

# Sinoptički i mezoskalni uvjeti bujičnih poplava na području Hrvatske

---

Severić, Klara

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:977185>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-28**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Klara Severić

SINOPTIČKI I MEZOSKALNI UVJETI BUJIČNIH  
POPLAVA NA PODRUČJU HRVATSKE

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA

SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOLOGIJA

Klara Severić

Diplomski rad

Sinoptički i mezoskalni uvjeti bujičnih  
poplava na području Hrvatske

Voditeljica diplomskog rada: dr. sc. Tanja Renko

Suvoditeljica diplomskog rada: prof. dr. sc. Maja Telišman Prtenjak

Zagreb, 2024.

*Najveće hvala mojoj prvoj mentorici dr. sc. Tanji Renko na ideji i motivaciji za izradu diplomskog rada. Hvala na svom prenesenom znanju, korisnim savjetima, izdvojenom vremenu i lijepoj suradnji.*

*Hvala i suvoditeljici diplomskog rada prof. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak na velikoj pomoći i savjetima za završetak diplomskog studija.*

*Zahvaljujem se DHMZ-u na ustupljenim podacima bez kojih ovaj rad ne bi bio moguć.*

*Kolege, prijatelji i obitelj bili su najveća podrška tokom cijelog studija, a posebice moji roditelji i sestra koji su uvijek vjerovali u mene i davali mi vjetar u leđa stoga im se neizmjereno zahvaljujem.*

# Sažetak

Analizirani su događaji bujičnih poplava koji su nastali iz konvektivnih sustava na području Hrvatske u razdoblju od 2012. do 2022. godine. Pregledom biltena Državnog hidrometeorološkog zavoda i zapisa u medijima o događajima obilnih oborina izdvojeni su slučajevi bujičnih poplava te je provedena dodatna analiza grmljavinske aktivnosti nakon čega je odabrano ukupno 97 slučajeva. Cilj rada je bio napraviti prostornu i vremensku razdiobu događaja te opisati sinoptičke i mezoskalne uvjete koji pogoduju nastanku bujičnih poplava. Kao jedna od sve češćih i intenzivnijih vremenskih nepogoda, bujične poplave uzrokuju značajne materijalne štete, a ponekad i ljudske žrtve. Zbog spoja meteoroloških i hidroloških uvjeta koji uzrokuju bujične poplave, njihovo prognoziranje je izuzetno zahtjevno. U ovom radu stavljen je naglasak na meteorološke uvjete, odnosno na traženje meteoroloških uzroka koji su nužni za nastanak konvekcije, a zatim i obilne oborine koja nastaje iz konvektivnih sustava te uzrokuje bujične poplave.

Događaji bujičnih poplava većim djelom su zastupljeni u primorskom djelu Hrvatske, ali je svake godine barem jedna događaj zabilježen i u kontinentalnom djelu. Najveći broj slučajeva događa se u ljetnoj i jesenskoj sezoni kada je i najizraženija konvektivna aktivnost te u poslijepodnevnim satima i tijekom noći. Analizom visinskih sinoptičkih karti na 500 hPa plohi, najčešće je zastupljen jugozapadni režim strujanja. Za mezoskalnu analizu izračunati su termodinamički i kinematički parametri iz odabranih radiosondažnih mjerenja koja su bila reprezentativna za 87 slučajeva. Dobiveno je da bujične poplave nastaju u uvjetima srednjeg iznosa CAPE-a, ali velike relativne vlažnosti i oborive vode kroz duboki atmosferski sloj uz slabo do umjereno vertikalno smicanje vjetra.

**Ključne riječi:** konvekcija, obilna oborina, bujična poplava, Hrvatska

# Synoptic and mesoscale conditions of flash floods in Croatia

## Abstract

Flash flood events which are developed from convective system on territory of Croatia in the period from 2012 to 2022 were analyzed. By reviewing the bulletins of the Croatian Meteorological and Hydrological Service and records in the media about the events of heavy precipitation, cases of flash floods were isolated, after which an additional analysis of thunderstorm activity was carried out. Out of those a total of 97 cases were selected. The goal of the research was to conduct a spatial and temporal distribution of events and to describe the synoptic and mesoscale conditions that favor the occurrence of flash floods. As one of the increasingly frequent and intense weather disasters, flash floods cause considerable material damage and sometimes human casualties. Due to the combination of meteorological and hydrological conditions that cause flash floods, their forecasting is extremely challenging. In this paper, the emphasis is on meteorological conditions, i.e. on searching for ingredients that are necessary for the occurrence of convection, and then the heavy precipitation which occurs from convective systems and causes flash floods.

Flash flood events are mostly represented in the coastal part of Croatia, but every year at least one event is recorded in the continental part. The largest number of cases occurs in the summer and autumn seasons, and in the afternoon and during the night when the convective activity is most pronounced. After analysis of upper-level synoptic charts at the 500 hPa level, the southwesterly flow regime is most often represented. For mesoscale analysis, thermodynamic and kinematic parameters were calculated from selected radiosonde measurements that were representative for 87 cases. It was found that flash floods occur in conditions of medium CAPE, but with high relative humidity and precipitable water through the deep atmospheric layer and weak to moderate vertical wind shear.

**Keywords:** convection, heavy precipitation, flash flood, Croatia

# Sadržaj

<b>Popis kratica</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Uvod</b> .....	<b>2</b>
1.1. Konvekcija .....	2
1.1.1. Duboka mokra konvekcija .....	3
1.1.2. Organizirana konvekcija .....	4
1.2. Poplave .....	8
1.3. Bujične poplave .....	9
1.3.1. Meteorološki uvjeti za nastanak bujičnih poplava .....	10
1.3.2. Obilježja oluja koje uzrokuju bujične poplave .....	12
1.4. Dosadašnja istraživanja bujičnih poplava .....	14
<b>2. Podaci i metode</b> .....	<b>19</b>
2.1. Područje istraživanja .....	19
2.2. Baza događaja .....	20
2.3. Podaci o munjama - LINET .....	21
2.4. Tipovi vremena .....	22
2.5. Radiosondažni podaci .....	22
<b>3. Rezultati i diskusija</b> .....	<b>28</b>
3.1. Prostorna i vremenska razdioba bujičnih poplava na području Hrvatske .....	28
3.2. Visinska sinoptička analiza .....	32
3.3. Mezoskalna analiza .....	34
3.4. Analiza slučaja bujične poplave 2. listopada 2018. ....	40
<b>4. Zaključak</b> .....	<b>43</b>
<b>Literatura</b> .....	<b>45</b>
<b>Dodatak A</b> .....	<b>50</b>
<b>Dodatak B</b> .....	<b>54</b>

## Popis kratica i simbola

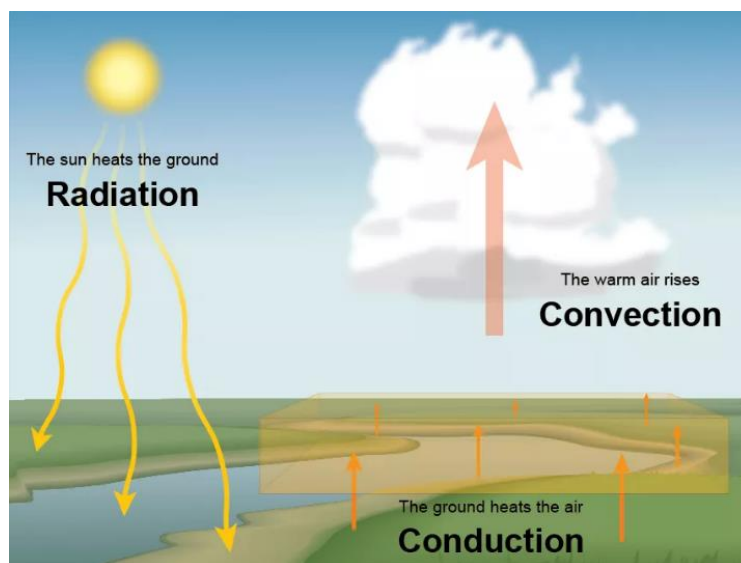
BS	vertikalno smicanje vjetra (engl. <i>Bulk Shear</i> )
CAPE	raspoloživa konvektivna potencijalna energija (engl. <i>Convective Available Potential Energy</i> )
Cb	kumulonimbus
CG	munje tipa oblak-tlo (engl. <i>Cloud to Ground</i> )
CIN	konvektivna inhibicija (engl. <i>Convective Inhibition</i> )
Cu con	kumulus kongestus
D	trajanje oborine
DHMZ	Državni hidrometeorološki zavod
DMK	duboka mokra konvekcija
DWD	Njemačka meteorološka služba (njem. <i>Deutscher Wetterdienstes</i> )
E	učinkovitost oborine
EL	ravnotežni nivo (engl. <i>Equilibrium Level</i> )
IC	munje unutar oblaka (engl. <i>Intra-Cloud</i> )
LCL	nivo kondenzacije (engl. <i>Lifting Condensation Level</i> )
LFC	nivo slobodne konvekcije (engl. <i>Level of Free Convection</i> )
LINET	Mreža detekcije munja (engl. <i>Lightning detection NETWORK</i> )
mAGL	engl. <i>meters Above Ground Level</i>
MCC	mezoskalni konvektivni kompleks (engl. <i>Mesoscale Convective Complex</i> )
MCS	mezoskalni konvektivni sustav (engl. <i>Mesoscale Convective System</i> )
ML	engl. <i>Mixed Layer</i>
MU	engl. <i>Most Unstable</i>
P	proizvedena količina oborine
QRS	kvazistacionaran kišni sustav (engl. <i>Quasi-stationary Rain System</i> )
R	intenzitet oborine
RH	relativna vlažnost (engl. <i>Relative Humidity</i> )
SB	engl. <i>Surface Based</i>
SL	olujne pruge (engl. <i>Squall Lines</i> )
TPW	ukupna oboriva voda (engl. <i>Total Precipitable Water</i> )



# 1. Uvod

## 1.1. Konvekcija

Gibanje u fluidu potaknuto različitim svojstvima unutar njega, kao što su razlika u temperaturi i gustoći, koje dovodi do prijenosa i miješanja svojstava u fluidu naziva se konvekcija. To je općenita definicija konvekcije dok se u meteorologiji konvekcijom smatra vertikalno gibanje zraka te se dijeli na slobodnu i prisilnu konvekciju. Slobodna konvekcija nastaje zbog razlika u gustoći fluida, dok je prisilna konvekcija izazvana nekim mehaničkim silama, u atmosferi najčešće orografijom (Gelo i sur., 2005). Glavni uzrok nastanka konvekcije je razlika u temperaturi zbog zagrijavanja Zemljine površine što je shematski prikazano na slici 1.1. Topli zrak je rjeđi te samim time lakši zbog čega se diže u više slojeve atmosfere dok teži, hladniji zrak tone. Topli zrak se prilikom dizanja hladi i kondenzira pri čemu nastaju oblaci vertikalnog razvoja te može doći do razvoja olujnih sustava<sup>1</sup>.



Slika 1.1. Shematski prikaz prijenosa toplinske energije u atmosferi: *radijacija* – Sunce zagrijava Zemljinu površinu; *kondukcija* – Zemljina površina zagrijava zrak u najnižem, prizemnom sloju atmosfere; *konvekcija* – topli zrak se diže pri čemu se hladi i kondenzira. Izvor: <https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/transfer-of-heat-energy>.

<sup>1</sup> <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/how-weather-works/what-is-convection>

Konvekcija se dijeli i na *suhu* i *mokru*, ovisno o tome je li došlo do ukapljivanja i nastanka oblaka ili ne. Kada dođe do nastanka oblaka, razlikujemo *plitku* i *duboku* konvekciju. Plitka konvekcija je vertikalno gibanje mase zraka iz nižih slojeva atmosfere do visine 500 hPa plohe, dok je duboka konvekcija dizanje zraka iznad 500 hPa plohe (Davison, 1999). Konvekcija postoji na svim skalama – mikroskali, mezoskali i makroskali gdje se događaju složeni atmosferski procesi (Emanuel, 1994; Grisogono i sur., 2009).

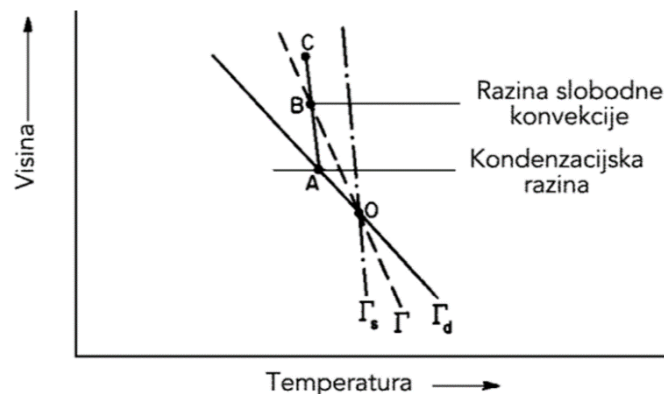
### **1.1.1. Duboka mokra konvekcija**

Duboka mokra konvekcija (DMK) opisuje se kao turbulentan, 3D, nehidrostatički proces u kojem ne vrijedi Boussinesqova aproksimacija koja smatra fluid nestlačivim (npr. Grisogono i sur., 2009). Zbog prodiranja duboko u više slojeve donje atmosfere točnije sve do vrha troposfere, a ponekad i u donju stratosferu, nastaje oblak jakog vertikalnog razvoja te uzrokuje vremenske neprilike pri tlu. Meteorološki uvjeti koju su potrebni za nastanak DMK-a su (Dowell i sur., 1996):

1. uvjetna nestabilnost,
2. dovoljno vlage,
3. mehanizam podizanja česti.

Stabilnost atmosfere ovisi o promjeni temperature s visinom. Ako je stopa ohlađivanja između suhoadijabatičkih i pseudoadijabatičkih vrijednosti, atmosfera je uvjetno nestabilna, odnosno stabilna je za suhi zrak, a nestabilna za vlažan zrak (Holton, 2004; Grisogono i sur., 2009). Stoga mora postojati neki mehanizam podizanja kako bi se čest vlažnog zraka podigla do nivoa kondenzacije (LCL, engl. *Lifting Condensation Level*) gdje će postati zasićena i gdje će nastati baza oblaka. Mehanizam podizanja može biti spontani poput zagrijavanja podloge ili forsirani orografskim preprekama, frontalnim sustavima i obalnim cirkulacijama (npr., Pandžić, 2002; Grisogono i sur., 2009). Daljnje dizanje uzrokovat će kondenzaciju i oslobađanje latentne topline sve dok čest ne postane toplija, a time i rjeđa od okolnog zraka. To se događa na nivou slobodne konvekcije (LFC, engl. *Level of Free Convection*) iznad kojeg se čest može slobodno sama dizati pod utjecajem pozitivnog uzgona (Holton, 2004). Čest će ubrzavati prema gore sve dok ne postane hladnija od okoline te će tada doseći

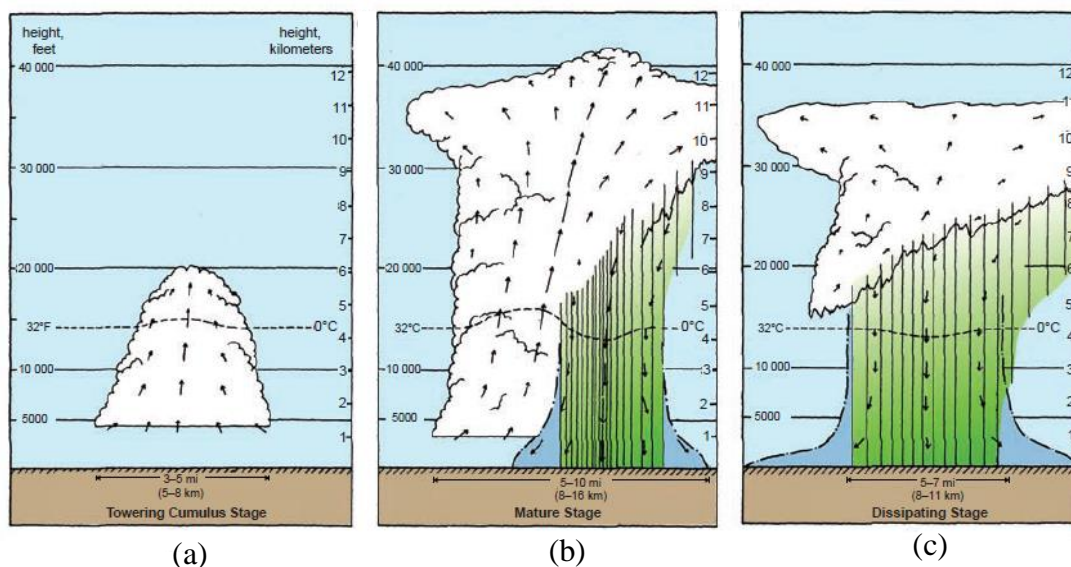
ravnotežni nivo ili nivo neutralnog uzgona (EL, engl. *Equilibrium Level*) (Groenemeijer, 2003). Opisani nastanak DMK-a ilustriran je na slici 1.2.



