

ISSN 1849-0700
ISSN 1330-0083
CODEN HMCAE7

Hrvatsko meteorološko društvo
Croatian Meteorological Society

HRVATSKI METEOROLOŠKI ČASOPIS CROATIAN METEOROLOGICAL JOURNAL

56

Hrv. meteor. časopis

Vol. 56

p. 1-216

ZAGREB

2023

HRVATSKI METEOROLOŠKI ČASOPIS
CROATIAN METEOROLOGICAL JOURNAL

Izdaje

Hrvatsko meteorološko društvo
Ravnice 48, 10000 Zagreb
Hrvatska

Published by

Croatian Meteorological Society
Ravnice 48, 10000 Zagreb
Croatia

Glavna i odgovorna urednica / Chief Editor

Tanja Likso, Zagreb hmc@meteohmd.hr

Zamjenik glavne i odgovorne urednice / Assistant Editor

Krešo Pandžić, Zagreb

Tajnica / Secretary

Ljilja Ivušić, Zagreb

ljiljaivusic@gmail.com

Urednički odbor / Editorial board

Tanja Likso, Zagreb

Goran Gašparac, Zagreb

Antun Marki, Zagreb

Vinko Šoljan, Split

Ljilja Ivušić, Zagreb

Krešo Pandžić, Zagreb

Branko Grisogono, Zagreb

Katarina Stanković, Zagreb

Ivan Toman, Zadar

Recenzenti / Reviewers

Simon Berkowicz, Izrael

Kristan Horvath, Hrvatska

Jadran Jurković, Hrvatska

Giora Kidron, Izrael

Tanja Likso, Hrvatska

Renata Sokol Jurković, Hrvatska

Ivana Tošić, Srbija

Ksenija Zaninović, Hrvatska

Vesna Đuričić, Hrvatska

Branka Ivančan-Picek, Hrvatska

Ján Kaňák, Slovačka

Gabin Koto N'Gobi, Bénin

Krešo Pandžić, Hrvatska

Lidija Srnec, Hrvatska

Josip Vuković, Hrvatska

Lektura / Proofreading

Neoplazam (hrv.), Alpha (eng.)

Korektura / Corrections

Vesna Đuričić, Hrvatska

Časopis se referira u / Abstracted in

Scopus

Geobase

Elsevier/Geoabstracts

Zugänge der Bibliothek des Deutschen Wetterdienstes

Meteorological and Geostrophysical Abstracts

Abstracts Journal VINITI

Adrese za slanje radova / Addresses for papers acceptance

hmc@meteohmd.hr

likso@cirus.dhz.hr

Časopis izlazi godišnje

Web izdanje: <http://hrcak.srce.hr/hmc>

Prijelom i tisak: ABS 95

Naklada: 150 primjeraka

Hrvatsko meteorološko društvo
Croatian Meteorological Society

HRVATSKI METEOROLOŠKI ČASOPIS **CROATIAN METEOROLOGICAL JOURNAL**

56

Hrv. meteor. časopis	Vol. 56	p. 1-216	ZAGREB	2023
----------------------	---------	----------	--------	------

Znanstveni časopis *Hrvatski meteorološki časopis* nastavak je znanstvenog časopisa *Rasprave* koji redovito izlazi od 1982. godine do kada je časopis bio stručni pod nazivom *Rasprave i prikazi* (osnovan 1957.). U časopisu se objavljuju znanstveni i stručni radovi iz područja meteorologije i srodnih znanosti. Objavom rada u Hrvatskom meteorološkom časopisu autori se slažu da se rad objavi na internetskim portalima znanstvenih časopisa, uz poštivanje autorskih prava

Scientific journal *Croatian Meteorological Journal* succeeds the scientific journal *Rasprave*, which has been published regularly since 1982. Before the year 1982 journal had been published as professional one under the title *Rasprave i prikazi* (established in 1957). The *Croatian Meteorological Journal* publishes scientific and professional papers in the field of meteorology and related sciences.

Authors agree that articles will be published on internet portals of scientific magazines with respect to author's rights.

**ANALIZA EKSTREMNIH VREMENSKIH UVJETA TIJEKOM KATASTROFALNIH
POŽARA U HRVATSKOJ I AUSTRALIJI****Analysis of extreme fire weather during catastrophic wildfires in Croatia and Australia**

IVANA ČAVLINA TOMAŠEVIĆ

Datum obrane: 16. 12. 2022.

Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:146249>**Prošireni sažetak:**

1. Uvod

Šumski požari su dio globalnog ekosustava i kao sastavni dio prirodnog ciklusa igraju ključnu ulogu u bioraznolikosti flore i faune te oblikuju mozaik krajolika (Flannigan i sur., 2000; Keeley, 2012; Keeley i Syphard, 2016). Ako se šumski požar brzo i nekontrolirano širi, može uzrokovati ogromna razaranja i uzrokovati prirodnu katastrofu (Meng i sur., 2015). Na globalnoj razini izvješća govore o „najgorim“, „najvećim“, „najduljim“, „najskupljim“ i „rekordnim“ šumskim požarima i požarnim sezonama (IAWF, 2019).

U 21. stoljeću već svjedočimo o novoj alarmantnoj kategoriji šumskih požara – tzv. megapožari (Williams, 2013). Izraz megapožar korišten je za opisivanje velikih i intenzivnih šumskih požara u svijetu (Dimitrakopoulos i sur., 2011; Coen i sur., 2018; de la Barrera i sur., 2018), obično većih od 10.000 ha (Stephens i sur., 2014). Iako su izuzetno rijetki (samo 1 % od ukupnog broja požara), megapožari mogu biti odgovorni za više od 90 % spaljene površine u jednoj požarnoj sezoni (Bartlett i sur., 2007; Strauss i sur., 1989). S meteorološkog kuta gledanja megapožari su šumski požari koji jako djeluju na okolnu atmosferu. U tim uvjetima megapožari mogu generirati dovoljno energije za modificiranje prevladavajućih meteoroloških uvjeta i stvaranje vlastitih vremenskih uvjeta – požarnih oluja (Vines, 1981). Požarne oluje, u ekstremnim slučajevima mogu generirati pirokonvekciju, odnosno duboki konvektivni stup, koji se očituje kao posebna vrsta oblaka – pirokumulus (pyroCu) ili pirokumulonimbus (pyroCb; Sharples i sur., 2016). Konvektivna uzlazna i silazna strujanja unutar pyroCu ili pyroCb utječu na ponašanje požara zbog velikih i brzih promjena brzine i smjera vjetra (Potter, 2012a, 2012b). U Australiji je do danas zabilježen veliki broj požara koji su generirali pyroCb, ali i ekstremne popratne pojave poput požarnih pijavica i tornada (Fromm i sur., 2006; Cruz i sur., 2012; McRae i sur., 2013; Field i sur., 2016; Ndalila i sur., 2019).

Šumski požari takvih razmjera još nisu zabilježeni u Hrvatskoj, no do pirokonvekcije je sigurno došlo (sl. 1.2b), iako do danas nije potvrđen slučaj razvoja oblaka pyroCb. Unatoč tome, bilo je izvješća o neuobičajeno razornim, nekontroliranim i vjetrom nošenim šumskim požarima koji su gorjeli tijekom noći bez znakova usporavanja, s nezaustavljivim napredovanjem vatre, napredujući nizbrdo i dosežući prigradska područja koja se obično smatraju zaštićenima od takvih požara. Sve to zabilježeno je još 2017. godine, najgore požarne sezone u Hrvatskoj posljednjih 60-ak godina. Posljednjih godina hrvatski vatrogasci i piloti 146 protupožarnih zrakoplova često opisuju požare kao previše intenzivne za gašenje ili čak nemogućnost da im se približe, što nije sigurno zbog nestalnosti vjetra, ostavljajući im jedinu mogućnost uklanjanja goriva ispred vatre. Stoga je Hrvatska, kao i Australija, zabilježila dosad neviđene šumske požare i ponašanje požara što je meteorološki povezano s pojačanom dinamikom između požara i atmosfere. Ti događaji zahtijevaju posebnu pozornost i naglašavaju potrebu boljeg znanstvenog razumijevanja i mehanizama koji ih uzrokuju i pokreću.

