjama, 2 – pasivni požar u krošnjama, 3 – aktivni požar u krošnjama.

Ovakve statičke karte su korisne, ali je puno veća korist od dinamičkih karata koje se računaju po istoj metodologiji uzimajući u obzir trenutne meteorološke podatke.

6. Proračun indikatora propagacijskog potencijala na temelju stvarnih meteoroloških podataka

Postupak proračuna je identičan, samo što se umjesto meteoroloških podataka za povijesne požare koriste trenutni meteorološki podaci kao što prikazuje Slika 26.

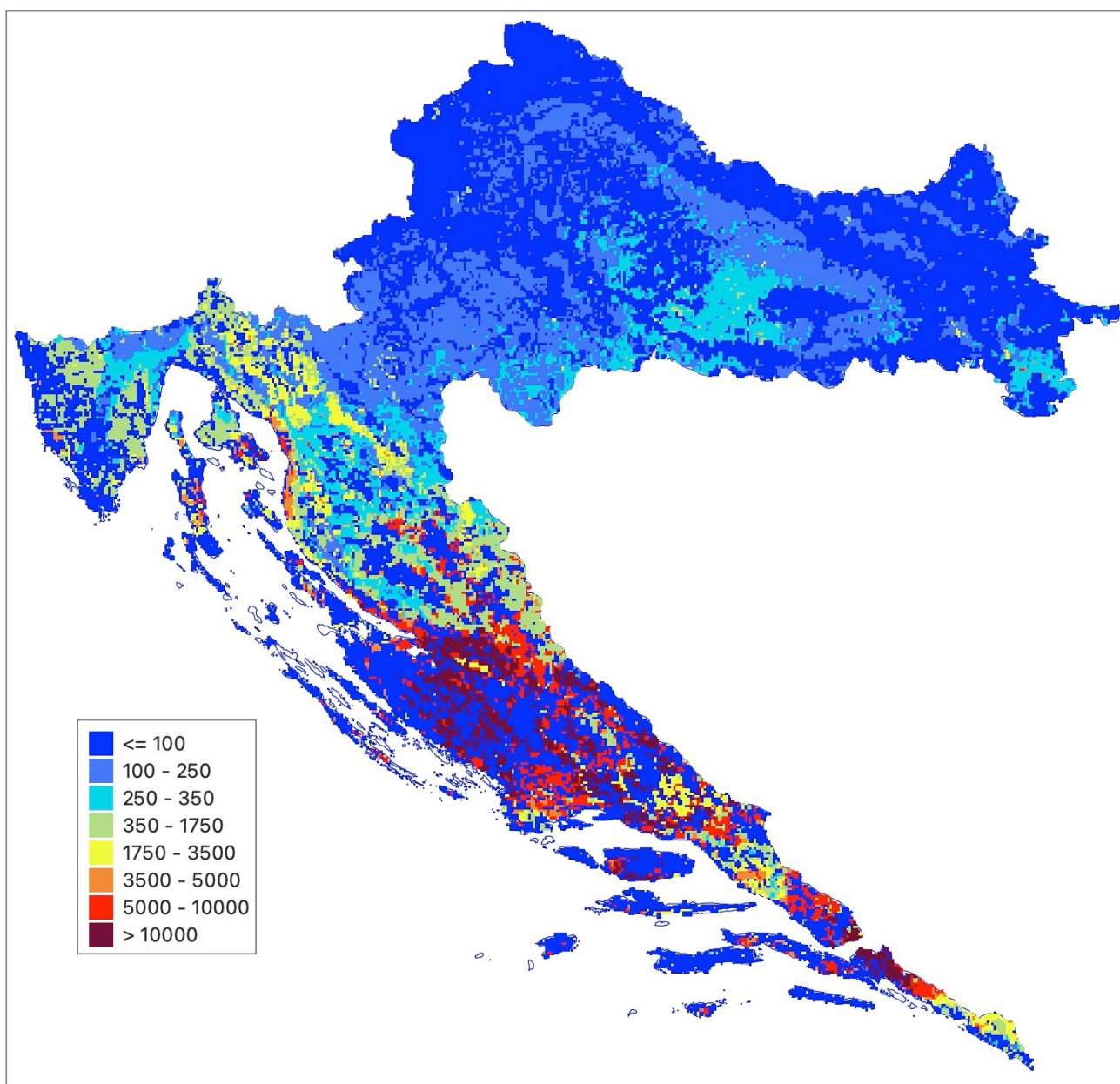


Slika 26. Princip proračuna indikatora propagacijskog potencijala na razini piksela rasterskih GIS karata korištenjem trenutnih meteoroloških podataka.