Slika 1.2. Ilustracija uvjetne nestabilnosti: stopa ohlađivanja  $\Gamma$  nalazi se između suhoadijabatičke stope ohlađivanja  $\Gamma_d$  i pseudoadijabatičke stope ohlađivanja  $\Gamma_s$ . Slovom A označen je LCL, slovom B LCF i slovom C EL. Izvor: Pandžić (2002).

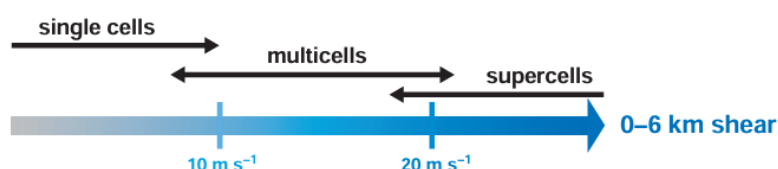
### 1.1.2. Organizirana konvekcija

Osnovna strukturna jedinica olujnog sustava jest konvektivna ćelija čiji razvoj ima tri faze: kumulusnu, zrele i disipacijsku fazu (slika 1.3) (Stull, 2015). Ćelija započinje svoj razvoj od termala, odnosno vertikalnog mlaza toplog zraka (Grisogono i sur., 2009). U prvoj, kumulusnoj fazi prevladava uzlazna struja unutar brzo rastućeg tornja kumulus kongestusa (Cu con) koja uvlači vlažan i topao zrak iz graničnog sloja pri čemu se u njemu kondenzira vodena para oslobađajući latentnu toplinu. Iz navedenog procesa, formira se olujni oblak kumulonimbus (Cb). Tokom zrele faze prisutne su uzlazne i silazne struje te nastaje obilna oborina. Pri vrhu troposfere dolazi do divergencije uzlazne struje pri čemu nastaje nakovanj Cb-a, a ponekad uzlazna struja prodire i u donju stratosferu tvoreći premašujući vrh Cb-a. Ova faza je najopasnija, jer se javljaju izražena grmljavinska aktivnost, jaki udari vjetra i turbulencija, a njezino trajanje ovisi o smicanju vjetra i drugim uvjetima u atmosferi potrebnim za konvekciju. Ukoliko je smicanje vjetra slabo i nema dovoljno toplog i vlažnog zraka, zbog slabih uzlaznih struja te silaznih struja hladnog zraka, nastupa posljednja, odnosno disipacijska faza. Tada se oluja sastoji od silaznih struja i velikog nakovanja od ledenih kristala te od oborine koja može postati slaba, stratiformna (Stull, 2015).



Slika 1.3. Tri faze razvoja konvektivne ćelije: (a) kumulusna faza, (b) zrela faza i (c) faza disipacije. Izvor: Markowski i Richardson (2010).

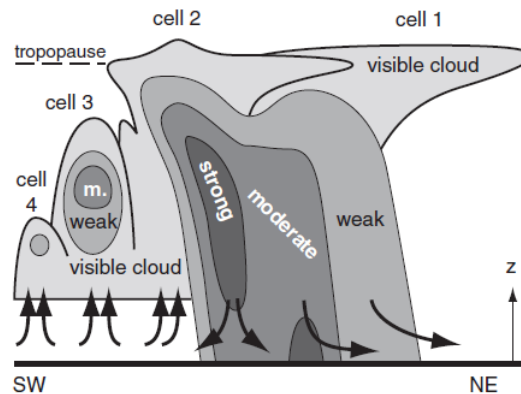
DMK ima sposobnost organizacije u određene *konvektivne sustave*, a najvažniji čimbenik koji utječe na organizaciju konvektivnih sustava je vertikalno smicanje vjetra (Groenemeijer, 2003). Konvektivne oluje mogu sadržavati različiti broj ćelija u različitim fazama razvoja (Holton, 2004). Duboki konvektivni sustavi su zapravo grmljavinske oluje koje uključuju *jednoćelijske*, *višećelijske* i *superćelijske* oluje ovisno o smicanju vjetra (slika 1.4). Ako je vertikalno smicanje vjetra u prva 4 km slabo, točnije manje od 10 m/s, nastaju jednoćelijske oluje, odnosno Cu con i manji Cb (slika 1.3). One obično traju oko 30 minuta, horizontalnih su dimenzija od 5 do 10 km, gibaju se unutar srednjeg strujanja u donjih 8 km atmosfere i uzrokuju umjereni pljusak u trajanju od 10-ak minuta (Holton, 2004; Grisogono i sur., 2009).



Slika 1.4. Raspodjela grmljavinskih oluja na jednoćelijske, višećelijske i superćelijske oluje ovisno o brzini smicanja vjetra u sloju 0-6 km iznad tla. Izvor: Markowski i Richardson (2010).

Multićelije nastaju kada je vertikalno smicanje vjetra umjeren, od 10 do 20 m/s. Sastavljene su od više pojedinačnih Cb-a kratkog trajanja dok cijeli sustav traje

nekoliko sati proizvodeći kvazi-periodične pljuskove (Holton, 2004; Grisogono i sur., 2009). Markowski i Richardson (2010) opisuju multićelijsku konvekciju kao najčešći oblik konvekcije u srednjim umjerenim širinama, pri čemu se razvijaju nove ćelije duž fronte vjetra gdje je prisilno uzdizanje dovoljno jako da podigne čest do LFC-a i tako nastaju organizirani sustavi većih skala. Shematski primjer multićelijske oluje prikazan je na slici 1.5.

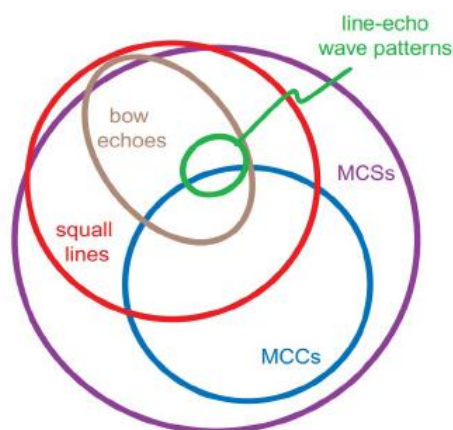


Slika 1.5. Shematski prikaz multićelijske oluje. Prva ćelija je u fazi disipacije, druga je u svojoj zreloj fazi gdje se događaju najintenzivnije vremenske pojave dok je treća u kumulusnoj fazi, a četvrta je najnovija ćelija koja tek započinje svoj razvoj. Streljice pokazuju smjer strujanja, a osjenčana područja naoblaku i intenzitet oborine. Izvor: Stull (2015).

U uvjetima vertikalnog smicanja vjetra većim od 20 m/s može doći do nagnjanja konvektivne ćelije pa njezin razvoj traje i do nekoliko sati. Prilikom razvoja, ćelija se može odvojiti na dvije oluje koje se kreću lijevo i desno od srednjeg vjetra pri čemu lijeva brzo umire, a desna polako razvija rotirajuću uzlaznu struju tzv. mezociklon i prateću silaznu struju (Holton, 2004). Nagnuta uzlazna struja koja se ne poklapa sa silaznom strujom omogućava superćeliji da traje do 4 h, a ponekad čak i do 8 h (Markowski i Richardson, 2010). Stull (2015) navodi kako su superćelije odgovorne za nastanak razornih tornada i tuče, snažnih vjetrova i intenzivnih oborina koje uzorkuju bujične poplave. S obzirom na količinu oborine, superćelije se dijele na: oluje s malom, sa srednjom (normalne superćelije) i one s velikom količinom oborine.

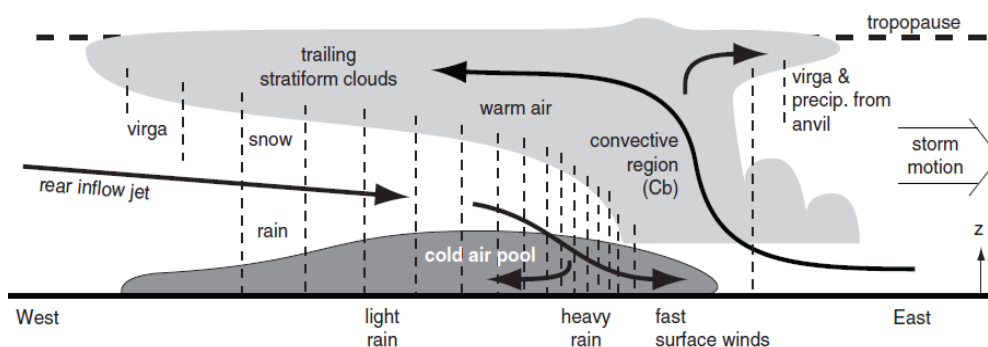
Doswell i sur. (1996) navode kako je osnovna podjela konvekcije na jednoćelijske, multićelijske i superćelijske oluje, ali se konvekcija i njezine posljedice očituju u stupnju *organizacije* pojedinog konvektivnog sustava. Glavna forma organizacije DMK-a je mezoskalni konvektivni sustav (MCS, engl. *Mesoscale Convective*

System) čija je podjela prikazana na slici 1.6. U njih se ubrajaju mezoskalni konvektivni kompleksi (MCC, engl. *Mesoscale Convective Complexes*) i olujne pruge (SL, engl. *Squall Lines*) unutar kojih razlikujemo sustave u obliku luka (engl. *bow echo*) i više takvih sustava organiziranih u liniju (engl. *line-echo wave patterns*) (Markowski i Richardson, 2010). Takvi konvektivni sustavi za posljedicu imaju jake udare vjetra, krupnu tuču, grmljavinu, tornada i intenzivne oborine koje uzrokuju bujične poplave (Markowski i Richardson, 2010; Mikuš, 2017).



Slika 1.6. Klasifikacija mezoskalnih konvektivnih sustava. Izvor: Markowski i Richardson (2010).

Shematski prikaz MCS-a nalazi se na slici 1.7. MCS je sastavljen od niza olujnih oblaka koji uglavnom tvore vodeću linijsku struktura iza koje se nakovnji svih pojedinih oblaka spajaju, tvoreći stratiformni štit. Nastanak MCS-a može biti potaknut orografijom, sinoptičkim sustavima ili udarnim frontama manjih oluja. Da bi ovakav sustav preživio, potrebna je velika konvektivna nestabilnost i veliko smicanje vjetra kroz duboki sloj atmosfere (Stull, 2015). Horizontalne dimenzije MCS-a su reda veličine



Slika 1.7. Shematski prikaz mezoskalnog konvektivnog sustava. Izvor: Stull (2015).

100 km ili više, traju 3 do 4 h, dok prateća stratiformna oborina može potrajati i nekoliko dana (Grisogono i sur., 2009). Kada je hladan stratiformni štit velikih dimenzija (promjera većeg od 350 km), a konvektivni sustav ima eliptični ili kružni oblik a trajanjem od 6 do 12 h, tada se on naziva MCC. Druga podvrsta MCS-a je SL, odnosno linija grmljavinskih oluja, duga nekoliko stotina kilometara, ali široka svega 15 do 400 km i može trajati od nekoliko sati do nekoliko dana (Stull, 2015).

## 1.2. *Poplave*

Jedan od ekstremnih hidrometeoroloških događaja čiji se broj znatno povećava zbog dugoročne varijabilnosti klime i povećane varijabilnosti uslijed klimatskih promjena su poplave (Shelton, 2009). Poplave se događaju kada drenažni bazen doživi intenzivne ili dugotrajne oborine ili topljenje snijega pri čemu se premašuje kapacitet kanala i odvodnih sustava te dolazi do izlivanja na poplavna područja ili na zemljišta koja obično nisu potopljena.

Zbog različitih vremenskih i prostornih skala koje izazivaju poplave, razlikujemo opće poplave (slika 1.8a) od bujičnih poplava (slika 1.8b). Procesi na makroskali povezani s anomalijama cirkulacije na globalnoj razini uzrokuju opće poplave pri čemu dolazi do porasta vodostaja i prelijevanja na normalno do suho tlo ili



(a)

(b)

Slika 1.8. (a) Riječna poplava u Hrvatskoj Kostajnici 18.5.2023. Višednevne oborine uzrokovale su naglo podizanje vodostaja rijeke Une i njezino izlivanje iz korita. (b) Bujična poplava u Rijeci 28.9.2022. uzrokovana izraženom i dugotrajnom konvekcijom. Rekordna količina oborine u svega tri sata uzrokovala je brzo površinsko akumuliranje i tok oborinskih voda koje gradski sustav za odvodnju nije mogao prihvatiti. Izvor: Bilteni DHMZ-a.

nagomilavanja vode na mjestu gdje je prethodno padala kiša. Bujične poplave<sup>2</sup> uzrokovane su procesima na mezoskali uslijed kojih nastaju oluje koje mogu proizvesti ekstremnu količinu oborine u svega nekoliko minuta ili sati (Shelton, 2009). Doswell i sur. (1996) opisuju razliku između općih i bujičnih poplava na temelju vremenske skale. Opće poplave povezane su s oborinama koje padaju više dana ili duže, dok su bujične poplave iznenadne, intenzivne oborine u vrlo kratkom trajanju, nerijetko kraćem od 6 sati. Često su razlike između nastanka dugotrajne i iznenadne oborine neprimjetne, stoga stvaraju teškoće u prognoziranju istih (Doswell, 1993).

### ***1.3. Bujične poplave***

Ovaj rad bavi se vrstom poplava koja se razlikuje od ostalih tipova, posebice po vremenskoj skali, a to su bujične poplave. One ovise o meteorološkim i hidrološkim čimbenicima, a ovdje će se staviti naglasak na meteorološke procese koji ih uzrokuju. Bujične poplave su rezultat DMK-a koji uzrokuje obilne i intenzivne oborine za razliku od drugih vremenskih sustava koji proizvode kišu (Doswell i sur., 1996). Takvi konvektivni sustavi razvijaju se vrlo brzo, u razdoblju od jednog sata ili manje (Doswell, 1993), zbog čega se bujične poplave nazivaju još i iznenadne poplave (Maddox i sur., 1978). Ista količina oborine nema isti učinak na svakom području zato su važna i hidrološka obilježja. Doswell (1993) navodi osnovne hidrološke čimbenike koji prostorno utječu na nastanak bujičnih poplava, a to su:

1. prethodna oborina na tom području,
2. obilježja terena,
3. karakteristike površinskog otjecanja.