Hoće li šumski požar pokazati ekstremno ponašanje i postati velika prijetnja uvelike ovisi o vremenu, točnije određenoj kombinaciji meteoroloških uvjeta (Bradstock i sur., 2009). Stoga je važno pravodobno znati cijeli skup meteoroloških uvjeta koji izazivaju šumske požare kako bi se što točnije prognozirali i što ranije najavili spasilačkim i vatrogasnim službama. Sveobuhvatna meteorološka istraživanja šumskih požara mogu poboljšati naše znanje o toj razarajućoj i katastrofalnoj pojavi i doprinijeti znanosti o požarnoj meteorologiji i učinkovitijim vatrogasnim operacijama.

Glavni cilj ovog dvojnog doktorata je istražiti meteorološke prilike za vrijeme ekstremnih šumskih požara – iz Hrvatske i jugoistočne Australije. Izabrani slučajevi ekstremnih požara raslinja uključuju Splitski požar iz srpnja 2017. iz Hrvatske te požar Forcett-Dunalley iz siječnja 2013. iz Tasmnije. Drugi cilj ovog istraživanja je pronalaženje sličnosti između dinamičkih atmosferskih procesa i mehanizama koji su se dogodili tijekom analiziranih požara. Također, pitanje na koje ovo istraživanje želi dobiti odgovor je da li su šumski požari duž Jadranske obale dovoljno intenzivni da utječu i mijenjaju meteorološke uvjete u okolnoj atmosferi, kao oni koji se javljaju u Australiji. U tu svrhu u Hrvatskoj je po prvi puta primijenjen združeni model koji simulira odnose između požara i atmosfere.

2. Pregled literature

Znatan utjecaj na vremenske uvjete povoljne za požare raslinja duž Jadrana ima položaj Azorske anticiklone nad zapadnom Europom. Dugotrajni ili blokirajući anticiklonalni uvjeti udaljavaju ciklonalne poremećaje od jadranske obale te uzrokuju dugotrajno razdoblje toplog, suhog i mirnog vremena, s uglavnom slabom obalnom cirkulacijom poput zmorca ili kopnenjaka. Očito je da su ti uvjeti povoljni za šumske požare, ali ono što se čini ključnim za pojavu velikih šumskih požara na jadranskom području je pomicanje Azorske anticiklone prema sjeveru. To omogućuje hladnoj fronti da zahvati područje Jadrana, poništi lokalnu obalnu cirkulaciju te promijeni smjer i brzinu vjetra. Ljetne hladne fronte obično su suhe ili donose malu količinu oborine nedovoljnu za već suhu vegetaciju ili za gašenje već nastalih šumskih požara.

Najčešći tip šumskih požara duž jadranske obale su požari nošeni vjetrom, a u manjem obimu požari uzrokovani ekstremnom vrućinom. Istraživanja prošlih katastrofalnih požara u Hrvatskoj otkrila su, između ostalog, specifični vertikalni profil – signifikantni maksimum brzine vjetra u prvih 250 do 900 m visine (sa specifičnim smanjenjem brzine do 3 km visine; Vučetić i Vučetić, 1999). Takvi vertikalni profili pronađeni su u različitim sinoptičkim situacijama i tijekom različitih prevladavajućih smjerova vjetra – juga, bure i maestrala. Prijašnje istraživanje iz SAD-a definiralo je takvu vrstu vertikalnog profila brzine vjetra kao nisku mlaznu struju (engl. low-level jet, LLJ) i otkrilo da je takav profil vjetra među najopasnijim s obzirom na ponašanje požara u prirodi kojima dominira jak vjetar. Vrlo je vjerojatno da će uzrokovati pojavu velikih vrtloga što je vrlo opasno za gradove i sela ispred vatrene fronte (Byram, 1954). Isti takav vertikalni profil brzine vjetra potvrđen je i prvi put u hrvatskoj literaturi definiran kao LLJ u opsežnom meteorološkom istraživanju najtragičnijeg požara u hrvatskoj povijesti – Kornatskog požara iz 2007, kada je smrtno stradalo 12 vatrogasaca a jedan je teško ozlijeđen (Vučetić i sur., 2007). Kasnije studije potvrdile su prolaz hladne fronte i LLJ kao ključne meteorološke uvjete za vrijeme velikih šumskih požara na jadranskoj obali, a također su ponovno potvrdile važnost analize vertikalne strukture atmosfere. Na primjer, taj tipični sinoptički obrazac i vertikalni profil vjetra pojavio se u slučajevima svih šumskih požara većih od 500 ha u razdoblju 2001. – 2010. (Tomašević, 2012). Zanimljivo je da je sve velike šumske požare u tom razdoblju potaknula jaka bura.

Požari u Hrvatskoj ne događaju se samo duž jadranske obale. U drugom desetljeću 21. stoljeća bilo je velikih šumskih požara i u unutrašnjosti kontinenta (Kuraži, 2015), što je u skladu s rezultati indeksa opasnosti od požara raslinja koji su otkrili znatno povećanje meteorološke opasnosti u ovim područjima koja su se nekoć smatrala sigurnima od tih katastrofalnih događaja (Barešić, 2011). Više detalja u Tomašević i sur. (2022).

Istraživanja velikih šumskih požara u Australiji pronašla su dva glavna tipa najčešće prisutnih meteoroloških uvjeta. Prvi uključuje bilo koji obrazac koji donosi suhi zrak od središta kontinenta do periferije gdje je više gorivog materijala, a drugi obrazac odgovara frontalnim poremećajima nakon anticiklone i najčešći je u jugoistočnoj Australiji. Područje, gdje se vruća kontinentalna zračna masa iz unutrašnjosti susreće s hladnim morskim zrakom iznad Južnog oceana, sjecište je zračnih masa koje pojačava hladne fronte kako se one približavaju obali i dolaze u interakciju s obalnim temperaturnim gradijentom (Luke i McArthur, 1978; Mills, 2002). Frontama obično prethodi jaka anticiklona, koja usmjerava suhi zrak iz zagrijane unutrašnjosti kontinenta prema jugoistoku (Reeder i Smith, 1992; Reeder i Smith, 1998). Takva sinoptička situacija dogodila se za vrijeme katastrofalnog šumskog požara u jugoistočnoj Australiji poznatim kao Crna subota (engl. *Black Saturday*) 2009. kada su smrtno stradale 173 osobe (VBRC, 2009).

Ostali ključni meteorološki uvjeti za vrijeme velikih požara uključuju međudjelovanje strujanja s topografijom. Na primjer, neki slučajevi iznenadnih povećanja indeksa opasnosti od požara u jugoistočnoj Australiji povezani su s pojavom fena (engl. *foehn*, Sharples i sur., 2010) i atmosferskih planinskih valova. Mnogo godina upozorava se i na opasnost od spuštanja suhog zraka s visine što uzrokuje rapidno smanjenje relativne vlažnosti zraka pri tlu i tako utječe na vlagu gorivog materijala i povećava rizik od požara. Vrijeme pogodno za nastanak požara uključuje i konvektivne procese koji mogu uzrokovati tzv. požare dominirane uzlaznim gibanjima (više nego horizontalnim vjetrom).

Istraživanja iz obje države pokazuju porast indeksa meteorološke opasnosti od požara raslinja kao posljedicu promijenjene klime. Klimatske projekcije u budućnost pokazuju da u obje regije postoji prilično velika vjerojatnost za izmijenjeni i opasniji požarni režim s produljenjem požarne sezone, te ako požar nastane, postoji velika vjerojatnost da preraste u požar velikih razmjera i ekstremnog ponašanja.