Razlika u odnosu na povijesne požare (Slika 6.) je i u tome što se sadržaj vlage živog goriva također računa dnevno na temelju analize satelitskih slika, a kod proračuna vlažnosti mrtvog goriva ulazni podaci su i pokrivenost neba oblacima i kumulativna precipitacija (Stipaničev et al., 2024b.).

Od svih izlaznih varijabli propagacijskog potencijala najvažniji je intenzitet vatrene linije (FI) i visina plamena (FL) koja je direktno proporcionalna s intenzitetom vatrene linije. Ovi podaci su također ulazi za proračun izloženosti. Propagacijski potencijal je dovoljno standardno računati jedan put dnevno, na primjer između 12:00 i 14:00 sati, kada su vrijednosti temperature i relativne vlažnosti najpovoljnije za širenje požara, ali može se računati i dinamički kada se postavi zahtjev za proračunom.

U okviru FirEurisk projekta intenzitet vatrene linije (FI) i visina plamena (FL) se računa na razini Europe u rezoluciji 1 km jedan put dnevno. U nastavku prikazujemo primjer karte intenziteta vatrene linije (FI) za Hrvatsku na dan 30.7.2024. g. kada je izbio veliki požar na području Tučepa. U okviru ovog izvještaja pripremili smo i GeoTif karte svih ulaznih veličina na temelju kojih su izračunate ove karte.



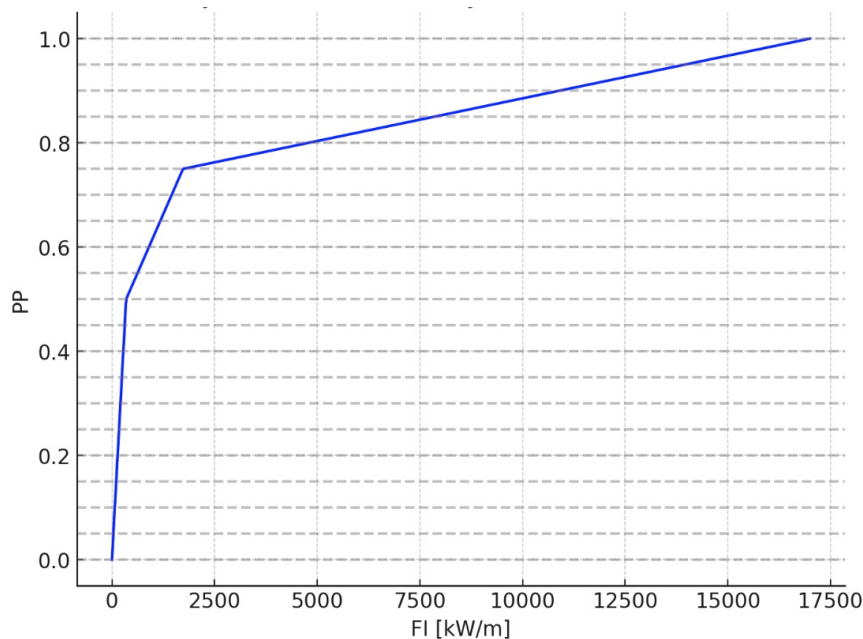
Slika 27. Intenzitet vatrene linije (FI) [kW/m] na dan 30.7.2024.g. kada je izbio veliki požar kod Tučepa.