Fizikalni procesi povezani s jakim konvektivnim oborinama su dobro poznati, ali uvjeti za nastanak često nisu predvidivi. Kada se prepozna opasnost, konvektivni sustav je uglavnom već u zreom stadiju, a hoće li rezultirati bujičnom poplavom ovisi o hidrološkim uvjetima. Upravo zbog kombinacije meteoroloških i hidroloških uvjeta, bujične poplave su teške za prognoziranje i kao takve su jedna od najopasnijih

---

<sup>2</sup> [https://www.weather.gov/mrx/flood\\_and\\_flash](https://www.weather.gov/mrx/flood_and_flash)



prirodnih nepogoda koje uzrokuju velike materijalne štete, ali i ljudske žrtve (Doswell, 1993).

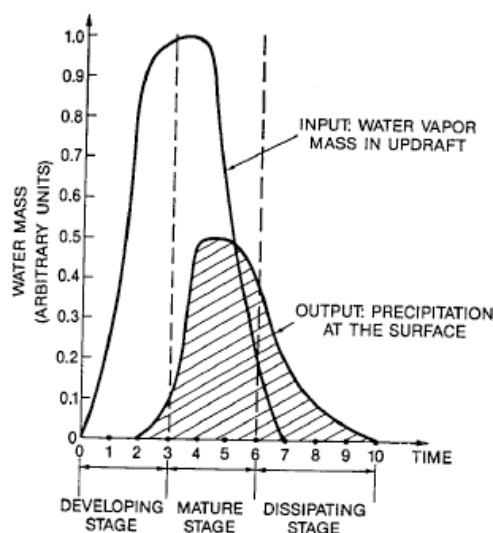
### **1.3.1. Meteorološki uvjeti za nastanak bujičnih poplava**

S obzirom da gotovo uvijek bujične poplave nastaju iz konvektivnih sustava, kada tražimo potencijal za nastanak bujične poplave, prvo tražimo potencijal za nastanak konvekcije. Meteorološki uvjeti koji su potrebni za nastanak DMK-a objašnjeni su u prvom potpoglavlju (1.1.) zajedno s cijelim procesom nastanka. Hoće li konvektivni sustav, kada se formira, prouzročiti bujičnu poplavu, ovisi o dva sastojka koje opisuju Doswell i sur. (1996):

1. obilne oborine i
2. trajanje („životni vijek“) olujnog konvektivnog sustava.

Da bi nastala obilna oborina potrebno je brzo podizanje zraka koji sadrži znatnu količinu vodene pare. Konvektivni sustavi uglavnom imaju brze uzlazne struje koje podižu vlažan zrak do nivoa kondenzacije te zbog svoje brzine mogu preraditi velike količine vodene pare (Doswell i sur., 1996). No, ne pretvara se sva vodena para u oborinu, već nam je važna i *učinkovitost oborine* ( $E$ ), koja se definira kao omjer mase vode koja je pala u obliku oborine i mase vodene pare dospjele u oblak. Učinkovitost oborine razlikuje se po fazama razvoja konvektivne ćelije što je prikazano na slici 1.9. Doswell (1993) objašnjava kako u početnoj fazi razvoja konvektivne ćelije još nema oborine, pa je  $E$  jednak 0, dok u završnoj fazi nema uzlazne struje koja dovodi vodenu paru, ali oborina može trajati, stoga je najveći  $E$  u zreloj fazi. Kako se konvektivni sustav sastoji od više ćelija u različitim fazama,  $E$  može značajno varirati, kao i brzina uzlazne struje. Zbog toga, *intenzitet oborine* ( $R$ ) u određenoj točki ovisi o usrednjenim veličinama tijekom trajanja konvektivnog sustava, a to su vertikalna brzina, omjer miješanja u zraku koji se diže te  $E$ . Obilnom oborinom se smatra  $R$  od 25 mm/h, dok su bujične poplave često oborine većeg  $R$ -a. U konačnici, ukupna *proizvedena oborina*  $P$  jednog konvektivnog sustava je umnožak prosječnog intenziteta  $\bar{R}$  i ukupnog trajanja oborine  $D$  (Doswell i sur., 1996; Markowski i Richardson, 2010):

$$P = \bar{R}D. \quad (1.1.)$$



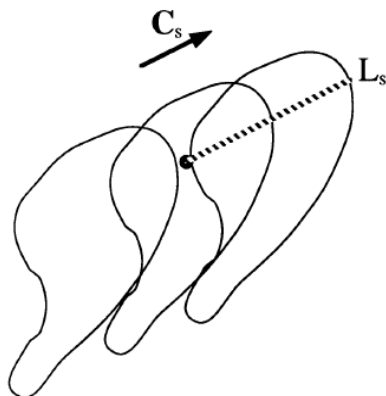
Slika 1.9. Shematski prikaz ovisnosti mase vode o trajanju konvektivnog sustava koje je podijeljeno na faze razvoja. Prva krivulja se odnosi na masu vodene pare dospjele uzlaznim strujama u oblak. Druga krivulja prikazuje masu vode koja je pala u obliku kiše. Omjer površina ispod dviju krivulja daje  $E$ . Izvor: Doswell (1993).

Osim navedenih faktora za nastanak obilnih oborina, veliku važnost u učinkovitosti oborine ima isparavanje. Ona vodena para koja ne padne u obliku oborine, ispari nošena vjetrom ili u silaznim strujama. Isparavanje mogu potaknuti složeni mikrofizički procesi, stopa uvlačenja okolnog zraka u oblak i relativna vlažnost. Ako se uvlači velika količina okolnog zraka čija je relativna vlažnost mala, isparavanje će biti značajnije i samim time će  $E$  opadati. Obilna oborina je nužan, ali ne i dovoljan uvjet za nastanak bujičnih poplava (Doswell i sur., 1996). Ovisno o trajanju olujnog sustava, umjerene količine oborina također mogu uzrokovati bujične poplave. Doswell i sur. (1996) navode da je u slučaju velike količine oborine njezino trajanje povezano s: brzinom kretanja konvektivnog sustava, veličinom konvektivnog sustava i varijacijom u intenzitetu oborine unutar konvektivnog sustava. *Trajanje oborine* ( $D$ ) definirano je kao omjer najveće horizontalne dimenzije konvektivnog sustava u smjeru njegovog kretanja ( $L_s$ ) i brzine gibanja konvektivnog sustava ( $C_s$ ) (slika 1.10):

$$D = \frac{L_s}{C_s}. \quad (1.2.)$$

Ukoliko se olujni sustav kreće dovoljno sporo, na području gdje je oborina najintenzivnija ona će biti i dugotrajnija, pa drugi čimbenici za nastanak bujičnih poplava neće biti važni. Ako je konvektivni sustav dovoljno velik i organiziran, pri čemu

proizvodi umjerenu i veliku količinu oborine, onda kretanje toga olujnog sustava neće značajno utjecati na nastanak bujičnih poplava, jer će svakako dovoljno dugo trajati nad nekim područjem zbog svoje veličine.



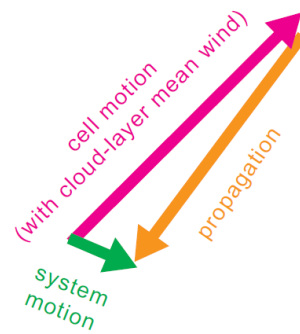
Slika 1.10. Shematski prikaz kretanja konvektivnog sustava gdje je označen vektor brzine gibanja sustava,  $\vec{C}_s$  i dimenzija sustava u smjeru gibanja,  $L_s$ . Izvor: Doswell i sur. (1996).

### **1.3.2. Obilježja oluja koje uzrokuju bujične poplave**

Osim meteoroloških uvjeta za konvekciju i za nastanak bujičnih poplava, dobro je znati koji su olujni sustavi najčešće povezani s nastankom bujičnih poplava. Neće svi konvektivni sustavi proizvesti dovoljnu količinu oborine ili neće dovoljno dugo trajati da bi uzrokovali bujične poplave. Konvektivna ćelija ima životni vijek do 30-ak minuta pri čemu će teško proizvesti obilnu oborinu dostatnu za bujičnu poplavu. Najčešće karakteristike oluja koje proizvode obilne oborine nad nekim područjem su organizirani, multićelijski sustavi poznati kao MCS-i (Maddox i sur., 1978; Maddox i sur., 1979; Doswell, 1993; Doswell i sur., 1996). Oni mogu postati kvazistacionarni, odnosno imaju sposobnost uzastopnog stvaranja novih ćelija nad gotovo istim područjem gdje one prolaze kroz sve tri faze svoga razvoja. Takav način stvaranja naziva se i "efekt vlaka", a takav olujni sustav naziva se i *kvazistacionarni kišni sustav* (QRS, engl. *Quasi-stationary Rain System*, Doswell (1993)).

Vektor brzine gibanja konvektivnog sustava  $\vec{C}_s$  jest zbroj vektora brzine gibanja konvektivne ćelije i vektora brzine propagacije konvektivnog sustava. Gibanje konvektivne ćelije je uglavnom u smjeru srednjeg vjetra, odnosno jednostavna advekcija dominira kretanjem pojedine ćelije. Ono što je teže predvidjeti jest smjer

propagacije konvektivnog sustava. Ovisno o okolnom zraku na mjestima gdje vladaju povoljni meteorološki uvjeti za DMK razvijat će se nove ćelije (Doswell i sur., 1996). Ukoliko se ćelije kontinuirano formiraju na stražnjoj strani MCS-a, tada će se vektor brzine propagacije gotovo poništavati s vektorom brzine gibanja konvektivne ćelije te će se gibanje sustava usporiti i on će postati kvazistacionaran (slika 1.11) (Markowski i Richardson, 2010).

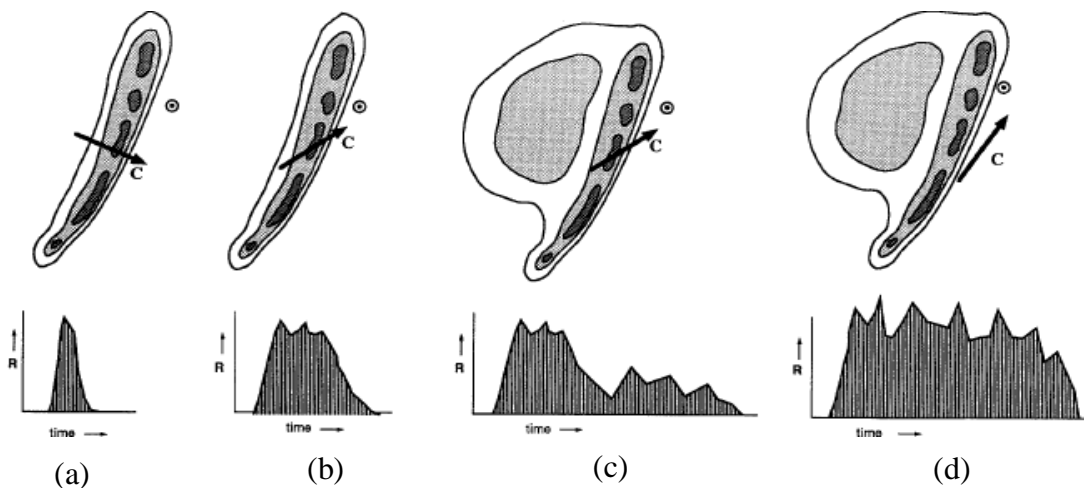


Slika 1.11. Shematski prikaz vektora brzine gibanja pojedine ćelije i srednjeg vjetra (ružičasta), vektora brzine propagacije (narančasta) te njihovog zbroja - vektora brzine gibanja konvektivnog sustava (zeleni). Izvor: Markowski i Richardson (2010).

Svi tipovi MCS-a (navedeni u potpoglavlju 1.1.) mogu uzrokovati bujične poplave, ali su posebno opasni kada postanu QRS-i. Na slici 1.12.a i 1.12b prikazan je primjer SL-a kao način na koji takav konvektivni sustav uzrokuje oborine u vremenu ovisno o njegovom smjeru gibanja. Ako sustav ima smjer gibanja okomit na vodeću konvektivnu liniju, kroz pojedino područje neće proći značajan broj konvektivnih ćelija, stoga će nastati kratkotrajna obilna oborina. Kada se sustav giba paralelno s vodećom konvektivnom linijom, tada se događa "efekt vlaka", odnosno kontinuirano se razvijaju nove ćelije nad istim područjem uzrokujući značajne količine oborine kroz duže vrijeme, a time i lako moguće bujične poplave. Kada MCS-i imaju i prateću stratiformnu oborinu, kao što je slučaj na slici 1.12c i 1.12d, tada će oborine biti još dugotrajnije, posebice kada je i smjer gibanja sustava paralelan s vodećom linijom.

Stull (2015) navodi posebnu vrstu grmljavinskih oluja, a to su orografske oluje koje za posljedicu mogu imati razorne bujične poplave. Ukoliko je smjer vjetra u nižim slojevima atmosfere okomit na smjer rasprostiranja orografskih prepreka, kao što su gorja i planine, pri čemu donosi vlažan i nestabilan zrak koji se diže zbog utjecaja orografije, razvija se DMK. Daljnje gibanje konvektivnog sustava je spriječeno zbog

visokih planinskih prepreka i vjetrova u višim slojevima atmosfere koji puše iz smjer suprotnog od vjetrova u nižim slojevima atmosfere. Tada i jednoćelijske i multićelijske oluje u podnožjima gora i planina mogu uzrokovati bujične poplave (jer oborine iz njih mogu biti dugotrajne) ukoliko se sustav stalno opskrbljuje vlažnim zrakom, kao i zbog velikog sliva vode s obronaka.



Slika 1.12. Shematski prikaz različitih sustava s pripadnim vektorom brzine gibanja i intenziteta oborine,  $R$ , u vremenu nad područjem koje je označeno točkom. Izvor: Doswell i sur. (1996).

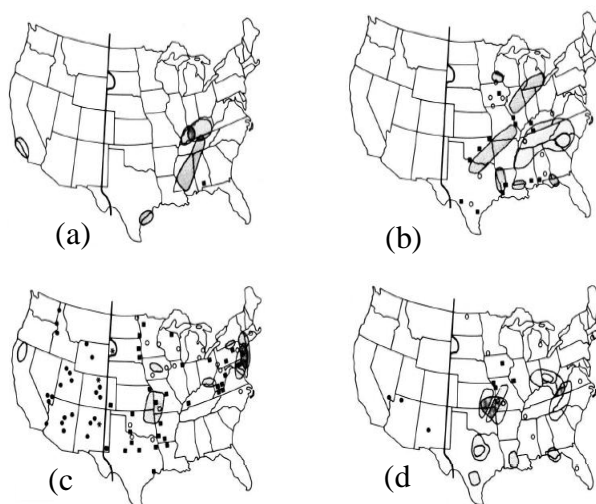
Superćelijske oluje su najviše istraživane u kontekstu tornada i tuče koju uzrokuju, bez velikog potencijala za izazivanje bujičnih poplava. No, u nekim slučajevima i pri određenim karakteristikama oluje, superćelije mogu proizvesti značajnije oborine i pritom uzrokovati bujične poplave te se one tada nazivaju superćelije s velikom količinom oborine (Doswell, 1993; Stull, 2015). Njih karakterizira izrazito jaka uzlazna struja koja može dopremiti u više slojeve atmosfere iznimno veliku količinu vodene pare, a u kasnijem razvoju postaju MCS-i (Doswell i sur., 1996).