3. Metode

Kako bi se atmosferski uvjeti povezali s ekstremnim ponašanjem požara, prije meteoroloških analiza izrađene su detaljne rekonstrukcije požara. Za slučaj požara kod Splita koristile su se digitalne vremenski referencirane fotografije sa službenih vatrogasnih kamera smještenih na tornju Zahod na jugoistočnom vrhu brda Perun (sl. 4.2). Širenje požara većinom je rekonstruirano iz 3.208 radijskih zapisa i 1.124 hitnih poziva ustupljenih od Javne vatrogasne postrojbe Split (JVP Split). Dodatne informacije o širenju i ponašanju požara dobivene su iz izjava svjedoka, intervju s vatrogascima i pilotima i fotografija s požarišta. Sve informacije su georeferencirane i korištene za približno definiranje izokrona požara. Rekonstrukcija širenja požara i izokrone požara ucrtane su na izokronu ukupne spaljene površine koju je ustupila JVP Split. Rekonstrukcija šumskog požara Forcett-Dunalley uglavnom je preuzeta iz gotovih izvješća Australskog ureda za meteorologiju (engl. *Bureau of Meteorology*, BoM). Kako bi se detaljnije povezaloponašanje požara i meteorološki uvjeti, oba šumska požara podijeljena su u nekoliko razdoblja gorenja od početka požara do znatnijeg smanjenja aktivnosti požara.

Pomoću meteoroloških podataka s postaja koje su najbliže požaru, analizirani su prizemni vremenski uvjeti. Za Splitski požar korišteni su podaci s meteorološke postaje Split-Marjan (sl. 4.2), a za požar Dunalley postaje Dunalley, Hobart, zračna luka Hobart i Campania (sl. 5.1b). Za određivanje visine oblaka pyroCb upotrijebljeni su radarski podaci s planine Koonya (Soderholm i sur., 2019). Vremenska zona u analizi Splitskog požara je univerzalno koordinirano vrijeme (UTC) što je srednjoeuropsko ljetno vrijeme (CEST) - 2 h. Za slučaj Dunalley vremena su iskazana prema australskom istočnom ljetnom vremenu (AEDT) što je UTC + 11 h. Sva su mjerenja preračunata u skladu s tim. Meteorološka opasnost od požara raslinja analizirana je pomoću kanadskog indeksa opasnosti od požara FWI (engl. *Fire Weather Index*) za slučaj Splitskog požara (Van Wagner i Pickett, 1985; Stocks i sur., 1989). FWI se sastoji od podindeksa koji pokazuju vlažnost mrtvog gorivog materijala i moguće ponašanje požara (tab. 3.1 i 3.2). Za slučaj požara Dunalley primijenjen

je australski indeks opasnosti od požara (tab. 3.3; Luke i McArthur, 1978). Oba indeksa izračunata su iz mjerenja s automatskih meteoroloških postaja. Sinoptička analiza za splitski požar uključivala je podatke njemačke meteorološke službe (njem. *Deutsche Wetterdienst*, DWD, www1.wetter3.de/Archiv/), a sinoptička analiza požara Dunalley temeljila se na analizi Nacionalnog meteorološkog i oceanografskog centra (engl. *National Meteorological and Oceanographic Centre*, NMOC).

Numeričke simulacije za studiju slučaja Split provedene su operativnim modelom za numeričku prognozu vremena ograničenog područja modelom ALADIN/HR (ALADIN International Team, 1997) koji se koristi u Državnom hidrometeorološkom zavodu (DHMZ). Model ALADIN/HR je inicijaliziran u 00:00 UTC za svaki dan požara u Splitu, sa satnim izlaznim podacima. Korištena je i dinamička adaptacija polja vjetra (ALADIN-HRDA) za splitsko područje s horizontalnim razlučivanjem od 2 km. Vertikalna struktura atmosfere analizirana je pomoću vertikalnih presjeka koji su prikazani na slici 4.1a.

Za potrebe ovog istraživanja uveden je novi produkt modela ALADIN, prostorna raspodjela niske mlazne struje (engl. *low level jet*, LLJ) koja je u točki mreže definirana prema Bonneru (1968) uz dodatni najniži kriterij od 10 ms^{-1} . Razlog tome je što su prethodna istraživanja pokazala da model ALADIN može podcijeniti maksimalnu brzinu vjetra u donjoj troposferi (npr. Vučetić i sur., 2007). Prema našim saznanjima prostorna raspodjela maksimalne brzine i visine LLJ nikada nije primijenjena u istraživanju vremena požara do danas.

BoM-ova regionalna reanaliza visoke razlučivosti za Australiju (BARRA) primijenjena je u analizi požara Dunalley (Su i sur., 2019). Najniža domena BARRA reanalize oko Tasmanije (BARRA-TA) ima horizontalnu razlučivost od 1,5 km (sl. 3.2).

Detaljnije numeričke simulacije napravljene su numeričkim modelom WRF (engl. *The Weather Research Forecasting Model*; Skamarock i sur., 2008) verzije 4.1.5. Simulacije su inicijalizirane pomoću ERA-Interim reanalize od Europskog centra za srednjoročnu prognozu vremena (engl. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, ECMWF; Dee i sur., 2011). Simulacija za hrvatski požar uključila je razdoblje od 60 sati, od 16. srpnja 2017. u 12:00 UTC do 19. srpnja 2017. u 00:00 UTC, a za australski požar 72 sata, od 3. siječnja 2013. u 00:00 UTC do 6. siječnja 2013. u 00:00 UTC. Izabrane domene (sl. 3.3. i 3.4.) imaju horizontalnu rezoluciju od 9 (d01), 4,5 (d02), 1,5 (d03) i 0,5 km (d04) (tab. 3.4) te 66 vertikalnih razina (koje prate topografiju). Za detaljniju analizu utjecaja požara na okolnu atmosferu primijenjen je model WRF SFIRE 4.2.2. (engl. *Spread FIRE*) koji omogućuje simuliranom požaru da "stvori svoje vlastite vremenske uvjete" (Coen i sur., 2013). Opis modela može se naći u Mandel i sur. (2011).

Numerička simulacija Splitskog požara trajala je 48 sati, od 16. srpnja 2017. u 12:00 UTC, što je 10 sati prije izbijanja šumskog požara (kako bi se omogućilo filtriranje početnih odstupanja u modelu tzv., spin-up time) do 18. srpnja 2017. u 12:00 UTC. Početni rubni uvjeti su jednaki kao i za simulacije modelom WRF primjenom ERA-Interim reanalize. Simulacije su pokrenute u tri ugniježdene domene u jednakom početnom položaju kao u simulacijama WRF (sl. 3.3) i jednakom razlučivosti, tj. jednakim brojem točaka horizontalne mreže i vertikalnih slojeva razlučivanja (tab. 3.4). Model požara pokrenut je u unutarnjoj domeni (d04) kojoj je dodatno povećana razlučivost na 33,3 m (tab. 3.5). Izlazni podaci modela za unutarnju domenu bili su dostupni u 10-minutnom intervalu.

Model WRF SFIRE zahtijeva topografske podatke visoke razlučivosti i podatke o pokrivenosti gorivog materijala. Jedini dostupni topografski podaci za Hrvatsku koji su pretvoreni u oblik prikladan za model WRF bili su u razlučivosti od 100 m što je dodatno interpolirano na razlučivost od 33,3 m. Budući da za Hrvatsku ne postoje besplatno dostupni podaci o gorivom materijalu visoke razlučivosti, za ovu su svrhu korišteni podaci iz baze CORINE Land Cover (CLC), također dostupni u razlučivosti od 100 m i naknadno interpolirani na 33,3 m. Sljedeće metode su iz Kartsios i sur. (2021), rasterski podaci CLC podijeljeni su u 13 kategorija različite vegetacije prema Andersonu (1982), a dodijeljena je i kategorija 14 "bez gorivog materijala" (tab. 3.6).