6. FirEUrisk vjerojatnost propagacijskog potencijala

Prema Slici 1. kod proračuna FirEUrisk požarnog rizika jedan od ulaznih podataka je vjerojatnost propagacijskog potencijala PP u intervalu [0, 1]. Računa se na temelju intenziteta požarne linije (FI) u dva koraka:

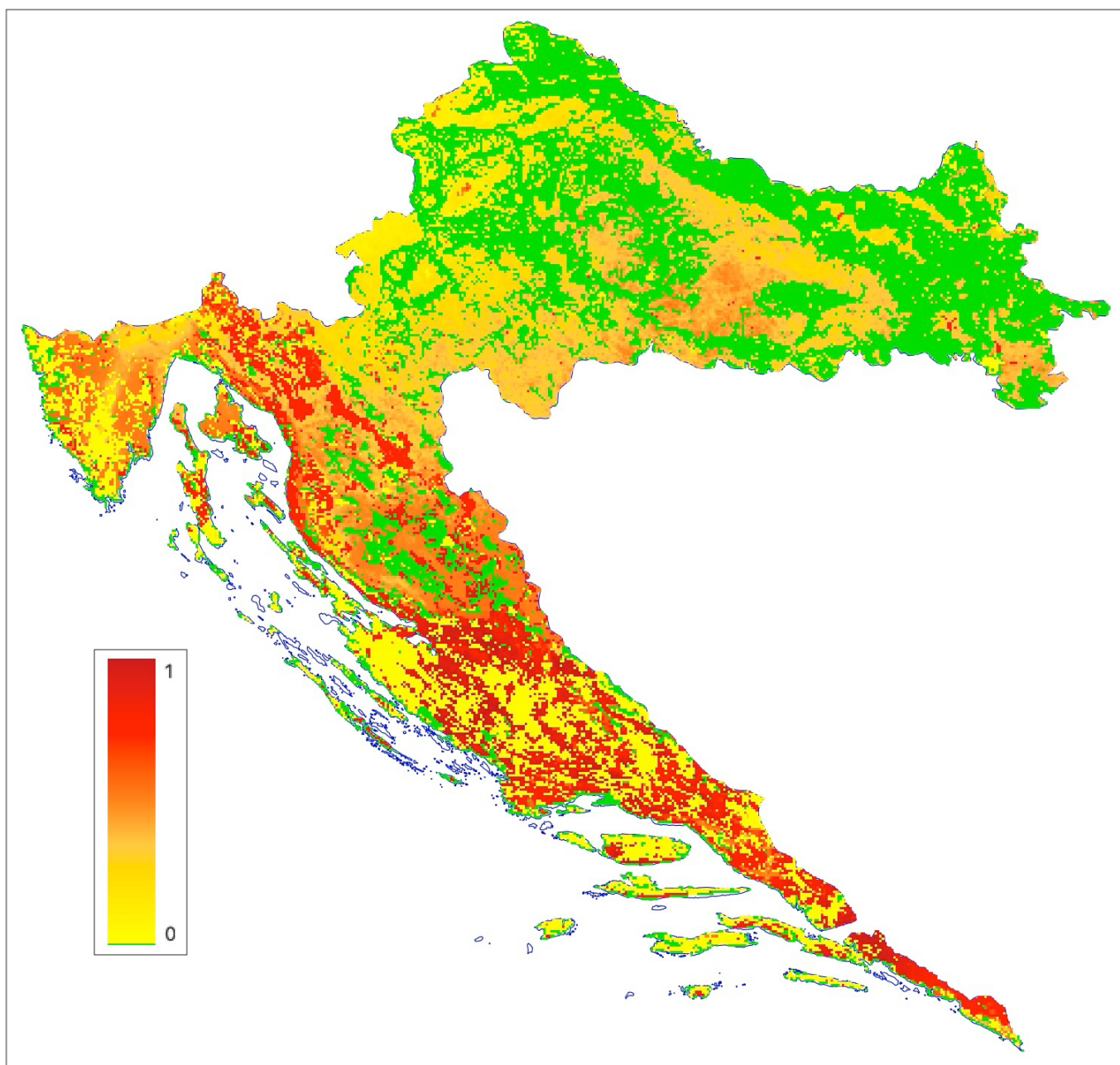
1. Ograničavanje maksimalne vrijednosti na 17000 kW/m:
If $FI > 17000$ then $FI = 17000$
else $FI = FI$
2. Normaliziranje FI na interval [0, 1000] koristeći granice koje je postavio Rothermel prema Tablici 6: 346 kW/m za granicu_1 za ručno gašenje i 1731 kW/m za granicu_2 pogodnu za korištenje mehanizacije. Od 0 do 346 kW/m PP je linearno interpoliran do vrijednosti 500. Za vrijednosti od 346 do 1731 kW/m PP je linearno interpoliran od 500 do 750 (1385 je razlika između granice_2 i granice_1). Iznad 1731 kW/m, pa do maksimalne vrijednosti 17000 vrijednost PP se linearno interpolira od 750 do 1000 (15269 je razlika između maksimalne vrijednosti 17000 i granice_2):
If $(FI < 346)$ then $PP = FI * 500/346$
else
If $(FI > 1731)$ then $PP = 750 + (FI - 1731)/15269 * 250$
else $PP = 500 + (FI - 346)/1385 * 250$
3. Vraćanje vjerojatnosti propagacijskog rizika u interval [0, 1]:
 $PP = PP/1000$