#### **1.4. Dosadašnja istraživanja bujičnih poplava**

Od ukupnog broja svih vrsta poplava koje se godišnje dogode u svijetu, 85% njih su bujične poplave. One se smatraju jednom od najvećih prirodnih nepogoda, ali i najsmrtonosnijih, jer uzrokuju više od 5000 smrtnih slučajeva godišnje. Tijekom posljednjeg desetljeća trend šteta od poplava raste eksponencijalno kao posljedica sve

učestalijih obilnih oborina, korištenja zemljišta te rastućeg broja stanovništva i imovine u područjima sklonim poplavama. Procijenjeno je da je oko 20 milijuna ljudi na svijetu u opasnosti od poplava pri čemu se sveukupna šteta koja može nastati procjenjuje na 80 milijardi američkih dolara<sup>3</sup>.

U SAD-u, bujične poplave se pojavljuju u svakoj saveznoj državi, a godišnje odnesu više života od tornada, uragana i udara groma zajedno<sup>4</sup>. Tijekom 1970-ih, prosječan broj žrtava od bujičnih poplava je iznosio 200 što je dvostruko više nego 1960-ih i trostruko više nego 1940-ih, pri čemu su one postale jedan od najopasnijih vremenskih nepogoda u SAD-u (Cressman, 1977). Zbog toga je porasla potreba za boljom analizom i prognozom, pa su Maddox i sur. (1979) analizirali 151 događaj bujičnih poplava u razdoblju od 1973. do 1977. godine na području SAD-a i podijelili su ih na četiri tipa: sinoptičke, frontalne, mezoskalne i zapadne događaje (slika 1.13). Zajednička su obilježja većine događaja da su nastali iz konvektivnih sustava pri čemu su se ćelije kontinuirano stvarale nad istim područjem. U zraku je bila prisutna relativno velika količina vlage kroz duboki sloj troposfere; površinska temperatura rosišta je bila visoka, dok je vertikalno smicanje vjetera bilo slabo do umjereno. Najčešće su se bujične poplave događale u ljetnim mjesecima i tokom noći.

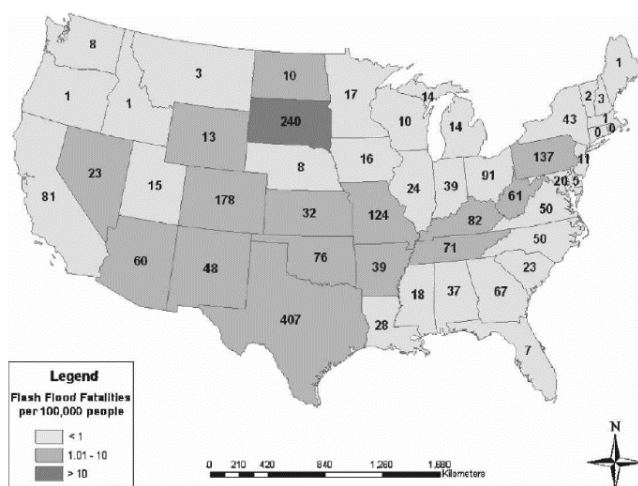


Slika 1.13. Lokacije 151 bujične poplave prikazane po sezonama: (a) zima, (b) proljeće, (c) ljeto i (d) jesen. Osjenčana područja su sinoptički događaji, kvadrati su mezoskalni događaji, bijeli krugovi su frontalni događaji, dok su zapadni događaji crni krugovi zapadnije od prikazane crte. Preuzeto i prilagođeno iz Maddox i sur. (1979).

<sup>3</sup> <https://wmo.int/about-us/world-meteorological-day/wmd-2020/floods>

<sup>4</sup> <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/floods/>

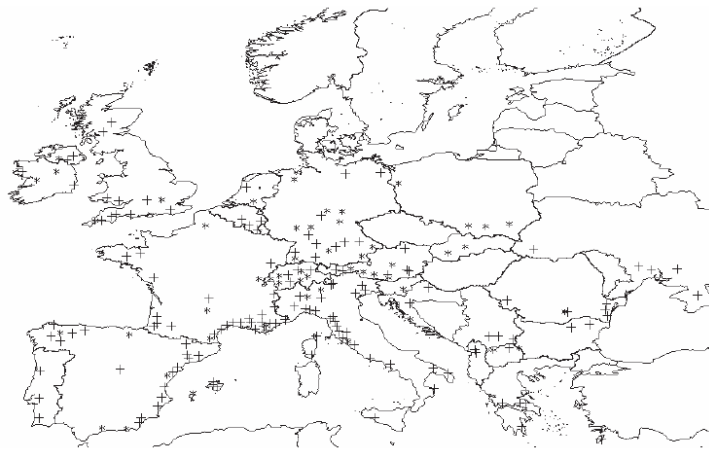
Doswell (1993) je objedinio tadašnja znanja o bujičnim poplavama za srednje geografske širine, smatrajući da do tada nisu dovoljno dobro evidentirane bujične poplave u SAD-u kao što se radilo za tornada i jake grmljavinske oluje. Tokom godina analizirala su se statistička obilježja bujičnih poplava, ali su Doswell i sur. (1996) stavili naglasak na analizu fizikalnih procesa koji objedinjuju osnovne sastojke za nastanak obilnih oborina. Potaknuli su razvoj prognoze na temelju sastojaka (engl. *ingredients based forecasting*) i prema tome se, u mnogim radovima, analize bujičnih poplava na području SAD-a temelje na zajedničkim sinoptičkim i termodinamičkim uvjetima (npr. Doswell i sur., 1996; Brong, 2005; Konarik i Kelly, 2016; Schroeder i sur., 2016). Shelton (2009) uz atmosferske uvjete, stavlja naglasak i na geomorfološka obilježja pojedinih područja u SAD-u koja pogoduju nastanku bujičnih poplava, a to je duž istočnih padina Stjenjaka, pustinja na jugozapadu i duž podnožja Apalačkog gorja. Ashley i Ashley (2008) analizirali su statistička obilježja svih poplava na području SAD-a u razdoblju od 1959. do 2005. godine te je na slici 1.14 prikazan broj žrtava bujičnih poplava u pojedinim saveznm državama. Najveći broj se pojavljuje upravo na mjestima koje je naveo Shelton (2009) te koje detaljnije opisuju Saharia i sur. (2017), jer su objedinili geomorfološke i klimatološke parametre bujičnih poplava.



Slika 1.14. Broj žrtava po saveznm državama standardiziran prema broju stanovnika u razdoblju od 1959. do 2005. godine. Izvor: Ashley i Ashley (2008).

Od sredine prošlog stoljeća, povećani broj bujičnih poplava primjećuje se i u Europi (slika 1.15). Zbog utjecaja klimatskih promjena, sve su češći intenzivniji kišni događaji (Lóczy i sur., 2012). Najveći broj bujičnih poplava u Europi zabilježen je na

području Sredozemlja zbog interakcije atmosfere i topografije, točnije visokih planinskih lanaca - Alpa, Pirineja i Središnjeg masiva u srednjoj i južnoj Francuskoj koji zaustavljaju advekciju vlažnog i nestabilnog zraka te pokreću konvekciju (Shelton, 2009). No, bujične poplave nisu ograničene samo na taj dio Europe već su zabilježene i na području Velike Britanije, Rusije i ostatku kontinentalnog dijela Europe (Shelton, 2009) te su analizirane u mnogim radovima (npr. Porcú i sur., 2003; Gaume i sur., 2009; Fragoso i sur., 2012; Lóczy i sur., 2012). Meyer i sur. (2022) bilježe povećani broj bujičnih poplava u zapadnom dijelu središnje Europe u posljednjih petnaestak godina. Analizom događaja (1981.-2020.) uočeno je da su atmosferski uvjeti koji pogoduju nastanku bujičnih poplava, točnije obilna vlaga i uvjetna nestabilnost, s godinama postali sve češći i vrijednosti sve veće, što ukazuje na mogućnost još intenzivnijih događaja.



Slika 1.15. Prostorna raspodjela bujičnih poplava u Europi u razdoblju od 1987. do 1996. godine. Plus označava događaje s materijalnom štetom i ljudskom žrtvom, a zvjezdica samo događaje s materijalnom štetom. Izvor: Porcú i sur. (2003).

Veliki dio Hrvatske također je sklon bujičnim poplavama, posebice Hrvatsko primorje. Jadransko more dio je Sredozemlja, a hrvatska obala Jadranskog mora omeđena je s Alpama na sjeveru i Dinarskim gorjem na istoku koje se proteže uzduž obale. Takva topografija stvara idealne uvjete za nastanak vremenskih uvjeta povezanih s obilnom oborinom (Ivančan-Picek i sur., 2014). I kontinentalni dio Hrvatske pogođen je obilnim oborinama nastalih konvekcijom, posebice u ljetnim i ranim jesenskim mjesecima (Zaninović i sur., 2008). Nimac i sur. (2021) u svrhu hidrometeorološke analize bujične poplave koja se dogodila 2020. godine u Zagrebu,



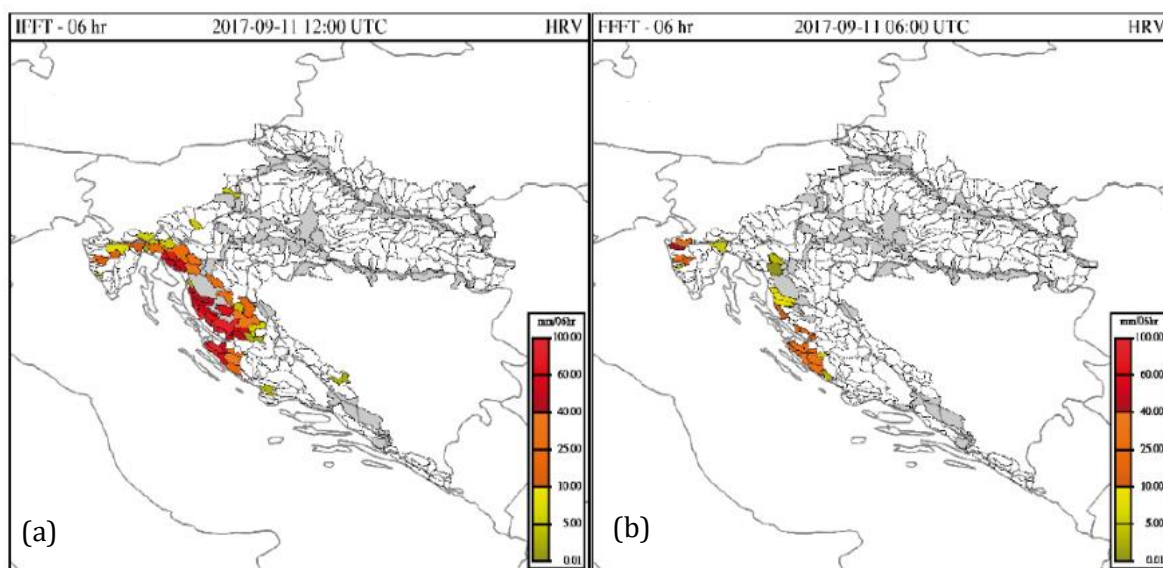
napravili su klimatologiju događaja intenzivnih oborina koristeći podatke s postaje Zagreb-Grič (1908.-2020.) te podatke s postaja Zagreb-Maksimir i Zagreb-Puntijarka (1959.-2020.). Rezultati ukazuju na povećani broj intenzivnih oborina u kratkom vremenu (30-120 min) također od 1970-ih godina. Područje grada Zagreba nalazi se između gore Medvednice i rijeke Save zbog čega je grad u opasnosti od riječnih, ali i bujičnih poplava zbog intenzifikacije konvektivnih sustava i nagiba terena. Osim same topografije, Zagreb je urbano područje koje se s godinama sve više proširuje, a infrastruktura samog središta grada je starija, manje građevinski prilagođena trenutnim zahtjevima, što rezultira manjim kapacitetom odvodnje intenzivnih oborina. I druga urbana područja zbog nepropusnosti površina, projekcije gradova i sustava odvodnje imaju povećanu opasnost od bujičnih poplava, npr. Rijeka, Zadar, Dubrovnik (Ivančan-Picek i sur., 2014; Vujnović i sur., 2018; Nimac i sur., 2021).

Kako se bujice mogu pojaviti u bilo kojem trenutku ili mjestu, važno je poboljšati mogućnost što ranijeg upozoravanja. Razvijen je prognostički sustav za prognozu bujičnih poplava (FFGS, engl. *Flash Flood Guidance System*) u San Diegu te je tijekom 2009. godine pokrenut program implementacije FFGS sustava po svijetu. U ovom trenutku sustav pokriva prostor na kojem živi oko 2 milijarde ljudi. Na području zemalja jugoistočne Europe implementiran je nastavak sustava za prognozu bujičnih poplava (SEEFFGS, engl. *SouthEast Europe Flash Flood Guidance System*) koji se operativno koristi u Hrvatskoj od 2015. godine. Operativni sustav se pokreće do 4 puta dnevno pri čemu su mu ulazni podaci s meteoroloških i hidroloških postaja u regiji te se prognozira mogućnost bujičnih poplava do 6 sati unaprijed<sup>5</sup>. Za primjer, SEEFFGS je predvidio intenzivne oborine na području Zadra 2017. godine, a produkti modela prikazani su na slici 1. 16 (Vujnović i sur., 2018). Drugi operativni sustav čiji je DHMZ partner od 2013. godine jest europski hidrološki operativni sustav (EFAS, engl. *European Flood Awareness System*). Europska komisija razvila je sustav za cijelu Europu kako bi se pravovremeno osigurale mjere za zaštitu od poplava pružajući desetodnevne prognoze riječnih i petodnevne prognoze bujičnih poplava<sup>6</sup>.

---

<sup>5</sup> [https://meteo.hr/infrastruktura.php?section=sustavi\\_upozorenja&param=seffgs](https://meteo.hr/infrastruktura.php?section=sustavi_upozorenja&param=seffgs)

<sup>6</sup> [https://meteo.hr/infrastruktura.php?section=sustavi\\_upozorenja&param=efas](https://meteo.hr/infrastruktura.php?section=sustavi_upozorenja&param=efas)



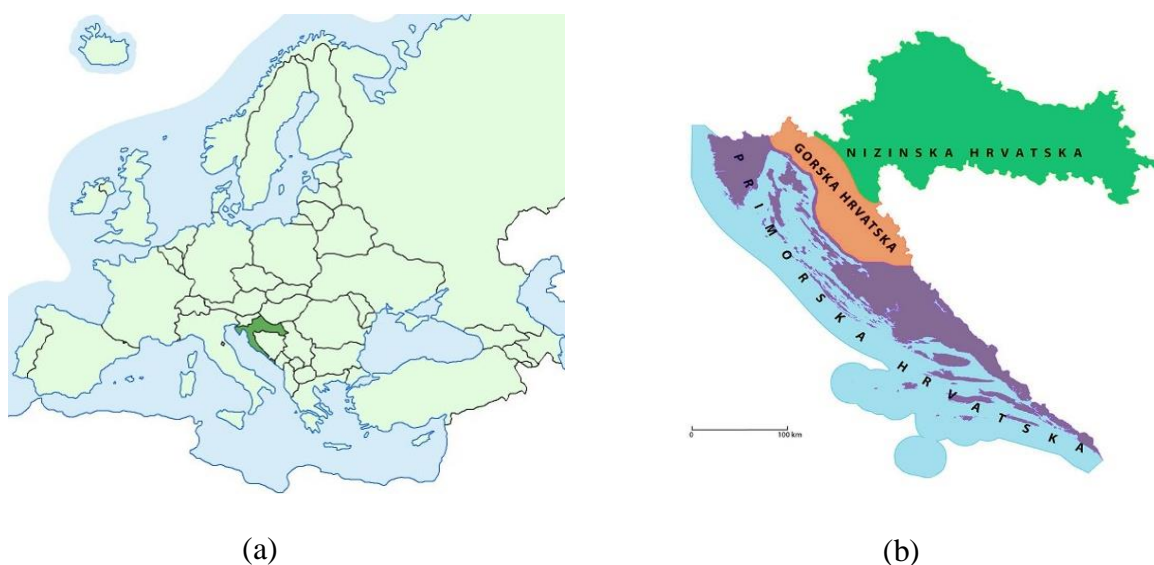
Slika 1.16. (a) Prikaz trenutačne opasnosti od poplave – bujična poplava je u tijeku ili će se dogoditi vrlo brzo. (b) Prognozirana opasnost od poplave – srednja vrijednost oborine. Izvor: Vujnović i sur. (2018).