4. Splitski požar – rekonstrukcija

Područje koje je najviše ugroženo požarima u Hrvatskoj je obala Jadranskog mora (sl. 4.1a), zajedno s okolnim zaobaljem i otocima, kojih ima više od tisuću. Velika opasnost od požara izražena je tijekom ljetnih mjeseci, od lipnja do kolovoza, kada dugotrajna sušna razdoblja i velike vrućine pogoduju nastanku, razbuktavanju i širenju požara zbog lako zapaljive sredozemne vegetacije – različite kserofilne šume; makije i garizi vazdazelenih listača i šume četinjača (Španjol i sur., 2011). Prosječna godišnja spaljena površina na Jadranu iznosi približno 18.400 ha u oko 2.500 šumskih požara (DUZS, 2018). Veličina spaljene površine bila je najveća 2017. s oko 87.000 ha u više od 4.100 šumskih požara na Jadranu što je značilo najgoru požarnu sezonu u Hrvatskoj. Najkatastrofalniji požar sezone i u povijesti Hrvatske bio je požar u Splitu koji se dogodio u srpnju 2017. godine.

Požar je izbio 15 km jugoistočno od grada, u dolini između brežuljaka paralelnih s jadranskom obalom i orijentiranih od sjeverozapada do jugoistoka (sl. 4.2, 4.3a i A1). Reljef terena je karakteriziran strmim gorskim lancem vrlo blizu obale koji može znatno utjecati na strujanje zraka i rezultirati složenom atmosferskom dinamikom u tom području. Splitski požar trajao je devet dana, od 16. do 25. srpnja 2017., a spaljeno je 5.122 ha (Jovanović i Župan, 2017) od čega većina u prvih 30 sati od početka požara.

Splitski požar može se podijeliti u četiri vrlo aktivna požarna razdoblja u prvih 30 sati od nastanka (sl. 4.2) koja su definirana kao SPLIT 1 do SPLIT 4. SPLIT 1 odnosi se na prvih 11 sati šumskog požara, odnosno na razdoblje od kasnonoćnog zapaljenja do jutarnjih sati sljedećeg dana kada se aktivnost požara malo smanjila. U tom razdoblju protupožarni zrakoplovi nisu mogli sudjelovati u intervenciji zbog turbulencija u zraku. Razdoblje SPLIT 2 odnosi se na reaktiviranje požara tijekom ranih poslijepodnevni sati i daljnje širenje požara s mozaičkom požarnom frontom. SPLIT 3 odnosi se na kasno poslijepodnevno razbuktavanje požara uzduž cijelog područja fronte požara s najjačim silaznim (niz brdo) napredovanjem požara prema Splitu. Četvrto i posljednje razdoblje SPLIT 4 obuhvaća još jedno širenje požara niz brdo tijekom noćnih sati u istočno predgrađe Splita.

Meteorološka analiza u sljedećem 5. poglavlju ima za cilj odgovoriti na pitanja o ulozi koju su meteorološki uvjeti odigrali u najvažnijim razdobljima požara:

1. Koji meteorološki uvjeti su bili prije i neposredno nakon izbijanja požara u Splitu u kasnim noćnim satima 16. srpnja 2017.?
2. Koji su uvjeti spriječili protupožarni zrakoplov da se uključi u intervenciju od ranog jutra do kasnog poslijepodneva 17. srpnja (razdoblje SPLIT 1)?
3. Koji su uvjeti doprinijeli iznenadnom reaktiviranju požara oko podneva 17. srpnja (prijelaz između razdoblja SPLIT 1 i SPLIT 2)?
4. Kakvi su meteorološki uvjeti pratili razbuktavanje požara u svim zonama i napredovanje požara niz brdo u područje grada Splita u kasnim poslijepodnevnim satima 17. srpnja (razdoblje SPLIT 3)?
5. Koji su bili meteorološki uvjeti tijekom drugog napredovanja požara niz brdo prema istočnim prigradskim naseljima tijekom noći između 17. i 18. srpnja 2017. (razdoblje SPLIT 4)?

5. Splitski požar – meteorološka analiza

U mjesecima koji su prethodili požaru u Splitu, produženo razdoblje ekstremno toplih i suhih uvjeta uzrokovalo je kontinuirano sušenje goriva na tom području i povećanje opasnosti od požara koja je kulminirala upravo na dan požara. Godišnji maksimum FWI-a 16. srpnja 2017. na postaji Split-Marjan pokazao je stanje gorivog materijala kao vrlo suho i zapaljivo s mogućnošću brzog širenja požara, višestrukih požarnih fronti i požara krošnji, a sve se to dogodilo tijekom požara u Splitu.

Povoljni sinoptički uvjeti u ovom slučaju uključivali su: 1) jak prizemni gradijent tlaka zraka uzrokovan Azorskom anticiklonom koja se protezala prema središnjoj Europi i području niskog tlaka iznad jugoistočnog Balkana i 2) visinsku dolinu velike amplitude koja se protezala od Baltičkog do Jonskog mora uz popratnu visinsku ciklonu iznad jugoistočnog Balkana. Povezivanje područja niskog prizemnog tlaka zraka s visinskom dolinom proizvela je duboko sjeveroistočno strujanje bure nad Jadranskim morem. Duboka bura, za razliku od plitke bure, proteže se cijelom troposferom i tipična je za hladnije mjesece (Grisogono i Belušić, 2009), a u ovom se slučaju poklopila s razbuktavanjem požara i znatno pridonijela njegovom prerastanju u veliki požar.

Istraživanje je pokazalo da je došlo do spuštanja suhog zraka iz donjih slojeva stratosfere koje se dogodilo u kombinaciji s visinskom dolinom i dinamikom mlazne struje iznad područja Jadrana. Proces subsidencije počeo je 24 sata prije šumskog požara, pri čemu se suhi zrak naglo spuštao prema Splitu točno u trenutku nastanka požara te tijekom prvih 30 sati požara.

Prethodna istraživanja pokazala su da LLJ ima znatan utjecaj na ponašanje požara i djelovanje protupožarnog zrakoplovstva. LLJ je bila povezana s turbulentnom kinetičkom energijom koja može uzrokovati brzo širenje požara (Charney i sur., 2003). LLJ u atmosferi je posebno opasna u planinskim područjima (Byram, 1954). Razlog tome leži u podudaranju LLJ i uzdignutog šumskog terena što pri nastanku požara može dovesti do razbuktavanja i ekstremnog ponašanja požara. LLJ je uočena prije početka i tijekom Splitskog požara.

Na osnovi meteorološke analize u ovom istraživanju najvažnija razdoblja širenja požara mogu se obrazložiti na sljedeći način:

- 1) Jak prizemni gradijent tlaka zraka s izvorom suhog zraka iz donje stratosfere koji se zahvaljujući buri spustio do tla te je doveo do brzog širenja požara odmah nakon njegova nastanka (razdoblje SPLIT 1). U prvih nekoliko sati jaka bura nosila je požar nizbrdo na južnim padinama brda Makirine (sl. 4.2) prema dolini, gdje su vatrogasci zaustavili požar. Šumski požar se istovremeno širio uzbrdo iz dva razloga. Prvi je zbog učinka uzgona na plamen i dim između udara bure, a drugi je potencijalno posljedica vrtloga i rotora u zavjetrini ispod jezgre LLJ.
- 2) Složenost strujanja zraka na požarištu posebno je bilo izraženo tijekom razdoblja SPLIT 2 (sl. 4.3d). Iznenadno reaktiviranje požara i njegovo ponovno širenje nizbrdo (sl. 4.4) po drugi je puta nakon izbijanja ugrozio naselja u dolini koja su se tada već smatrala sigurnima od požara jer je on bio iznad njih na većoj nadmorskoj visini. Mogući razlog zbog kojeg se fronta požara vratila u dolinu je najvjerojatnije zbog smanjenja brzine i spuštanja LLJ. Smanjenjem visine LLJ došlo je do poklapanja maksimalne brzine vjetera u donjoj troposferi s frontom požara. Slabljenjem vjetera i smanjenjem turbulencije uz padine brda ponovno je uzrokovalo spuštanje požarne fronte niz brdo Makirina.
- 3) Potpuno razbuktavanje požara dogodilo se tijekom relativno mirnijih meteoroloških uvjeta. Bura je oslabila početkom razdoblja SPLIT 3 (sl. 5.7c) te su se u intervenciju mogli uključiti i protupožarni zrakoplovi. Međutim, položaj požarišta je u tom trenutku, zbog reljefa terena, zajedno s lokalnim vremenskim uvjetima vjerojatno bio presudan za brzo širenje vatre nizbrdo u gradsko područje. Požar je do tada napredovao do rubnih dijelova grada na padinama Mosora. Mjesto požara bilo je prekriveno gustom borovom šumom i obilnim suhim gorivim materijalom. Pored toga taj uzdignuti teren bio je pod utjecajem od umjerene do jake bure i zbog kanalnog učinka bura je usmjeravala požar niz jugozapadne padine, odnosno prema gradu Splitu. Smatra se da je takvo dinamičko usmjeravanje vatre nizbrdo nemoguće kontrolirati zbog velike brzine širenja i intenziteta vatre (Sharples, 2009).
- 4) Drugo napredovanje požara nizbrdo tijekom razdoblja SPLIT 4 može se objasniti umjerenom burom na tom području (sl. 5.7d) koja je prebacila požar preko vrha brda Perun prema njegovoj južnoj strani (sl. 4.2). Širenje požara nizbrdo bilo je stoga pojačano burom, a dodatno je pogodovalo i smanjenje relativne vlažnosti zraka tijekom noći, zbog spuštanja suhog zraka iz više troposfere. Također, požar je tijekom spuštanja niz brdo Perun zapalio hrastovu šumu. To je uzrokovalo najgori oblik požara tzv. požar krošnje prije nego što je zahvatio urbano područje u podnožju Peruna (sl. 4.8a i b). Takvo ponašanje požara i njegovo širenje nizbrdo iznimno je opasno za vatrogasce, ljude i imovinu.