Slika 28. prikazuje funkciju ovisnosti vjerojatnost propagacijskog potencijala PP o vrijednostima FI. Za vrijednosti FI veće od 17500 kW/m, PP zadržava vrijednost 1.



Slika 28. Ovisnosti vjerojatnost propagacijskog potencijala PP o vrijednostima FI. Za vrijednosti FI veće od 17500 kW/m, PP zadržava vrijednost 1.

Slika 29. prikazuje vjerojatnost propagacijskog potencijala (PP) [frakcija] na dan 30.7.2024.g. kada je izbio veliki požar kod Tučepa. Vrijednosti FI prikazuje Slika 27.



Slika 29. Vjerojatnost propagacijskog potencijala (PP) [frakcija] na dan 30.7.2024.g. kada je izbio veliki požar kod Tučepa.

4. Zaključak

Ovaj dokument je nastao na temelju istraživanja provedenih u Radnom paketu 1 projekta FirEURisk Zadatku 1.1. posvećenom procjeni rizika od požara, aktivnosti 1.1.5. **Propagation potential** koja se bavila analizom propagacijskog potencijala na razini cijele Europe u rezoluciji 1km i na razini pilot područja u rezoluciji 100m.

Opisano je određivanje propagacijskog potencijala korištenjem simulacijskog programa FlamMap koje je korišteno za pilot područja i određivanje propagacijskog potencijala simulacijom na razini piksela rasterskih GIS kartama koje je korišteno na razini cijele Europe. Opisana je i priprema ulaznih podataka vezanih uz povijesne požare, ali i način proračuna propagacijskog potencijala na temelju stvarnih meteoroloških podataka. Svi postupci su primijenjeni na razini Hrvatske i ilustrirani mapama Hrvatske ili Splitsko – dalmatinske županije, koja je bila demonstracijskog područja projekta FirEURisk

Svi materijali dostupni uz ovaj izvještaj mogu se slobodno koristiti uz navođenje izvora u skladu s Copyrightom.