## 2. Podaci i metode

### 2.1. Područje istraživanja

U ovom radu analizirani su događaji bujičnih poplava na teritoriju Republike Hrvatske. Hrvatska je država u jugoistočnoj Europi (slika 2.1a) koja se nalazi na dodiru triju prirodno-geografskih cjelina (slika 2.1b): Nizinska ili Panonska regija (oko 55% teritorija), Gorska ili Dinarska regija (oko 30% teritorija) te Primorska ili Sredozemna regija (oko 15% teritorija)<sup>7</sup>. Svojem položajem spada u sjeverni umjereni klimatski pojas, no zbog raznovrsnosti krajolika razlikujemo i tri glavna klimatska područja (slika 2.1b): kontinentalna, planinska i primorska Hrvatska<sup>8</sup>. Navedene raznolikosti u orografiji i klimi utječu na meteorološke parametre, posebice na temperaturu, ali i na godišnju količinu i vrstu oborina.

Prostorna raspodjela bujičnih poplava analizirana je prema podjeli Hrvatske koju koristi DHMZ za potrebe izdavanja upozorenja na opasne vremenske pojave<sup>9</sup>.



Slika 2.1. (a) Prikaz položaja Hrvatske na karti Europe<sup>7</sup>. (b) Podjela Hrvatske na prirodno-geografske regije<sup>10</sup>.

<sup>7</sup> <https://www.enciklopedija.hr/clanak/26390 #poglavlje64>

<sup>8</sup> [https://meteo.hr/klima.php?section=klima\\_hrvatska&param=k1](https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska&param=k1)

<sup>9</sup> <https://meteo.hr/naslovnica-upozorenja.php?tab=upozorenja>

<sup>10</sup> <https://edutorij-admin-api.carnet.hr/storage/extracted/0f959e7d-cd12-413c-adce-29e1ac8a4596/ravnicarski-reljef.html>

Područje Hrvatske podijeljeno je na osam regija: zagrebačka (I.), osječka (II.), karlovačka (III.), gospićka (IV.), riječka (V.), splitska (VI.), kninska (VII.) i dubrovačka (VIII.) regija koje su prikazane na slici 2.2.



Slika 2.2. Karta Hrvatske podijeljena na klimatske regije prema DHMZ-u: zagrebačka (I.), osječka (II.), karlovačka (III.), gospićka (IV.), riječka (V.), splitska (VI.), kninska (VII.) i dubrovačka (VIII.) regija. Preuzeto i prilagođeno od DHMZ-a.

## **2.2. Baza događaja**

Bujične poplave koje su se dogodile na području Hrvatske u razdoblju od 2012. do 2022. godine zabilježene su i izdvojene iz medija i iz Biltena DHMZ-a (slika 2.3) točnije iz rubrike "Izvanredni meteorološki i hidrološki događaji". Meteorološki i hidrološki bilten objedinjuje sve najbitnije informacije o vremenskim prilikama za određeni mjesec na području cijele Hrvatske, a objavljuje se od 1987. godine<sup>11</sup>. Bujične poplave okarakterizirane su kao događaji intenzivnih i često kratkotrajnih oborina s materijalnom štetom. U navedenom razdoblju, zabilježeno je 97 događaja (Dodatak A). Za svaki događaj poznat je datum i mjesto pojave bujične poplave te okvirno vrijeme, najčešće okvirno doba dana što pomaže za daljnju precizniju sinoptičku i mezoskalnu analizu pojedinog događaja. Dodatna provjera događaja napravljena je uz pomoć podataka o munjama.

<sup>11</sup>[https://meteo.hr/proizvodi.php?section=publikacije&param=publikacije\\_publicacije\\_dhmz&el=bilteni](https://meteo.hr/proizvodi.php?section=publikacije&param=publikacije_publicacije_dhmz&el=bilteni)

<sup>12</sup><https://www.nowcast.de/en/company/how-linet-works/>



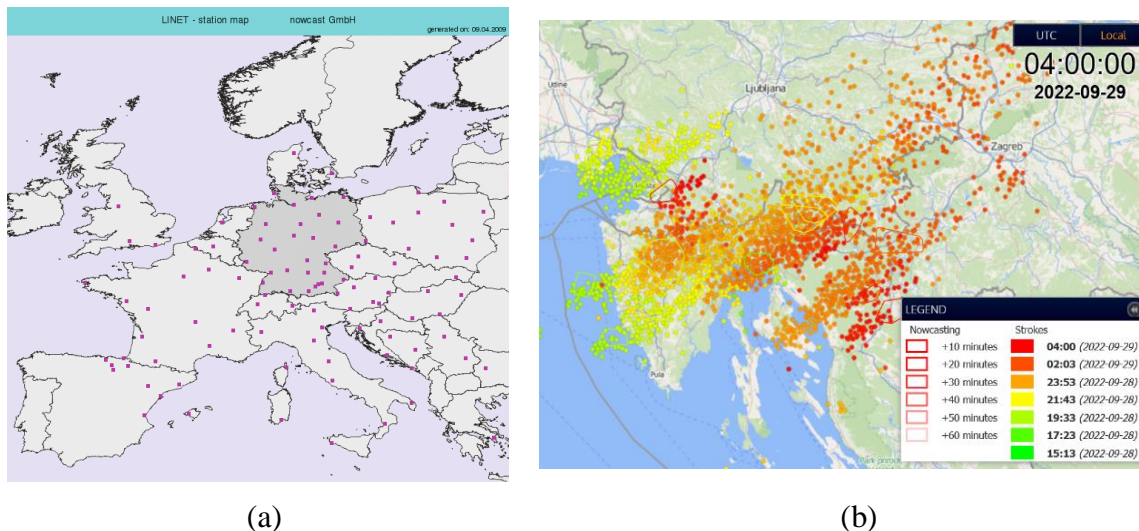
Slika 2.3. Naslovnica meteorološkog i hidrološkog Biltena DDMZ-a za mjesec rujan, 2022. i stranica iz rubrike "Izvanredni meteorološki i hidrološki događaji" koja opisuje bujičnu poplavu 28. 9. 2022. u Rijeci. Izvor: DDMZ.

### 2.3. Podaci o munjama – LINET

Međunarodna mreža za detekciju munja u Europi – LINET (engl. *Lightning detection NETwork*) obuhvaća 90 senzora u 17 država te je njihova raspodjela prikazana na slici 2.4a. Senzori s GPS prijammikom postavljeni su na međusobnim udaljenostima od 150 do 250 km te mjere elektromagnetsko zračenje koje emitira izbijanje munja koristeći radiovalove vrlo niskih/niskih frekvencija. Podaci sa senzora se šalju na središnji poslužitelj gdje se dalje obrađuje točno vrijeme i položaj nastanka munje metodom vremena dolaska te snaga i polaritet munja<sup>12</sup>. LINET detektira dvije vrste munja: munje unutar oblaka (IC, engl. *Intra Cloud*) i munje oblak-zemlja (CG, engl. *Cloud to Ground*). Senzori su vrlo osjetljivi, pa mogu detektirati munje amplituda manjih od 5 kA, dok prostorna rezolucija iznosi oko 150 m (Betz i sur., 2009).

Svi podaci spremaju se u bazu tako da je osim prikaza munja u stvarnom vremenu dostupan i prikaz u prošlosti. Time LINET omogućuje prostorno i vremensko

praćenje kretanja i razvoja grmljavinskih oluja (slika 2.4b). Takav sustav koristan je i za znanstvene, ali i u operativne svrhe posebice u kombinaciji s drugim meteorološkim izvorima kao što su meteorološki radari i sateliti (Betz i sur., 2009).



Slika 2.4. (a) Karta Europe s označenom lokacijom 90 senzora LINET mreže. Izvor: Betz i sur. (2009). (b) Grafičko sučelje LINET sustava s prostornim i vremenskim prikazom detektiranih munja od 15:13 UTC 28. 9. 2022. do 04:00 UTC 29. 9. 2022. U tom vremenu zabilježena je bujična poplava u Rijeci. Izvor: DHMZ.

Za svaki izdvojeni događaj bujične poplave napravljena je provjera je li na tom mjestu u okvirnom vremenu bilo grmljavinske aktivnosti. Raspolagalo se je sa 112 događaja bujičnih poplava pri čemu je ovom provjerom izuzeto njih 15, jer se smatra da nisu nastali iz konvektivnih sustava.

## 2.4. Tipovi vremena

Za opis sinoptičke situacije odnosno tipova vremena koji su prisutni u vremenu nastanka bujičnih poplava analizirane su sinoptičke karte Njemačke meteorološke službe – DWD (njem. *Deutscher Wetterdienstes*; <https://www.wetter3.de/>). Procjena strujanja zraka na velikoj skali obavljena je analizom visinskih karti na 500 hPa plohi koje su dostupne u terminima 00, 06, 12 i 18 UTC. Za odabrani dan i vrijeme nastanka bujične poplave promatrani su položaji dolina i grebena u polju tlaka zraka, visinske ciklone i bezgradijentno polje. Režimi koji su uočeni su sljedeći: prednja strana doline (SWS), južno strujanje (SS), jugoistočno strujanje (SES), bezgradijentno polje (BG),

dolina (DOL), visinska ciklona (VISC), stražnja strana grebena (GSW), stražnja strana doline (NWS) i greben (G). Primjeri navedenih visinskih sinoptičkih situacija nalaze se u Dodatku B.

## **2.5. Radiosondažni podaci**

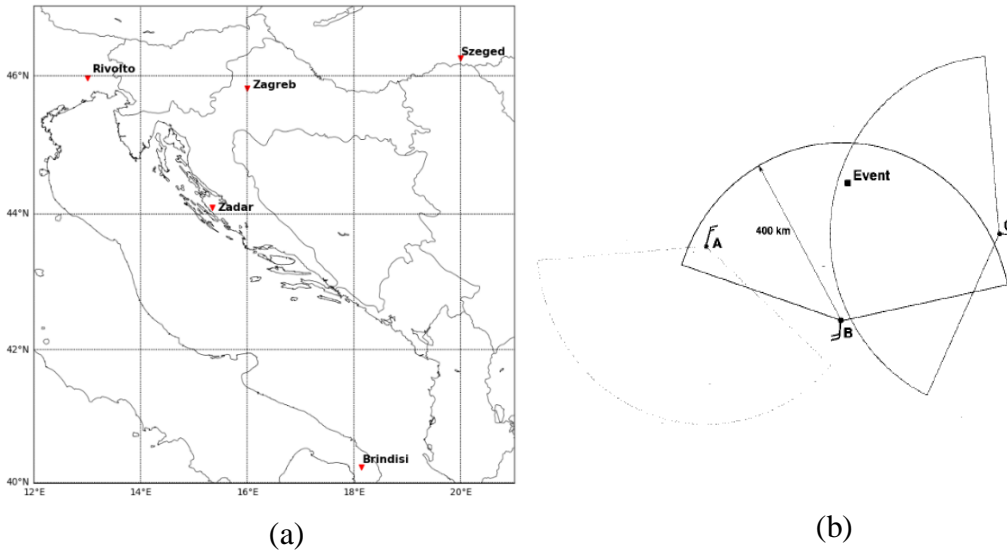
Indeksi stabilnosti daju nam uvid u termodinamičko stanje atmosfere, a računaju se iz radiosondažnih mjerenja. Radiosondažni podaci su preuzeti s internetske stranice Sveučilišta u Wyomingu (<https://weather.uwyo.edu/>). Dostupni su u terminima 00 i 12 UTC, a radiosondažne postaje korištene u ovom radu su: Zagreb, Zadar, Rivolto, Brindisi i Szeged čije su lokacije prikazane na slici 2.5a. Za svaki događaj je potrebno odabrati reprezentativnu sondažu, odnosno onu koja najbolje opisuje svojstva atmosfere i daje termodinamički profil koji odgovara trenutku nastanka bujičnih poplava. Rasmussen i Blanchard (1998) predložili su objektivnu metodu za povezivanje svakog meteorološkog događaja s pripadnom sondažom, točnije sondaža je reprezentativna ako je odgovarala uvjetima nadolazeće struje zraka. Vremenski kriterij je da su radiosondažna mjerenja obavljena 3 h prije ili 6 h poslije nastanka događaja. Točnije, ako je događaj zabilježen između 21 i 06 UTC odabire se sondaža puštena u 00 UTC, a ukoliko je događaj bio između 09 i 18 UTC odabire se ona u 12 UTC. Prostorni kriterij je da mjerna postaja mora biti u sektoru dotoka zraka od mjesta događaja, odnosno unutar  $\pm 75^\circ$  srednjeg vektora vjetra u graničnom sloju te u krugu radijusa manjeg od 400 km (slika 2.5b).

Taszarek i sur. (2017) navode kako su za prognozu DMK-a i vremenskih nepogoda koje ona uzrokuje, među kojima su i bujične poplave, izrazito korisni termodinamički i kinematički parametri i indeksi dobiveni iz numeričkih prognostičkih modela, jer daju uvid u prevladavajuća svojstva atmosfere. Odnosno, oni nam prognoziraju prisutnost "sastojaka" za nastanak DMK-a i obilnih oborina koji su navedeni u poglavlju 1.1.1. Iz odabranih radiosondažnih mjerenja izračunati su indeksi stabilnosti pomoću besplatnog programa *thundeR* za analizu sondaža i brzi izračun konvektivnih parametara<sup>13</sup>. Program nudi prikaz hodografa i termodinamičkih dijagrama ("Skew-T log-P") te povijesnih atmosferskih profila iz ERA5 reanalize od

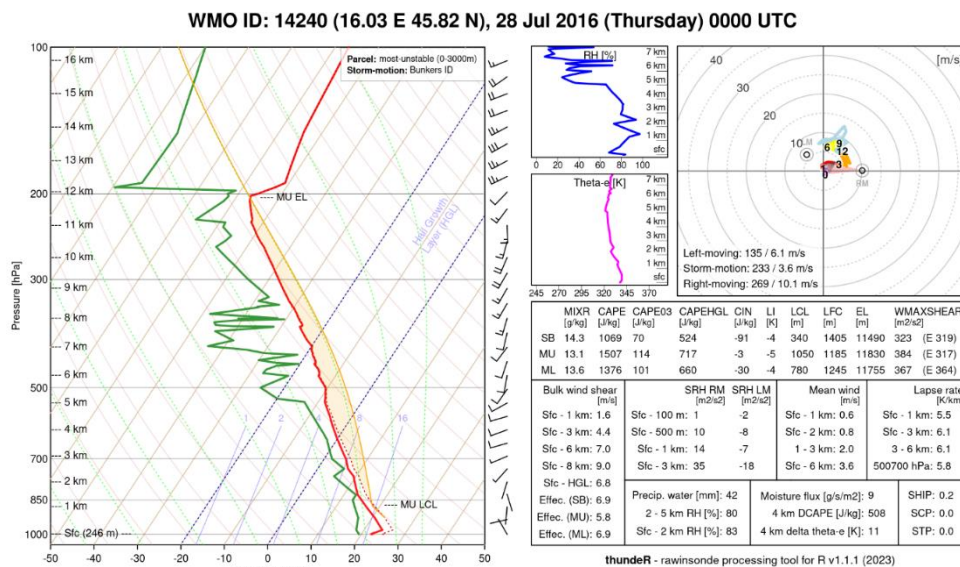
---

<sup>13</sup> thundeR. <http://rawinsonde.com/>

1950. godine naovamo. Osnovni algoritam pisan je u C++ kodu te je implementiran u R programski jezik, ali je moguće preuzeti podatke u .csv datoteci i samostalno ih obrađivati u željenom programu (Taszarek i sur., 2023). Na slici 2.6. prikazano je grafičko sučelje programa *thunder*.