6. Forcett-Dunalley požar – rekonstrukcija

Tasmanija, australska otočna država, s kopnom dijeli povijest čestih šumskih požara. Vrhunac požarne sezone u Tasmaniji je u kasno ljeto i ranu jesen (Luke i McArthur 1978), no nedavna istraživanja također su otkrila porast opasnosti od požara u proljeće (Fox-Hughes, 2008). Područje koje je najviše izloženo požarima je jugoistok države. Prosječna spaljena površina u razdoblju 2002. – 2011. bila je 51.920 ha u godišnje 65 šumskih požara. Najveće spaljeno područje zabilježeno je u požarnoj sezoni 2012/13. kada je u 128 šumskih požara spaljeno 119.267 ha. Najkatastrofalniji šumski požar te sezone, ali i u posljednjih pet desetljeća, bio je šumski požar Forcett-Dunalley u siječnju 2013. (Marsden-Smedley, 2014).

Požar Forcett-Dunalley trajao je 16 dana, od 3. do 18. siječnja 2013., ali je proglašen potpuno ugašenim tek 20. ožujka 2013. Započeo je slučajnim paljenjem u ruralnom naselju Forcett, 35 km sjeveroistočno od Hobarta, glavnog grada države. Požar je zaprijetio ljudskim životima i gotovo potpuno uništio općinu Dunalley. Činjenica da je u tom šumskom požaru spaljeno 25.950 ha i to većinu u samo 6 sati (Marsden-Smedley, 2014; Ndalila i sur., 2018) te proizveo pirokumulonimbus (pyroCb), prvi zabilježen u Tasmaniji (Ndalila i sur., 2019) govori o povoljnim vremenskim uvjetima za ekstremno širenje i ponašanje požara. Požar je uništio ili oštetio 431 kuću, uništio osnovnu školu i policijsku postaju u Dunalleyu i prisilio ljude da skaču u more kako bi izbjegli smrt. Jedan vatrogasac koji je sudjelovao u intervenciji je izgubio život, ali ne izravno od požara. U šumskom požaru spaljeno je 25.950 ha autohtonih šuma, poljoprivrednog zemljišta, šumskih plantaža, više od 660 km komercijalnih ograda te 10.000 grla stoke, uglavnom ovaca.

U svrhu ovog istraživanja su prva 82 sata šumskog požara Forcett-Dunalley označena kao DUNALLEY 1 do DUNALLEY 3. DUNALLEY 1 odnosi se na prva 23 sata požara ili razdoblje od nastanka 3. siječnja do podneva 4. siječnja, neposredno prije razbuktavanja požara. Razdoblje DUNALLEY 2 je jaka vatrena oluja koja se dogodila u poslijepodnevnim satima 4. siječnja. Treće i posljednje razdoblje DUNALLEY 3 odnosi se na promjenu smjera požara 5. siječnja i retrogradnog širenja 6. siječnja.

Meteorološka analiza u poglavlju 7 ima za cilj odgovoriti na sljedeća pitanja:

1. Koji su prethodni vremenski uvjeti doprinijeli šumskom požaru Forcett-Dunalley?
2. Koji su se vremenski uvjeti požara poklopili s izbijanjem šumskog požara?
3. Koji su vremenski uvjeti pratili smanjenje aktivnosti požara tijekom noći između 3. i 4. siječnja te koji su uvjeti pridonijeli promjeni ponašanja požara tijekom jutra 4. siječnja (razdoblje DUNALLEY 1)?
4. Koji su vremenski uvjeti omogućili siloviti razvoj vatrene oluje i dopustili da dođe do pirokonvekcije tijekom poslijepodneva 4. siječnja (razdoblje DUNALLEY 2)?
5. Koji su vremenski uvjeti uzrokovali promjenu smjera fronte požara i retrogradno gorenje 5. i 6. siječnja (razdoblje DUNALLEY 3)?

7. Požar Forcett-Dunalley – meteorološka analiza

Požar Forcett-Dunalley dogodio se tijekom vrlo povoljnih vremenskih uvjeta za požare i u okruženju koje pogoduje ekstremnom ponašanju požara. Izbijanje požara poklopio se s vrhuncem dugotrajnog toplinskog vala koji je bio neuobičajen prema veličini zahvaćenog teritorija Australije i dugom trajanju. Toplinski val doveo je do rekordne temperature zraka u južnoj Tasmaniji. Na postaji Hobart je 4. siječnja 2013. izmjereno 41,8° C što je najviša temperatura zraka u 120 godina. Rekordnu vrućinu u Tasmaniji uzrokovalo je jako sjeverozapadno strujanje zraka koje je donijelo vruć i suh zrak iz središnje unutrašnjosti australskog kopna. Jak sjeverozapadni vjetar uzrokovan je velikim gradijentom tlaka zraka između anticiklone nad Tasmanskim morem, sjeveroistočno od Tasmanije, i duboke ciklone jugozapadno od Tasmanije. Hladna fronta se približavala sa zapada. Sjeverozapadni vjetar utjecao je na aktivnost požara tijekom razdoblja DUNALLEY 1. Napredovanje vatre se usporilo i gotovo zaustavilo tijekom noći između 3. i 4. siječnja samo zbog kratkotrajnog smanjenja brzine vjetera. Međutim, temperatura zraka je ostala visoka (iznad 20° C na plohi od 850 hPa), a relativna vlažnost zraka niska (ispod 30 %) što je onemogućilo proces hlađenja i povećanja vlage u gorivom materijalu preko noći. Ponovno aktiviranje i razbuktavanje požara uju-

tro 4. siječnja pa do kraja razdoblja DUNALLEY 1 poklopilo se s LLJ i sjeverozapadnim vjetrom kroz cijelu troposferu.

U poslijepodnevnim satima 4. siječnja 2013., tijekom razdoblja DUNALLEY 2, požarna aktivnost je bila najveća i požar je prerastao u oluju pyroCb, jedinu dosad zabilježenu u Tasmaniji. Kako je meteorološka analiza pokazala, pyroCb je bio povezan s vrlo nestabilnom atmosferom i približavanjem linije konvergencije nad područje požara. PyroCb se formirao u zoni slabijeg vjetra smještenoj duž linije konvergencije, koja se protezala odmah niz vjetar i jugoistočno od mjesta požara. Uz izvor energije potpuno razbuktanog požara uz sjeverozapadni vjetar i izvor vlage iznad Tasmanskog mora na jugoistoku, preko kojeg se širio oblak, pyroCb je dobio potrebnu energiju za eksplozivan vertikalni razvoj. Iako se pyroCb formirao u razdoblju od nekoliko sati, eksplozivni razvoj oblaka trajao je samo nekoliko minuta. Dok su meteorološki uvjeti pri tlu pogodovali vatrenoj oluji, uvjeti u višoj troposferi nisu bili toliko povoljni zbog olujnog vjetra i mlazne struje na tropopauzi. Međutim, izvor topline od požara gdje je gorjela suha šuma eukaliptusa bio je dovoljno velik i intenzivan, a oslobađanje energije je moralo biti ogromno da bi pyroCb mogao dosegnuti tropopauzu, što se i dogodilo u ovom slučaju.