Literatura

- (Anderson, 1969.) Anderson, Hal E. (1969.) Heat transfer and fire spread. Res. Pap. INT-RP-69. Ogden, Utah: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 20 p.
- (Anderson, 1982.) Anderson, Hal E. (1982.) Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. Gen. Tech. Rep. INT-GTR-122. Ogden, Utah: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 22 p. - https://gacc.nifc.gov/oncc/docs/13_Aids%20to%20Determining%20Fuel%20Models.pdf
- (Andrews & Rothermel, 1982.) Andrews, Patricia L., Rothermel, Richard C. (1982.) Charts for Interpreting Wildland Fire Behavior Characteristics, General Technical Report INT-131, Forest Service Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT 84401 September 1982
- (Andrews, 2012.) Andrews, Patricia L. (2012.) Modeling wind adjustment factor and midflame wind speed for Rothermel's surface fire spread model. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-266. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 39 p.
- (Andrews, 2018.) Andrews, Patricia L. (2018.) The Rothermel surface fire spread model and associated developments: A comprehensive explanation. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-371. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station - <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/55928>
- (Bugarić et al., 2023.) Marin Bugarić, Fermin Alcasena, Marcos Rodrigues Mimbreno, Darko Stipaničev (2023.) D1.1.5 - Del.1 Propagation potential - calculation methodology for Pilot Sites (PS), FirEUrisk Internal Report, 2023.
- (Byram, 1959.) Byram, G. M. (1959.). Combustion of Forest Fuels. In K. P. Davis (Ed.), Forest Fire: Control and Use (pp. 61-89). New York: McGraw-Hill.
- (Chetehouna et al., 2009.) K. Chetehouna, T. Barboni, I. Zarguili, E. Leoni, A. Simeoni, A.C. Fernandez-Pello (2009.) Investigation on the emission of Volatile Organic Compounds from heated vegetation and their potential to cause an eruptive forest fire, Combustion Science and Technology, 181:10 (2009), pp. 1273-1288.
- (Charleton et al, 2015.) F.J., Chatelon; J.H., Balbi; J.L., Rossi; A., Simeoni; D.X., Viegas; T., Marcelli, (2015.) Determining a safety condition in the prevention of eruptive fires, Advances in Forest Fire Research, 2015, http://dx.doi.org/10.14195/978-989-26-0884-6_148
- (Cruz et al., 2005.) Cruz, M.G.; Alexander, M.E.; Wakimoto, R.H. (2005.) Development and testing of models for predicting crown fire rate of spread in conifer forest stands. Canadian Journal of Forest Research. 35: 1626–1639.
- (Cruz & Alexander, 2010.) Cruz, M.G.; Alexander, M.E. (2010.) Crown fires. Pages 30-46 in VI Short Course on Fire Behaviour, 13-14 November 2010., Coimbra, Portugal - https://www.frames.gov/documents/catalog/cruz_and_alexander_2010.pdf
- (ERA5, 2024.) ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present, (accessed 2024.) <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
- (FirEUrisk Del.1.1., 2023.) Fermín Alcasena, Elena Aragoneses, Vadim Bogomolov, Marin Bugarić, David Caballero, Emilio Chuvieco, Àngel Cunill Camprubí, Mariano García, Pere Joan Gelabert, Adrián Jimenez-Ruano, Ana Miranda, Diogo Lopes, Viktor Myroniuk, Clara Ochoa Velez, Nadia Politi, Carlos Prado, Michele Salis, Victor Resco de Dios, Luis Mario Ribeiro, Marcos Rodrigues, Ángela

- Rivera, Thanasis Sfetsos, Darko Stipaničev, Luis Torres, Mandy Vlachogianni, Sergiy Zibtsev, Cristina Vega-Garcia, (2023.) D1.1 – Report on methodological frameworks for each danger modelling process, FirEURisk Report, 2023.
- (FirEURisk Del.2.6., 2024.) 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, (2024.) 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.)
- (Peuch, 2007.) Peuch, E. (2007.) Wild Fire safety: Feed Back on Sudden Ignitions causing Fatalities, Wildfire 2007 Int.Conference, Sevilla, Spain, (Thematic Session 6) May 2007.
- (Rothermel, 1972.) Rothermel, Richard C. (1972.) A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station- <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/32533>
- (Rothermel, 1983.) Rothermel, Richard C. (1983.) How to predict the spread and intensity of forest and range fires. Gen. Tech. Rep. INT-143. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 161 p.
- (Rothermel, 1991.) Rothermel, Richard C., (1991.) Predicting behavior and size of crown fires in the northern Rocky Mountains, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, 1991.
- (Scott & Reinhard, 2001.) Scott, Joe H.; Reinhardt, Elizabeth D.,(2001.) Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behavior, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2001. - https://www.fs.usda.gov/rm/pubs/rmrs_rp029.pdf
- (Scott & Burgan, 2005) Scott, J. H.; Burgan, R. E. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model, *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153*. U.S. Department of Agriculture, 72 p. 2005. - https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_series/rmrs/gtr/rmrs_gtr153.pdf
- (Scott, 2007.) Scott, Joe H. (2007.) Nomographs for estimating surface fire behavior characteristics. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-192. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 119 p.
- (Stipaničev et al., 2023a.) Darko Stipaničev, Marin Bugarić, Luis Torres, David Caballero, Emilio Chuveco, (2023.) D1.1.5 - Del.2 Propagation potential for Europe Territory, FirEURisk Internal Report, 2023.
- (Stipaničev et al., 2023b.) Darko Stipaničev, Elena Aragonese, Marin Bugarić, Emilio Chuveco (2023.) D1.1.5 - Del.3 Propagation potential - Crown Fire Indicators for Europe Territory (ET), FirEURisk Internal Report, 2023.
- (Stipaničev et al., 2024a). Stipaničev, D., Bugarić, M., Božić Štulić, D., Šerić, Lj., Krstinić, D., (2024.) Wildfire propagation potential for Split-Dalmatian County in Croatia, Proceedings for the 7th International Fire Behavior and Fuels Conference, April 15-19, 2024, Boise, Idaho, USA – Tralee, Ireland – Canberra, Australia, Published by the International Association of Wildland Fire, Missoula, Montana, USA
- (Stipaničev et al., 2024b.) Stipaničev, D., Bugarić, M., Krstinić, D., Šerić, Lj., Braović, (2024.) M.: Vlažnost goriva kod proračuna FirEURisk požarnog rizika, FirEURisk Dissemination Report, 2024. -