Slika 2.5. (a) Lokacije radiosondažnih postaja koje su korištene u ovom radu. (b) Shematski prikaz kriterija za određivanja reprezentativnih radiosondažnih postaja. Izvor: Rasmussen i Blanchard (1998).



Slika 2.6. Grafičko sučelje programa *thunder* koje prikazuje: "SkewT log-p" dijagram, hodograf, termodinamičke i kinematičke parametre za postaju Zagreb 28. 7. 2016. u 00 UTC. Izvor: *thunder*<sup>12</sup>.



Stull (2015) je podijelio parametre u tri skupine: *parametri česti*, *parametri temperature i vlage* te *kinematički parametri*. Za mezoskalnu analizu bujičnih poplava u ovom radu, izračunati su parametri česti: CAPE, CIN i visine LCL-a, LFC-a i EL-a, zatim parametri temperature i vlage: TPW, RH i visina izoterme 0°C te kinematički parametri: BS u slojevima 0-1 km (BS01), 0-3 km (BS03) i 0-6 km (BS06) iznad tla. U poglavlju 1.1.1. objašnjene su visine LCL-a, LFC-a i EL-a, dok nam ovdje preostaje definirati ostale navedene indekse stabilnosti.

CAPE (engl. *Convective Available Potential Energy*) je raspoloživa konvektivna potencijalna energija za konvekciju, odnosno mjera maksimalne moguće kinetičke energije koju može imati nestabilna čest zbog uzgona. Mjerna jedinica je J/kg, a dana je relacijom:

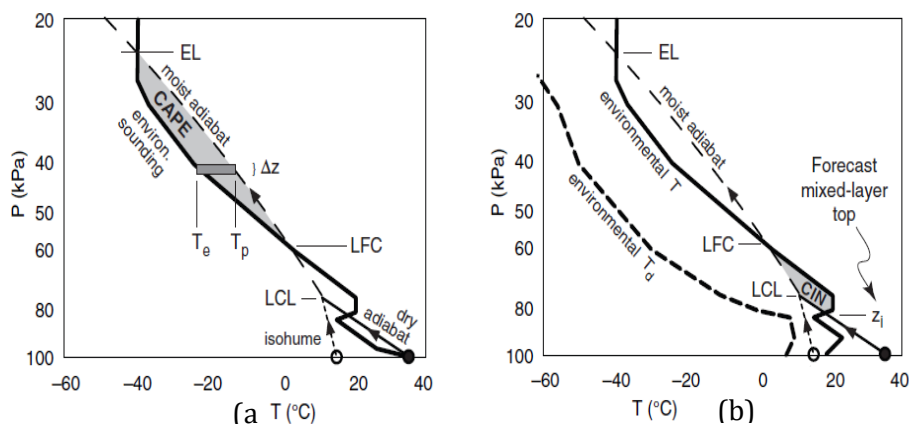
$$CAPE = g \int_{z_{LFC}}^{z_{EL}} \frac{(T_p - T_e)}{T_e} dz, \quad (2.1.)$$

gdje je  $g$  akceleracija sile teže,  $T_p$  je temperatura česti,  $T_e$  je temperatura okoline i  $z$  je visina. Na termodinamičkom dijagramu prikazanom na slici 2.7a iznos CAPE-a predstavlja osjenčana površina između visina LFC-a i EL-a, omeđena izotermom  $T_e$  i mokrom adijabatom po kojoj se čest diže. CAPE je vrlo korisna mjera nestabilnosti atmosfere u izvantropskim širinama, a iznosi veći od 1000 J/kg smatraju se značajnim (Grisogono i sur., 2009). Oblik CAPE-a na termodijagramu može biti drugačiji i tako nam ukazivati na karakteristiku oluje. U slučaju uskog i visokog CAPE-a, tzv. "*skinny CAPE*", oluja potencijalno donosi obilne oborine (Stull, 2015).

CIN (engl. *Convective INhibition*, konvektivna inhibicija) je energija potrebna česti da se s visine  $z_i$ , koja označava vrh sloja miješanja, podigne do visine LFC-a gdje je ona hladnija od okolnog zraka te na nju djeluje negativan uzgon kojeg mora nadvladati. Označen je osjenčanom površinom na slici 2.7b. Mjerna jedinica i relacija su jednake onoj za CAPE, osim granica integracije i negativnog predznaka:

$$CIN = -g \int_{z_i}^{z_{LFC}} \frac{(T_p - T_e)}{T_e} dz. \quad (2.2.)$$

Da bi se razvila DMK, vrijednosti CIN-a moraju biti manje od otprilike 60 J/kg, jer, ukoliko je veći, ima tendenciju spriječiti formiranje oluja (Stull, 2015).



Slika 2.7. Shematski prikazi (a) CAPE-a i (b) CIN-a na termodijagramu. Preuzeto i prilagođeno iz Stull (2015).

Parametri česti imaju i dodatnu podjelu ovisno o karakteristikama česti: SB (engl. *Surface Based*) – čest se počela dizati s površine i njezino stanje se temelji na vrijednostima zraka na 2 m visine; MU (engl. *Most Unstable*) – čest čije se stanje temelji na vrijednostima najnestabilnijeg sloja zraka u najnižih 300 hPa; ML (engl. *Mixed Layer*) – čest se počela dizati s površine, ali se njezino stanje temelji na usrednjenim vrijednostima u najnižih 100 hPa (Stull, 2015).

TPW (engl. *Total Precipitable Water*, ukupna oboriva voda) je količina vodene pare koja je sadržana u stupcu zraka od tla do vrha atmosfere. Izražena je kao debljina sloja vode u mm koju bi ta vodena para dala da se u potpunosti kondenzira, ali ne uzima u obzir dodatan vlažan zrak nošen vjetrom u oluju (Gelo i sur., 2005). Vrijednosti TPW indeksa u izvantropskim širinama kreću se od 0 mm do 45 mm, dok se otprilike za iznose manje od 10 mm smatra da je atmosfera suha (Ćurić i Stilinović, 2014).

Relativna vlažnost zraka (RH, engl. *Relative Humidity*) je bezdimenzionalna mjera vodene pare dana kao količnik omjera miješanja vodene pare i zasićenog omjera miješanja te se iskazuje u postocima (Markowski i Richardson, 2010). Što je veći RH to je zrak više zasićen vodenom parom. U *thundeR*-u je izračunat RH zraka u sloju 0-2 km (RH02) i 2-5 km (RH25) iznad tla.

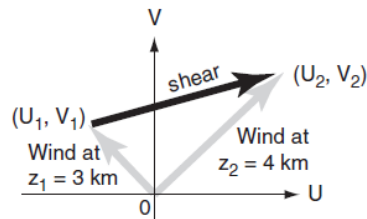
Vertikalno smicanje vjetra (BS, engl. *Bulk Shear*) je promjena horizontalne brzine ili smjera vjetra s visinom dana kao vektorska razlika između vjetra na vrhu i na dnu promatranog sloja što je shematski prikazano na slici 2.8. BS ima glavnu ulogu u

organizaciji konvektivnih sustava. Mjerna jedinica je m/s, iznos se određuje prema formuli:

$$BS = \sqrt{\Delta U^2 + \Delta V^2}, \quad (2.3.)$$

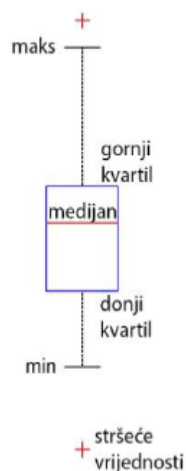
a smjer prema sljedećoj relaciji:

$$\alpha = 90^\circ - \arctan\left(\frac{\Delta V}{\Delta U}\right) + \alpha_0. \quad (2.4.)$$



Slika 2.8. Shematski prikaz vektora vertikalnog smicanja vjetra (podebljana strelica) danog kao razlika vektora vjetra na 3 km visine i vektora vjetra na 4 km visine. Izvor: Stull (2015).

Ukoliko je više sondaža zadovoljavalo vremenski i prostorni kriterij koji su objašnjeni na početku poglavlja, u obzir se uzima ona sondaža za koju je iznos CAPE-a veći, jer nam on ukazuje na veću nestabilnost atmosfere, odnosno više je dostupne energije za konvekciju (Rasmussen i Blanchard, 1998; Grisogono i sur., 2009). Za deset događaja, CAPE je iznosio gotovo 0 stoga se takva radiosondaža smatra nereprezentativnom i termodinamička analiza je provedena za preostalih 87 događaja bujičnih poplava. Podaci su prikazani u obliku pravokutnih dijagrama (engl. *boxplot*) (slika 2.9) koji su obrađeni u programskom jeziku Python.



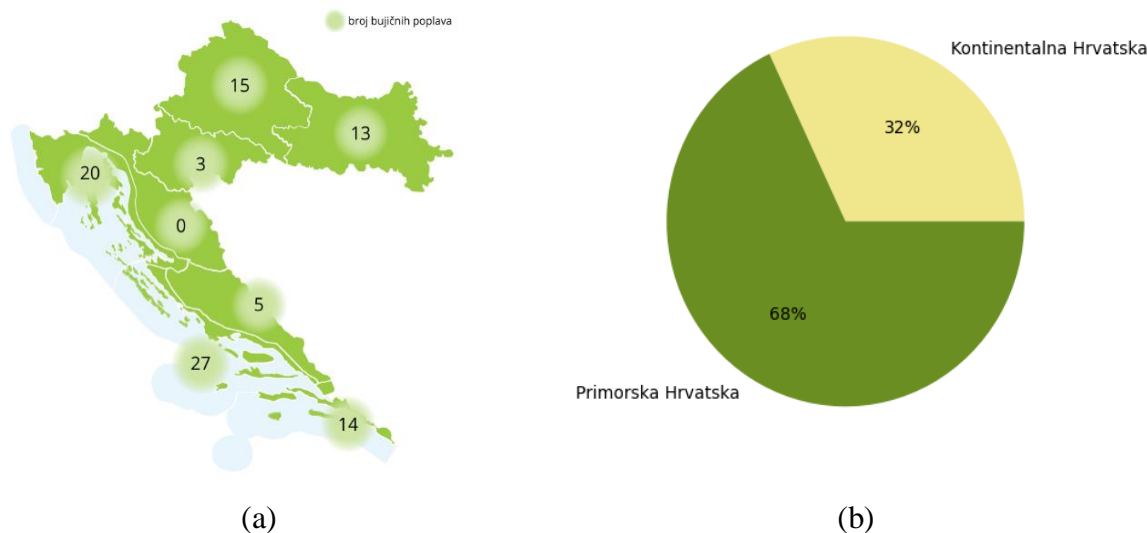
Slika 2.9. Prikaz pravokutnog dijagrama s objašnjenjem. Izvor: Renko (2018).

### **3. Rezultati i diskusija**

Za analizu bujičnih poplava na području Republike Hrvatske izdvojeno je 97 događaja u razdoblju od 2012. do 2022. godine. Zajednička karakteristika odabranih događaja je veliki intenzitet oborine nad promatranim područjem koja je nastala iz konvektivnog sustava te je predstavljala opasnost za nastanak materijalne štete i ljudske žrtve. Podaci su analizirani prostorno i vremenski te su opisani sinoptički uvjeti koji su pogodovali nastanku bujičnih poplava. Za opis mezoskalnih uvjeta provedena je statistička analiza termodinamičkih parametara dobivenih iz 87 radiosondažnih mjerenja, odnosno za onoliko događaja za koje su bile dostupne reprezentativne sondaže.

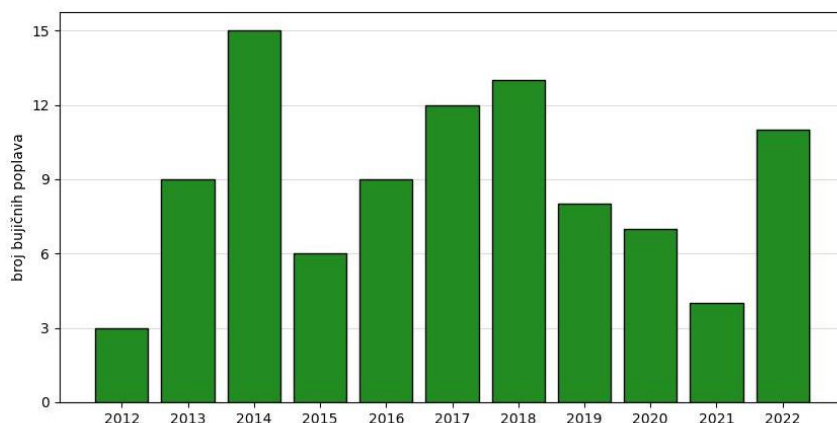
#### ***3.1. Prostorna i vremenska razdioba bujičnih poplava na području Hrvatske***

Prostorna raspodjela bujičnih poplava prema klimatskim regijama DHMZ-a, nastalih u razdoblju od 2012. do 2022. godine, dana je na slici 3.1a. Najviše bujičnih poplava zabilježeno je na području splitske regije točnije njih 27, a nešto manje odnosno 20 događaja zabilježeno je na riječkom području. Sličan broj događaja (a manjeg iznosa) dijele zagrebačka, dubrovačka i osječka regija redom s 15, 14 i 13 događaja. Na kninskom području je zabilježeno 5 događaja, na karlovačkom svega 3 dok gospićka regija ne broji niti jedan slučaj. Promatramo li to prema prirodno-geografskoj podjeli Hrvatske, veći broj slučajeva, njih ukupno 66, pripada primorskom djelu Hrvatske što je 68 % od ukupnih događaja. Kontinentalna Hrvatska broji 31 slučaj odnosno 32 % od ukupnih događaja, a gorska Hrvatska nema niti jedan zabilježeni slučaj bujične poplave (slika 3.1b). Razlog ovakve prostorne raspodjele zasigurno jest orografija kao još jedan od ključnih faktora za nastanak bujičnih poplava. Na Sredozemlju se najčešće događaju bujične poplave uzrokovane interakcijom orografskih i atmosferskih čimbenika gdje topao i vlažan zrak s mora dolazi do visokih planinskih lanaca te se stvaraju idealni uvjeti za konvekciju (Shelton, 2009). Na mjesto nastanka bujičnih poplava utječu i hidrološki čimbenici kao što su prethodna oborina, teren i površinsko otjecanje (Doswell i sur., 1996).