PyroCb proizveo je dva udara groma, koji u ovom slučaju nisu zapalili dodatne požare jer se pyroCb gibao nad Tasmanskim morem. Radiosondažni podaci potvrdili su povoljne meteorološke uvjete za elektrifikaciju oblaka. Radiosondaža je također pokazala da je vrlo moguće došlo do olujnih silaznih strujanja unutar pyroCb-a. Takva silazna strujanja mogu utjecati na povećanje brzine i promjenu smjera okolnog vjetra, a time požar može postati vrlo nepredvidljiv i biti velika prijetnja vatrogascima (npr., Fromm i sur., 2006; Trentmann i sur., 2006; Fromm i sur., 2012). To objašnjava razbuktanje požara i enormno povećanje spaljene površine do kraja razdoblja DUNALLEY 2.

Prolaz hladne fronte u prvim satima 5. siječnja 2013., označenim kao DUNALLEY 3 razdoblje, uzrokovao je smanjenje brzine vjetra i advekciju hladnog i vlažnog zraka s jugozapada. Ovi vremenski uvjeti zaustavili su napredovanje požara prema jugoistoku i uzrokovali širenje šumskog požara retrogradno, odnosno sjeveroistočno od mjesta izbijanja požara, dalje u unutrašnjost kopna.

8. Meteorološki uvjeti tijekom požara u Hrvatskoj i Australiji – studija usporedbe

Dva katastrofalna šumska požara sa suprotnih strana svijeta i s različitih polutki povezuju neki zajednički meteorološki uvjeti. Uvjeti koji su prethodili požarima bili su nedvojbeno podjednaki: veliki manjak oborine i iznadprosječna temperatura zraka u mjesecima prije oba požara. Takvi vremenski uvjeti posljedično su utjecali na opasnost od požara raslinja koja je u oba slučaja bila ekstremna. Vrlo velika opasnost od požara pokazuje moguće ekstremno ponašanje požara koje uključuje brzo širenje vatre, višestruke vatrene fronte i požar krošnji. Prema rekonstrukciji katastrofalnih požara, takvo ponašanje požara dogodilo se u oba slučaja.

Prizemni vremenski uvjeti tijekom nastanka požara razlikovali su se u temperaturi zraka i relativnoj vlažnosti zraka, ali su bili podjednaki prema jačini vjetra. Osnovni razlog razlike u temperaturi zraka i relativnoj vlažnosti zraka je zbog toga što se požar kod Splita dogodio u kasnim večernjim satima i nakon znatne promjene vremenskih uvjeta, a požar Dunalley počeo je u ranim poslijepodnevnim satima, dan prije vrhunca toplinskog vala u Tasmaniji. Ipak, prizemni uvjeti u slučaju Splita su također bili povoljni za širenje vatre. Oba požara je od samog nastanka raspirivao jak prizemni vjetar.

Visinski atmosferski uvjeti u analiziranim su slučajevima bili različiti zbog različite sinoptičke situacije. Katastrofalni šumski požar u Splitu bio je povezan s visinskom dolinom i praćen epizodom duboke i jake bure koja je pogodovala poniranju suhog zraka s visine, a ekstremno ponašanje požara u slučaju Dunalley dogodilo se na vrhuncu toplinskog vala i neposredno prije prolaza hladne fronte. Ekstremno ponašanje požara uključivalo je širenje požara nizbrdo u slučaju Splita i pirokonvekciju u slučaju Dunalley. Dakle, požar u Splitu može se definirati kao požar nošen jakim vjetrom, a požar Forcett Dunalley bio je kombinacija požara zbog jakog vjetra i uzgona.

9. Preliminarne simulacije za područje Hrvatske WRF SFIRE modelom

Preliminarni rezultati WRF SFIRE modela za područje Hrvatske pokazali su mogućnost da se simulira širenje požara i međudjelovanje požara i atmosfere. Uspješne simulacije daju prve numeričke dokaze da šumski požar s područja jadranske obale može promijeniti dinamičku strukturu okolne atmosfere, što se slaže s opažanjima s požarišta.

Detaljna rekonstrukcija katastrofalnog požara kod Splita u srpnju 2017. omogućila je verifikaciju simulacija WRF SFIRE modelom. Simulirani požar do neke je mjere reproducirao stvarni požar, ponekad precjenjujući brzinu širenja, ali općenito podcjenjujući konačnu spaljenu površinu. Dva su najvjerojatnija objašnjenja za odstupanje između simulacije i stvarnih rezultata. Prvi je zanemarivanje vatrogasnih intervencija u modelu, a koje je bilo intenzivno tijekom cijelog trajanja požara i iz zraka i sa zemlje. Drugi je zbog grube razlučivosti početnih podataka koji se odnose na gorivi materijal i topografiju. Dostupni podaci na razlučivost od 100 m naknadno su interpolirani na finiju mrežu požara od 33,3 m. Podaci o gorivom materijalu visoke razlučivosti za Hrvatsku nisu javno dostupni, ali dostupni su topografski podaci visoke razlučivosti. Međutim, oni nisu asimilirani u ovim preliminarnim simulacijama.

Preliminarne simulacije osmišljene su kao smjernice za daljnju upotrebu modela WRF SFIRE za istraživanje budućih stvarnih požara raslinja dok se rješava asimilacija ulaznih podataka visoke razlučivosti. Također, preliminarne simulacije WRF SFIRE nisu bile optimizirane na brzinu. Stoga, kako bi se takve simulacije širenja požara i međudjelovanje atmosfere i požara koristile za operativno prognoziranje požara i njihovo suzbijanje u Hrvatskoj, u budućim istraživanjima treba pronaći odgovarajuću postavku modela kojom bi se dobivali rezultati gotovo u stvarnom vremenu. Model WRF SFIRE pokazao se vrlo važnim u upravljanju požarima diljem svijeta (npr., Peace i sur., 2015; Peace i sur., 2016; Coen i sur., 2013). S točnijim prognozama požara u budućnosti, što bi se moglo postići ulaznim podacima finije razlučivosti, taj model ima potencijal za operativnu primjenu i u Hrvatskoj. Moguća primjena za upravljanje požarima kod nas uključuje prognozu širenja i intenziteta požara koji ovisi o promjenjivim vremenskim uvjetima, dostupnom gorivom materijalu i topografiji, planiranje učinkovitog i sigurnog raspoređivanja vatrogasnih snaga za gašenje požara na zemlji i iz zraka, sprječavanje požara na području između prirodnih i urbanih područja, učinkovito planiranje evakuacijskih ruta itd. Rezultati modela WRF SFIRE u ovom istraživanju pokazuju da je model važan za istraživanje vremenskih uvjeta tijekom požara raslinja kako bi se bolje razumjele ove opasne prirodne pojave te spriječile njihove negativne posljedice.

10. Zaključak

10.1. Zaključci i rasprava

Ovo je istraživanje potvrdilo takve meteorološke uvjete koji su se u više slučajeva do danas podudarali s katastrofalnim šumskim požarima. Splitski požar bio je povezan s jakom burom i spuštanjem hladnog i suhog zraka iz donjih slojeva stratosfere, a požar Dunalley dogodio se na vrhuncu toplinskog vala i neposredno prije prolaska hladne fronte. Istraživanje je također potvrdilo da analizirani šumski požari sa suprotnih strana svijeta imaju neke zajedničke vremenske značajke koje su prethodile požaru i za vrijeme njihova trajanja. U mjesecima prije nastanka oba požara bilo je vrlo sušno i vruće. Tako su ekstremni vremenski uvjeti u oba slučaja pridonijeli jakom isušivanju gorivog materijala na područjima gdje su nastali. To je uzrokovalo vrlo veliku opasnost od požara raslinja koja je upozoravala na ekstremno ponašanje požara što se dogodilo u oba slučaja. Istraživanje je pokazalo da su oba šumska požara bila nošena vjetrom od trenutka nastanka jer su se oba požara nalazila u području velikog gradijenta tlaka zraka što je rezultiralo jakim prizemnim vjetrom. Kod Splitskog požara hladan zrak u područje požara donio je sjeveroistočni vjetar, bura, a u slučaju Dunalley-a pritjecanje vrućeg i suhog zraka iz središnjeg australskog kopna uzrokovao je sjeverozapadni vjetar.