<https://cipop.fesb.hr/index.php/fireurisk/vlaznost-goriva-kod-proracuna-fireurisk-pozarnog-rizika>

- (Stipaničev et al., 2024c.) Stipaničev, D., Bugarić, M., Krstinić, D., Šerić, Lj., Braović, M., (2024.) FirEUrisk modeli i karte goriva za područje Republike Hrvatske, FirEUrisk Dissemination Report, 2024. - <https://cipop.fesb.hr/index.php/fireurisk/fireurisk-modeli-i-karte-goriva-za-podrucje-republike-hrvatske-novi-diseminacijski-dokument-projekta-fireurisk>
- (Stipaničev et al., 2024d.) Stipaničev, D., Bugarić, M., Krstinić, D., Šerić, Lj., Braović, M., (2024.) FirEUrisk karte goriva u krošnjama za područje Republike Hrvatske, FirEUrisk Dissemination Report, 2024. - <https://cipop.fesb.hr/index.php/fireurisk/fireurisk-karte-goriva-u-krošnjama-za-podrucje-republike-hrvatske>
- (Stipaničev et al., 2025.) Stipaničev, D., Bugarić, M., Krstinić, D., Šerić, Lj., Braović, M., (2025.) Požarna izloženost kod proračuna FirEUrisk požarnog rizika, FirEUrisk Dissemination Report, 2025. - <https://cipop.fesb.hr/index.php/fireurisk/pozarna-izlozenost-kod-proracuna-fireurisk-pozarnog-rizika>
- (Španjol et al., 2011.) Španjol, Ž., Rosavec, R., Brčić, D., (2011.) Vegetacijske prilike i gorivi materijal na Kornatu vezano uz kornatski požar od 30. kolovoza 2007. godine, Vatrogastvo i upravljanje požarima, Vol. I. No. 1., 2011.
- (Thomas, 1963.) Thomas, P.H., (1963.) The size of flames from natural fires, Fire Research Notes 497 - https://publications.iafss.org/publications/frn/497/-1/view/frn_497.pdf
- (Van Wagner, 1977) Van Wagner, C.E. 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. Canadian Journal of Forest Research 7(1):23-34. - <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/x77-004>
- (Van Wagner, 1993) Van Wagner, C.E. (1993.) Prediction of crown fire behavior in two stands of jack pine. Canadian Journal of Forest Research. 23: 442–449. - <https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=10738>
- (Viegas et al., 2002.) Viegas D.X., Pita L.P., Matos L. i Palheiro P. 2002. Slope and Wind Effect on Fire Spread, Forest Fire Research & Wildland Fire Safety, Viegas (ed.), 2002 Millpress, Rotterdam, p.16
- (Viegas, 2004.) Viegas D.X., (2004.) Slope and Wind Effects on Fire Propagation. Int. J. Wildland Fire, 13(2): 143-156.
- (Viegas & Pita, 2004.) 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, 2005.) Viegas D.X., (2005.) Forest Fire Methodology, reearch and Application, Wild Fire Workshop, Melburn, Australia, June 2005.
- (Viegas et al., 2005.) Viegas, D. X. Pita, . L. P. Ribeiro L. and Palheiro P. (2005.) Eruptive Fire Behaviour in Past Fatal Accidents, Eighth International Wildland Fire Safety Summit, April 26-28, 2005 Missoula, MT.
- (Viegas, 2006.) Viegas D.X. (2006.) Analysis of Eruptive Fire Behaviou, V Conference on Forest Fire Research, Figueira da Foz, Portugal, Nov. 2006, 13 p.