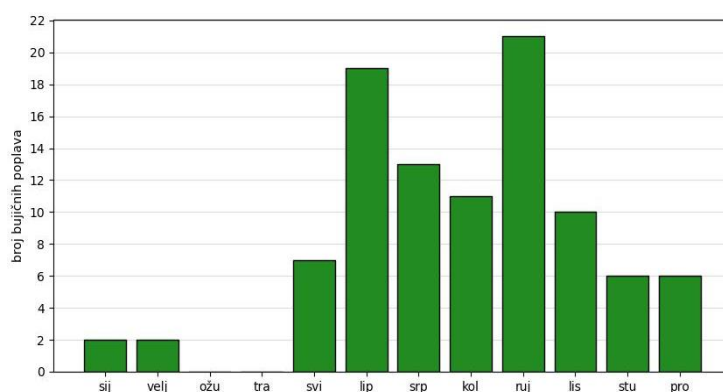


Slika 3.1. (a) Broj bujičnih poplava po geografskim regijama DHMZ-a. (b) Postotak slučajeva bujičnih poplava po prirodno-geografskim cjelinama Hrvatske

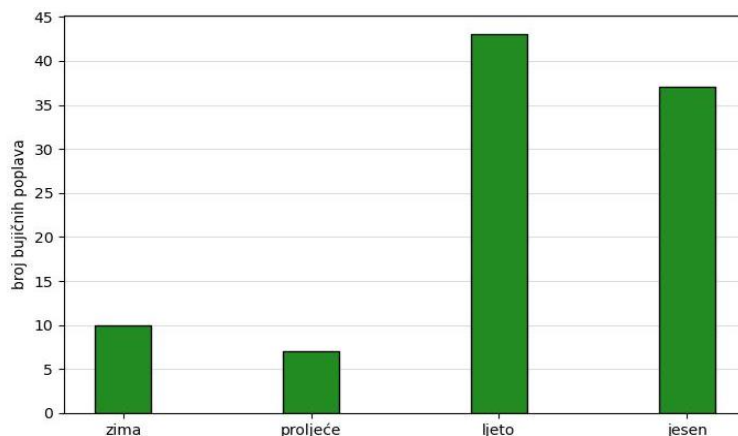
Varijacije u broju bujičnih poplava kroz godine nisu tako velike što se može vidjeti na slici 3.2. Najviše slučajeva, točnije njih 15, zabilježeno je 2014. godine dok je 13, 12 i 11 slučajeva zabilježeno redom 2018., 2017. i 2022. godine. Najmanji broj slučajeva, svega njih 3, dogodilo se je 2012. te 4 slučaja 2021. godine. Promatramo li događaje po mjesecima dobivamo zanimljiviju raspodjelu (slika 3.3a). Najveći broj događaja zabilježeno je u rujnu te nešto manje u lipnju. Ožujak i travanj nemaju zabilježen niti jedan slučaj bujične poplave u promatranom razdoblju od 11 godina. Na slici 3.3b prikazan je broj slučajeva po sezonama. Ljeto i jesen uveliko prednjače po broju bujičnih poplava. Čak 44,33% bujičnih poplava događa se ljeti, dok je 38,14% slučajeva zabilježeno u jesen. Kako su bujične poplave nastale iz konvektivnih sustava u tome leži razlog ovakve raspodjele po sezonama. Kopno se počinje jače zagrijavati i kao posljedica dnevnog sunčevog zagrijavanja površine dolazi do razvoja konvekcije (Mikuš, 2017). U proljetnim mjesecima temperaturne razlike između površine kopna i površine mora nisu tako velike, stoga ni atmosferski procesi nisu toliko intenzivni kao što je to slučaj ljeti te posebice u jesen kada topao i vlažan zrak s mora dolazi nad hladno kopno (Penzar i Penzar, 1987).



Slika 3.2. Broj bujičnih poplava po godinama u razdoblju od 2012. do 2022. godine u Hrvatskoj.



(a)

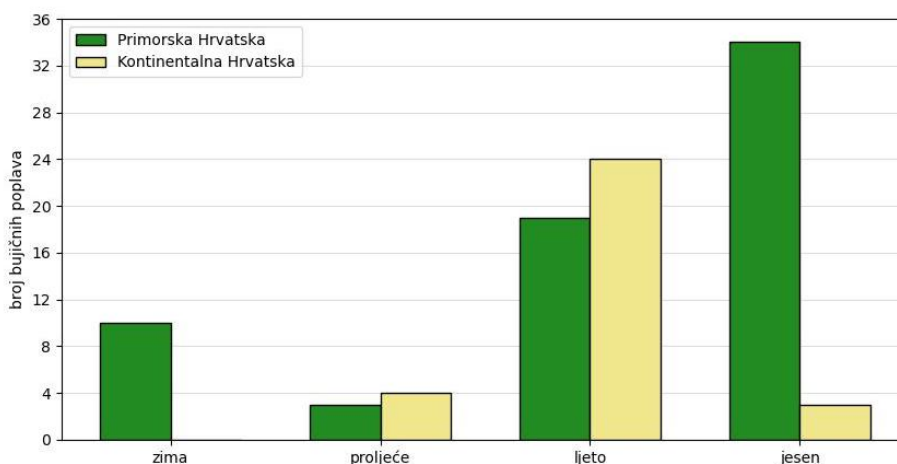


(b)

Slika 3.3. Broj bujičnih poplava po (a) mjesecima i (b) sezonama u Hrvatskoj.

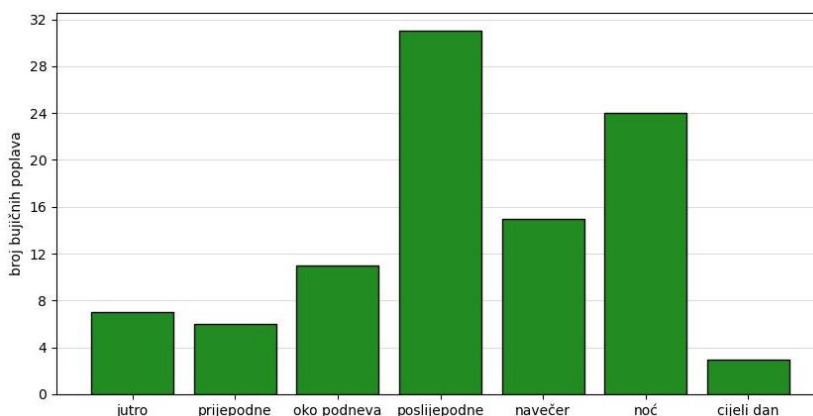
Konvektivna aktivnost u hladnom dijelu godine najvećim je dijelom zastupljena nad morem i uz obalu kao posljedica temperaturne razlike između toplog mora i hladnog kontinentalnog zraka ili u sklopu frontalnih poremećaja vezanih uz ciklone nastale nad Sredozemljem (Mikuš, 2017). Iz tog razloga, najviše bujičnih poplava na

području primorske Hrvatske je zabilježeno u jesen kada je more još dosta toplo, a zrak se počinje hladiti te su svi zimski događaji isključivo vezani za to područje. Nad kontinentom, bujične poplave su vezane za kasno proljeće, ljeto i ranu jesen kada je najizraženija konvektivna aktivnost (slika 3.4).



Slika 3.4. Broj bujičnih poplava po sezonama i prirodno-geografskim cjelinama Hrvatske.

Točno vrijeme nastanka bujičnih poplava nije zabilježeno, ali je poznato okvirno doba dana kada je došlo do bujične poplave. Na slici 3.5 prikazan je broj bujičnih poplava u istraživanom razdoblju u određeno doba dana. Većina bujičnih poplava događa se u drugoj polovici dana, odnosno gotovo trećina događaja zabilježena je u poslijepodnevnom satima kao posljedica Sunčevog zagrijavanja koje doprinosi razvoju konvektivnih sustava. Često se konvekcija razvija i noću, posebice nad obalnim područjem (Mikuš i sur., 2012). Za detaljniji opis dnevne raspodjele potrebni su precizniji podaci o vremenu nastanka događaja.



Slika 3.5. Dnevna raspodjela bujičnih poplava u Hrvatskoj.

### 3.2. Visinska sinoptička analiza

Za analizu i razvoj prognoze opasnih vremenskih pojava ključni su tipovi vremena (navedeni u poglavlju 2.4) koji su bili prisutni u vremenu nastanka određene pojave (Renko, 2018). Sinoptički tipovi koji su pogodovali nastanku bujičnih poplava, određeni su na temelju strujanja na 500 hPa plohi. Prepoznato je 9 različitih tipova vremena u promatranom razdoblju za odabrane događaje, a u tablici 3.1 je prikazan broj bujičnih poplava u ovisnosti o sinoptičkim tipovima.

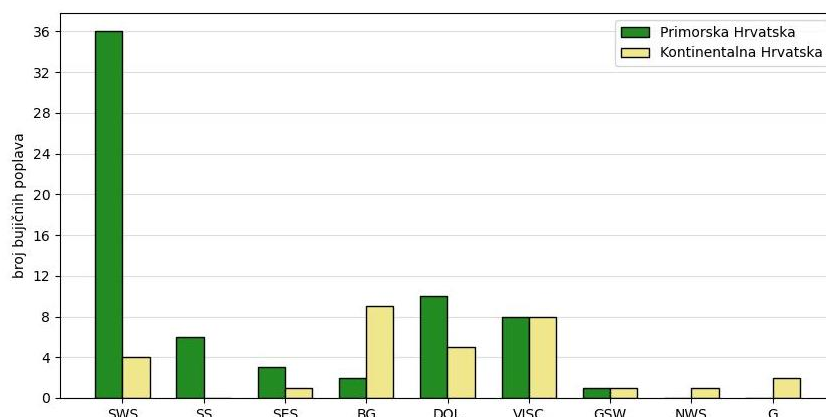
Tablica 3.1. Broj bujičnih poplava povezan s pripadnim sinoptičkim tipovima.

Tip vremena	SWS	SS	SES	BG	DOL	VISC	GSW	NWS	G
Broj događaja	40	6	4	11	15	16	2	1	2

Najveći broj bujičnih poplava, odnosno 41,2% od ukupnih događaja, nastaje u prisutnosti prednje strane doline (SWS), a podjednaki broj događaja je povezan s visinskom ciklonom (VISC), točnije 16,5%, zatim 15,5% događaja s dolinom (DOL) te 11,3 % događaja kada prevladava bezgradijentno polje tlaka zraka (BG). Ostali tipovi vremena imaju zastupljenost manju od 10%, pri čemu je stražnja strana doline (NWS) zabilježena svega za jedan slučaj, a po dva slučaja vezani su za greben (G) i prednju stranu grebena (GNW). Zastupljenost četiri najčešća tipa vremena prikazana je na slici 3.6. U radu Lončar i Bajić (1994) tipovi vremena su povezani s dominantnim čimbenikom koji utječe na vrijeme. Oborinski režim, kojeg karakterizira advekcija toplog i vlažnog zraka uz proces dizanja zraka i stvaranja oblaka i oborine, povezan je s tipovima vremena među kojima su i najzastupljeniji tipovi iz ovog rada, a to su SWS, DOL te prednja i donja strana ciklone.

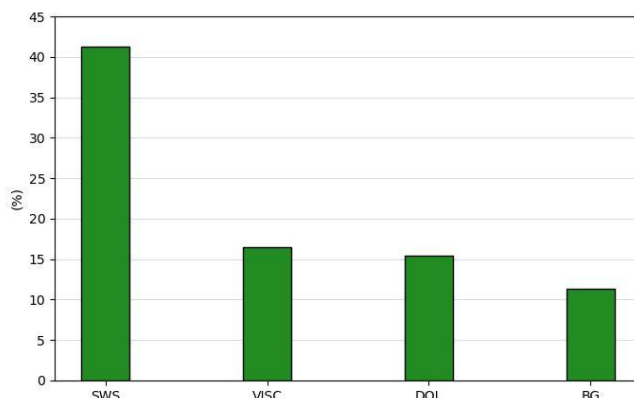
Tipovi vremena podijeljeni su i po prirodno-geografskim cjelinama Hrvatske što je prikazano na slici 3.7. Dominantan tip vremena u primorskoj Hrvatskoj je tip SWS, jer je povezan s čak više od 50% bujičnih poplava. Podjednaki broj događaja vezan je za tipove DOL i VISC, a ističe se i južno strujanje (SS) koje nad kontinentom nije bilo



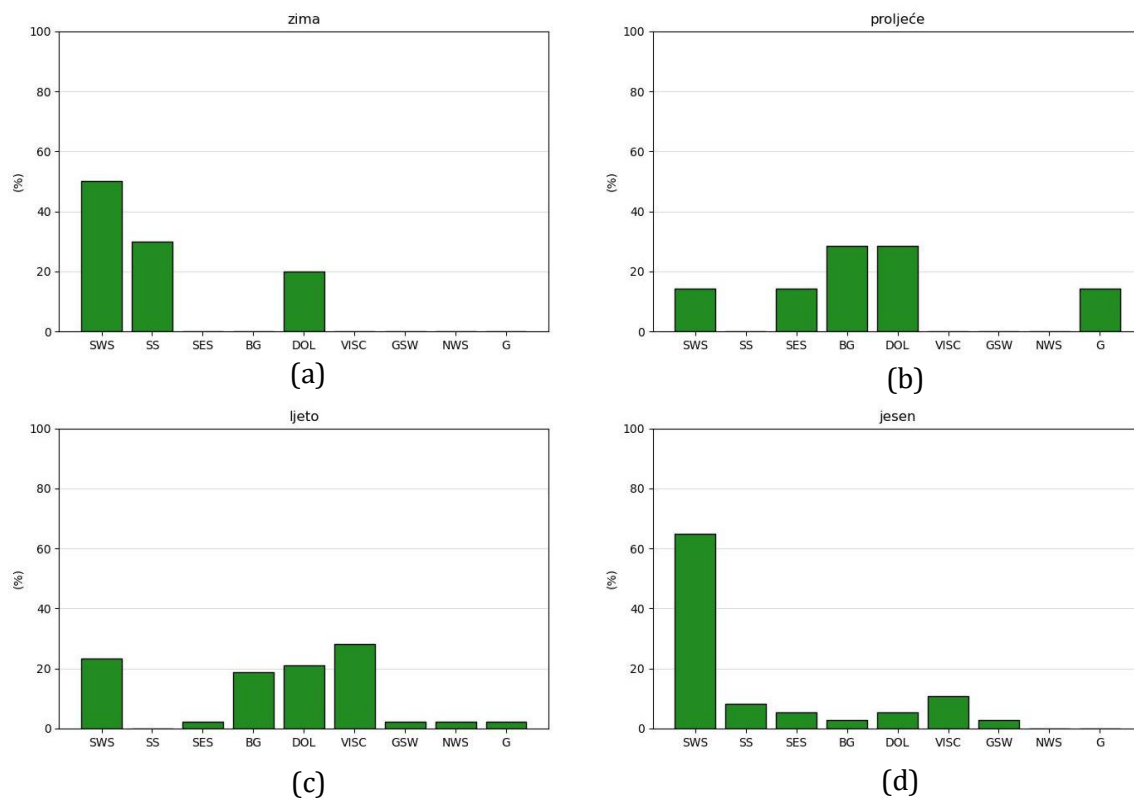


Slika 3.6. Zastupljenost tipova vremena i režima strujanja na 500 hPa plohi tijekom nastanka bujičnih poplava

zabilježeno niti u jednom slučaju. Za kontinentalnu Hrvatsku nema niti jednog strujanja koje se posebno ističe, već su podjednako zastupljeni najčešći tipovi BG (29%) i VISC (25,8%), te DOL (16,1%) i SWS (12,9%). Učestalost tipova vremena po sezonama (slika 3.8) objedinjuje rezultate dobivene za raspodjelu tipova vremena po prirodno-geografskim cjelinama i za broj poplava po sezonama i prirodno-geografskim cjelinama (poglavlje 3.1). Kako je najveći broj bujičnih poplava u jesen i zimu vezan isključivo za primorsku Hrvatsku tako je i tada prevladavajući tip vremena upravo SWS. U proljeće, podjednak je broj poplava nad kontinentom i primorjem te su najčešće pod utjecajem tipova DOL i BG (28,5%). Ljeti su češći događaji nad kontinentom pod utjecajem tipa VISC. Dobiveni rezultati analize visinske sinoptičke situacije mogu se usporediti i s rezultatima drugih radova npr. Mikuš i sur. (2012), gdje je dobiveno da isti tipovi vremena i režimi strujanja prevladavaju za vrijeme konvektivnih dana.