Važna otkrića o atmosferskoj dinamici povezana sa Splitskim požarom bilo je duboko sjeveroistočno strujanje bure nad Jadranskim morem koje je uključivalo hidraulički skok, nisku mlaznu struju (LLJ) i odsutnost tropopauze što je dovelo do spuštanja suhog i hladnog zraka s visine. Ovo je prva analiza koja istražuje prostornu raspodjelu LLJ. Produkti LLJ, prostorna raspodjela maksimi-

malne brzine vjetra u donjoj troposferi i njezine visine, mogu poslužiti kao predkazatelj mogućeg ekstremnog ponašanja požara u budućnosti.

Najvažniji vremenski uvjeti kod požara Dunalley su povezani s pirokonvekcijom i razbuktavanjem požara u požarnu oluju. Jak i brz razvoj vatrene oluje bio je povezan s vrlo nestabilnom atmosferom i potaknut približavanjem linije konvergencije u satima prije prolaska hladne fronte. PyroCb se formirao u zoni slabijeg vjetra smještenoj duž linije konvergencije koja se protezala odmah niz vjetar od položaja požara. Moguća silazna strujanja unutar pyroCba su u slučaju tog požara objasnili razbuktavanje požara i veličinu spaljene površine.

Katastrofalni šumski požari analizirani u ovom radu pružili su priliku za istraživanje meteoroloških uvjeta tijekom najvećih požara raslinja i otkrivanje mehanizama koji doprinose njihovom stvaranju i brzom širenju. Iako su pojedinačne okolnosti promatranih požara varirale, istraživanje šumskih požara na tako međusobno dalekim područjima pokazalo je neke zajedničke značajke međudjelovanja između atmosfere, vegetacije i topografije. Vrijednost takvih usporednih istraživanja međudjelovanja požara s okolicom je što se njihovi rezultati mogu primijeniti globalno. Te nove spoznaje mogu biti dodatni rani pokazatelj povoljnih vremenskih uvjeta za nastanak požara raslinja pa tako poboljšavaju predviđanje opasnosti od njihove pojave i ekstremnog ponašanja te doprinose njihovom sprječavanju.

Dodatni doprinos ovog rada hrvatskim istraživanjima i poznavanju vremenskih uvjeta povezanih s požarima je primjena združenog modela požar–atmosfera, koji je prvi put primijenjen za požar raslinja na području Hrvatske. Preliminarni rezultati združenog modela potvrdili su međudjelovanje između požara i atmosfere kod Splitskog požara. To je prvi numerički dokaz takvog međudjelovanja koji se dogodilo duž jadranske obale. Iako bi se združene simulacije nad Hrvatskom trebale poboljšati ulaznim podacima vegetacije i topografije finijom razlučivosti, ovo istraživanje je postavilo temelje za buduća poboljšanja i istraživanja.

10.2. Preporuke za unapređenje vatrogasnih intervencija na požarima raslinja u Hrvatskoj

Ovaj dvojni doktorat pružio je jedinstvenu priliku za suradnju između hrvatskih i australskih znanstvenika koji se bave istraživanjem vremenskih prilika tijekom požara raslinja. Razmjena znanja i otvoreni dijalog s vatrogascima i pilotima protupožarnih zrakoplova iz obje zemlje otvorili su pitanja o tome kako hrvatsko vatrogastvo može imati koristi od niza preporuka koje su već primijenjene u Tasmaniji i ostatku Australije. Kod profesionalnog upravljanja vatrom u Hrvatskoj treba razmotriti uspostavljanje i/ili poboljšanje sljedećeg:

- a) Hitno uspostaviti upozorenja javnosti na opasnosti na požara raslinja.
- b) Osigurati stalnu meteorološku podršku u glavnom vatrogasnom zapovjedništvu tijekom požarne sezone.
- c) Poboljšati suradnju između meteorologa i vatrogasaca kako bi se bolje interpretirali i razumjeli stvarni i prognostički meteorološki produkti.
- d) Uspostaviti redovitu meteorološku obuku za profesionalne vatrogasce i pilote protupožarnih zrakoplova. Obuka iz meteorologije povezana s požarima raslinja trebala bi uključivati osnove o meteorološkim motrenjima i podacima, indekse meteorološke opasnosti od požara, kritičnim vremenskim prilikama pogodnim za požare u Hrvatskoj te izobrazba o 161 prognostičkom produktu numeričkih modela zajedno s prikazivanjem rezultata najnovijih meteoroloških istraživanja povezanih s požarima.
- e) Uspostaviti glavni komunikacijski centar tijekom požarne sezone koji bi osigurao jedan pouzdani izvor informacija i redovito informirao javnost o trenutnim požarima, upravljanju požarima i vremenskoj prognozi relevantnoj za požare koji su u tijeku.
- f) Financijski podržati istraživanja iz meteorologije povezana s požarima uključujući istraživanja ponašanja požara. Uspostaviti centar za istraživanje vremenskih prilika i ponašanja požara koji bi osigurao suradnju između meteorologa i požarnih analitičara. To je neophodno kako bi se analizirali prijašnji požari, provodili kontrolirani požarni eksperimenti, testirali i/ili usvojili modeli ponašanja požara te testirao model FWI na osnovnim tipovima vegetacije u Hrvatskoj te pripremile validacije modela ponašanja požara.

Poboljšanje vremenske prognoze požara:

- a) Osigurati specijalizirane detaljne vremenske prognoze za pojedinačne požare raslinja.
- b) Uvesti prognozu širenja dima od požara te prognozu i upozorenja na nisku kvalitetu zraka nastalu uslijed požara raslinja.
- c) Uvesti potpunu zabranu paljenja vatre na otvorenom izvan požarne sezone u suradnji s meteorolozima kada postoje povoljne vremenske prilike za nastanak požara.

Znanstvena istraživanja:

- a) Suradivati s europskim i drugim znanstvenicima koji se bave vremenskim uvjetima tijekom požara u svrhu razmjene znanja, posebno u modeliranju vremenskih uvjeta i ponašanja požara.
- b) Suradivati s međunarodnim stručnjacima i testirati mogućnosti uvođenja smanjenja gorivog materijala izvan požarne sezone (uz blisku suradnju s meteorolozima).
- c) Osigurati obuku za analitičare koji se bave ponašanjem požara.
- d) Osigurati redovita meteorološka izvješća o velikim šumskim požarima koji su prouzročili velika materijalna i/ili prirodna razaranja, smrt ili uzrokovali specifično ponašanja požara i učiniti ih javno dostupnima.
- e) Uključiti podatke vegetacije i topografije visoke razlučivosti u model WRF SFIRE.
- f) Testirati model WRF SFIRE na brzinu širenja požara i uključiti ga u operativnu uporabu.
- g) Vremenski i prostorno proširiti prognozu FWI koristeći već raspoloživi operativni model.
- h) Proširiti mrežu automatskih meteoroloških postaja u svrhu zaštite šuma i drugog raslinja od požara i nabaviti mobilnu meteorološku postaju u svrhu meteoroloških mjerenja na samom požaru.
- i) Redovito davati klimatsku analizu u svrhu procjene opasnosti od požara.
- j) Razmotriti operativno uvođenje Hot Dry Windy indeksa meteorološke opasnosti od požara.

Podizanje javne svijesti o opasnosti od požara raslinja i smanjenje njihove opasnosti mogu se postići i poboljšati sljedećim:

- a) Stalno educirati javnost o opasnosti od požara raslinja (i izvan požarne sezone).
- b) Educirati turiste o opasnosti od požara raslinja i potpuno zabraniti paljenje vatre na otvorenom tijekom ljetne sezone za vrijeme njihova boravka u Hrvatskoj.
- c) Uključiti izobrazbu o opasnosti od požara raslinja i načinu smanjenja te opasnosti u školski program.
- d) Stalno educirati novinare o upravljanju požarima, opasnosti od požara i njegovom smanjenju, ponašanju požara, vremenskim uvjetima tijekom požara raslinja te klimatskim promjenama koje utječu na požare i požarni režim.
- e) Educirati poljoprivrednike o kompostiranju biljnih ostataka i izbjegavati njihovo spaljivanje, posebno u proljeće i jesen.
- f) Educirati javnost kako reagirati i postupiti kada izbije požar raslinja.
- g) Održavati osnovnu vatrogasnu obuku za javnost koja je dostupna na zahtjev.
- h) Podići svijest o održavanju čistog pojasa bez gorivog materijala oko stambenih zgrada i kuća te na poljoprivrednim površinama.

Ostalo:

- a) Redovito čistiti protupožarne puteve unutar šuma i drugih prirodnih područja.
- b) Uvesti strože propise o održavanju područja čistim od gorivog materijala te o vrsti vegetacije planirane oko novogradnja i stambenih kuća u hrvatsko zakonodavstvo.
- c) Planirati pošumljavanje (površinu i izbor vrste vegetacije) sukladno šumskogospodarskim planovima s izradom pristupnih šumskih-protupožarnih cesta.

Provedba predloženih koraka dovela bi do poboljšanja vatrogasnog upravljanja požarima raslinja, poboljšanja vremenske prognoze za potrebe požara koja bi osigurala točniju i pravodobnu meteorološku informaciju vatrogascima i javnosti, povećala svijest javnosti o opasnosti od požara, povećala znanje o vremenskim uvjetima povoljnim za požare među vatrogascima te, u cjelini, povećala otpornost na požare i smanjila opasnost od požara raslinja u Hrvatskoj uslijed klimatskih promjena.

Abstract: The main focus of this study was to investigate fire weather of two catastrophic wildfires, one from Croatia, which is a part of one of the world's most fire prone areas – the Mediterranean basin and other from Tasmania, a part of well-known fire continent – Australia. The Croatian case study included the Split wildfire in July 2017, the most severe wildfire in history given the size and unexpected fire behavior, which produced the downslope fire runs into the densely populated area while the Australian case study included the Forcett-Dunalley wildfire in January 2013, which caused vast destruction, rapid fire spread and generated firestorm in form of pyroCb, the first on record in Tasmania. Meteorological analyses of wildfires were preceded by their reconstruction and definition of the most severe burn periods in order to associate atmospheric conditions and fire behavior in detail. The study draws similarities between dynamic atmospheric processes and mechanisms that occurred in chosen wildfire cases and implemented a coupled fire-atmosphere model for the first time in Croatia.

The study also contains comprehensive literature review of fire weather meteorology together with past and future climate influencing fire risk at the Adriatic coast in Croatia and in southeast Australia, including Tasmania.

The research has showed that both wildfires were wind driven from the ignition due to wildfires' locations situated in the area of tight air pressure gradient which resulted in strong gusty surface wind. In the case of Split, the ignition of the wildfire coincided with an episode of strong downslope bura windstorm, while in Dunalley case wildfire occurred at the peak of the heatwave and right before the cold front passage. The antecedent conditions in both cases included the drier and warmer-than average periods in months' prior the wildfires, which contributed to continued drying out fuels in the area and had an impact on fire danger rating. In particular, the FWI reached its annual maximum exactly on the day of the Split wildfire, while in the case of Dunalley FFDI reached 'catastrophic' category and got close to the all-time state record.

Important findings on atmospheric dynamics in the Split case of included long amplitude and shortwave upper-level trough, which caused the cool and dry air outbreak and produced a deep northeasterly bura flow. Upper-level features of the deep bura flow included hydraulic jump, dry air subsidence and low-level jet (LLJ). This research is the first known to present spatial distribution of LLJ.

The explosive pyroCb development in the case of the Dunalley was triggered by the highly unstable atmosphere and the line of convergence over the wildfire's area in the hours prior to the cold front passage. Also, combustion processes within the escalated wildfire further enhanced instability and contributed to the blow-up up to 12 km height, in spite of the strong jet stream at the tropopause. Enhanced fuel consumption in combination with complex local topography is found to play an important role in the total fire escalation in the Split case as well.

SADRŽAJ CONTENTS

	<i>Izvorni znanstveni rad Original scientific paper</i>	
Petrov, A. Grisogono, B.	Detection of climatic fluctuations by Hilbert-Huang method in the data of Zagreb-Grič Centennial Observatory, Croatia Detekcija klimatskih kolebanja Hilbert-Huangovom metodom na podacima stoljetnog opservatorija Zagreb-Grič, Hrvatska	3
	<i>Izvorni znanstveni rad Original scientific paper</i>	
Viher, M. Krulić Mutavčić, B. Kerbavčić Degač, V.	Development of bi-normalized burn ratio method on the catastrophic forest fire event 14 th July 2022 near Vodice, Croatia Razvoj metode bi-normaliziranog omjera požarenosti na događaju katastrofalnog šumskog požara 14. srpnja 2022. godine kod Vodica, Hrvatska	17
	<i>Izvorni znanstveni rad Original scientific paper</i>	
Muselli, M. Beysens, D.	Dew and rain water potential in North Matabeleland (Zimbabwe) Vodni potencijal rose i kiše u sjevernom Matabelelandu (Zimbabwe)	31
	<i>Izvorni znanstveni rad Original scientific paper</i>	
Lukšić, I.	Identifikacija vjetrova obalne i planinske cirkulacije na otoku Braču Identification of coastal and mountain circulation winds on the island of Brač	47
	<i>Prethodno priopćenje Preliminary contribution</i>	
Toman, I. Grisogono, B.	A preliminary case study of the possible Adriatic tropical-like cyclone from the 21 st of January 2023 Preliminarna analiza mogućeg slučaja jadranske ciklone tropskih karakteristika od 21. siječnja 2023.	77
	<i>Stručni rad Professional paper</i>	
Cvitan, L.	Klimatski potencijal turizma Malog Lošinja u dva preklapajuća klimatska razdoblja Climate potential of tourism in Mali Lošinj in two overlapping climate periods	83
	<i>Doktorska disertacija-sažetak D.Sc. Thesis-Summary</i>	
Keresturi, E.	Initial condition perturbations in a convective scale ensemble prediction system	105
Stanešić, A.	Mezoskalna asimilacija podataka u regionalnom atmosferskom numeričkom modelu	115
Radilović, S.	Opažanja i modeliranje klimatskih trendova temperature zraka i mora za jadransko područje	123
Nimac, I.	Obilježja i modeliranje urbanog toplinskog otoka	129
Ivasić, S.	The effects of teleconnections on climate variability of the North Atlantic–European area	135
Čavlina Tomašević, I.	Analysis of extreme fire weather during catastrophic wildfires in Croatia and Australia	139
Jelić, D.	Obilježja tuče u sadašnjim i budućim klimatskim uvjetima na području Hrvatske	151
Lepri, P.	Značajke bure u prizemnom sloju atmosfere iznad brdovitog terena	157
	<i>Otvoreni stupci</i>	
	Znanstveno-stručni skup Meteorološki izazovi 8 – sažeci	163
	In memoriam: Marina Mileta (10. 10. 1944. – 17. 1. 2021.)	209
	In memoriam: Vjera Juras (29. 7. 1936. – 10. 5. 2021.)	210
	In memoriam: Andrija Bratanić (9. 4. 1940. – 14. 7. 2021.)	211
	In memoriam: Ivan Lukšić (27. 9. 1931. – 17. 11. 2021.)	212
	In memoriam: Alen Sajko (19. 9. 1969. – 18. 1. 2023.)	213