Slika 3.7. Broj bujičnih poplava po tipovima vremena i prirodno-geografskim cjelinama Hrvatske.



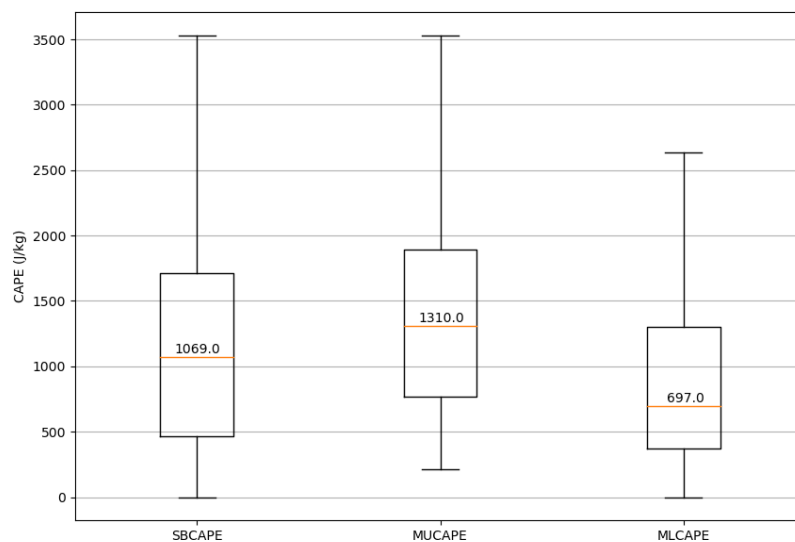
Slika 3.8. Učestalost bujičnih poplava u ovisnosti o tipovima vremena po sezonama: (a) zima, (b) proljeće, (c) ljeto i (d) jesen.

### 3.3. Mezoskalna analiza

Termodinamičko stanje atmosfere prilikom nastanka bujičnih poplava opisano je preko odabranih termodinamičkih parametara dobivenih iz radiosondažnih mjerenja koji su objašnjeni u poglavlju 2.5. Analizirani su parametri za 87 događaja bujičnih poplava, a rezultati su prikazani u obliku pravokutnih dijagrama s naznačenom vrijednosti medijana niza,  $m$ . Donja i gornja stranica pravokutnika označavaju prvi (donji) kvartil,  $q_1$  i treći (gornji) kvartil,  $q_3$ . Mjera raspršenosti podataka, odnosno interkvartalni raspon dobiven je kao razlika kvartila  $q_3 - q_1$ . Linije okomite na pravokutnik završavaju crticama od kojih donja predstavlja najmanji podatak koji je veći od  $q_1 - 1.5(q_3 - q_1)$ , a gornja predstavlja najveći podatak koji je manji od  $q_3 + 1.5(q_3 - q_1)$  (engl. *outlier*).

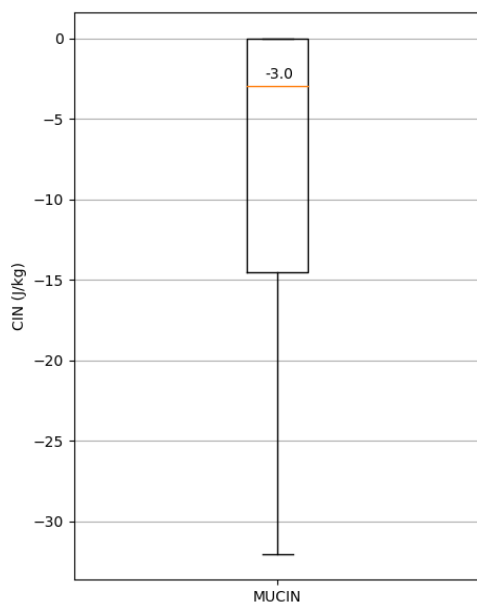
Za mjeru nestabilnosti atmosfere izračunati su parametri CAPE i CIN. Vrijednosti termodinamičkih parametara SBCAPE, MUCAPE i MLCAPE prikazane su na slici 3.9. Najveći medijan očekivano ima MUCAPE koji iznosi  $1310 \text{ Jkg}^{-1}$ , s gornjim kvartilom od

1893,5 J/kg. Sličan raspon ima i SBCAPE s medijanom od 1069 J/kg, gornji kvartil mu iznosi 1711 J/kg te dostiže jednake maksimalne vrijednosti kao i MUCAPE. Manji raspon ima MLCAPE, jer je izračunat za čest čija su svojstva dobivena usrednjavanjem stanja atmosferskog graničnog sloja pa mu medijan iznosi 697 J/kg. Za većinu slučajeva CAPE poprima vrijednosti koje ukazuju na slabo (<1000 J/kg) do umjereno (1000 – 2500 J/kg) nestabilnu atmosferu. Da bujične poplave imaju tendenciju nastati u uvjetima slabog i umjerenog CAPE-a dobiveno je i u radovima Jessup i DeGaetano (2007) te Schroeder i sur. (2016). Meyer i sur. (2022) navode kako se nestabilnost atmosfere u razdoblju od 1981. do 2020. godine povećala, odnosno atmosfera se smatra nestabilnom za CAPE > 326,9 J/kg što odgovara vrijednostima CAPE-a dostatnog za konvektivnu aktivnost u našim krajevima, osobito na Jadranu (Mikuš i sur., 2012).



Slika 3.9. Pravokutni dijagrami raspodjele vrijednosti termodinamičkih parametara SBCAPE, MUCAPE i MLCAPE.

Za opis nestabilnosti atmosfere izračunat je i parametar CIN za najnestabilniju čest čiji raspon je prikazan na slici 3.10. Ukoliko su vrijednosti CIN-a manje, čest se lakše diže do LFC-a i stvaraju se uvjeti za konvekciju. Dobiven je medijan -3 J/kg, gornji kvartil 0 J/kg i donji kvartil -14,5 J/kg. Rezultati ukazuju da je za gotovo sve događaje apsolutna vrijednost CIN-a dovoljno mala (<60 J/kg) pri čemu je atmosfera pogodna za konvekciju (Stull, 2015).

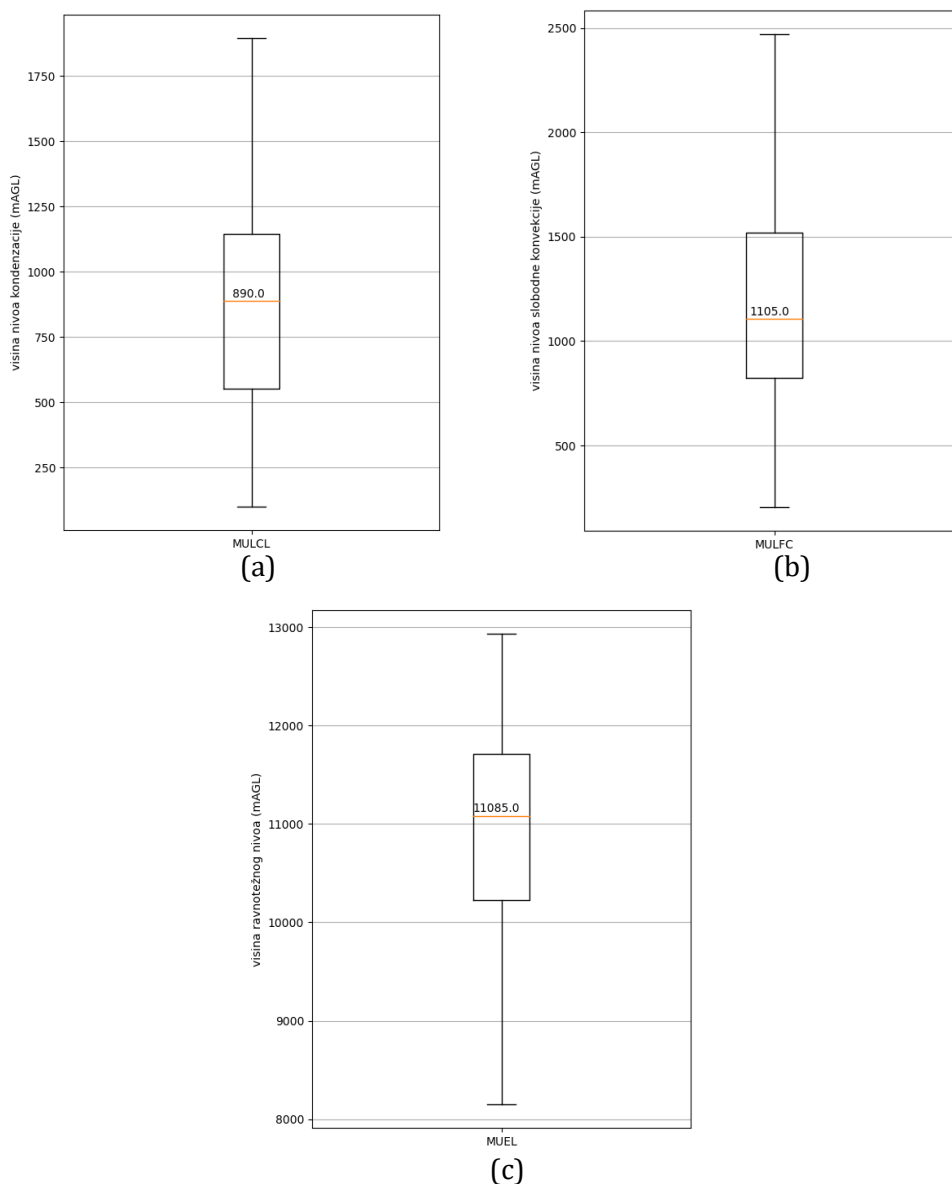


Slika 3.10. Slično kao na slici 3.9, ali za MUCIN.

Visine LCL-a, LFC-a i EL-a mogu nam dati uvid u proces nastanka DMK-a, točnije olujnih oblaka. Na slici 3.11 prikazani su rasponi vrijednosti visina LCL-a, LFC-a i EL-a za najnestabilniju čest iskazani u metrima iznad Zemljine površine (mAGL, engl. *meters Above Ground Level*). Gornji kvartil LCL-a iznosi 1145 mAGL što znači da je većina oblaka imala vrlo nisku bazu<sup>14</sup>. Parametri LCL i LFC nemaju značaja razliku u iznosima medijana: 890 i 1105 mAGL, a što je manja razlika između navedenih nivoa to je veća vjerojatnost nastanak DMK-a, jer nije potreban značajan mehanizam podizanja<sup>15</sup>. Na kojoj visini se nalazi vrh konvektivnog oblaka govori nam iznos EL-a. Njegov medijan iznosi 11085 mAGL, s donjim kvartilom 10222,5 mAGL i gornjim kvartilom 11715 mAGL. Navedene visine spadaju u prosječne visine troposfere za srednje geografske širine. Možemo zaključiti da su se prilikom promatranih događaja razvijali konvektivni oblaci jakog vertikalnog razvoja koji su dosežali sami vrh troposfere. Za primjer, Taszarek i sur. (2017) dobili su vrijednosti medijana EL-a od 8000 mAGL za događaje intenzivnih grmljavinskih oluja.

<sup>14</sup><https://www.vrijemeradar.hr/vijesti-o-vremenu/koliko-visoko-moze-biti-oblak--2ab75e1f-bac3-4074-9bc2-4ee07dec4214>

<sup>15</sup>[https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU\\_Training\\_Page/convective\\_parameters/Sounding\\_Staff/MesoscaleParameters.html](https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/convective_parameters/Sounding_Staff/MesoscaleParameters.html)

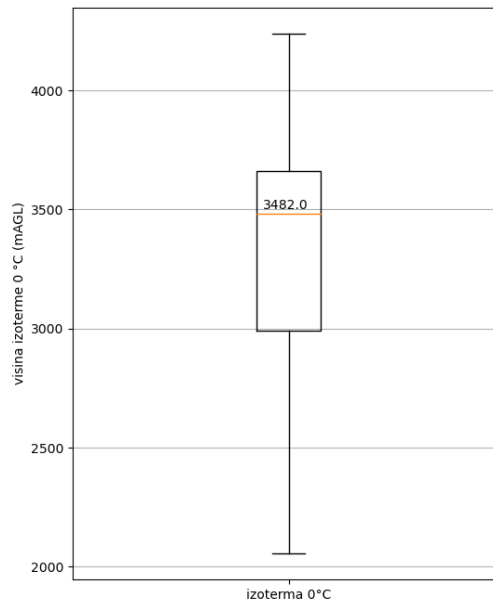


Slika 3.11. Slično kao na slici 3.9, ali za (a) MULCL, (b) MULFC i (c) MUEL.

Oblačni sustavi s dubokim toplim slojem oblaka imaju veću vjerojatnost za proizvodnju značajnijih količina oborina, jer kapljice imaju više vremena za interakciju i tako dovode do veće učinkovitosti oborine (Schroeder i sur., 2016). U ovom radu analizirane su vrijednosti visine izotermne 0°C ili takozvane visine nivoa smrzavanja (engl. *Freezing Level*) iskazane u mAGL (slika 3.12). Medijan visine izoterme 0°C iznosi 3482 mAGL, s donjim kvartilom 2990 mAGL, što je za većinu događaja iznadprosječna visina za promatrano područje<sup>16</sup>. Schroeder i sur. (2016) dobili su iznadprosječnu

<sup>16</sup> <https://www.meteoadriatic.net/klimatska-analiza-2022-godine/>

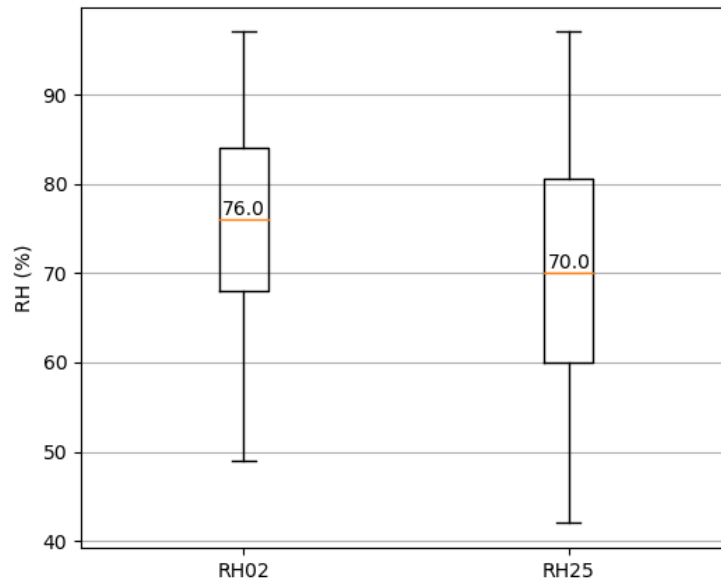
srednju vrijednost visine nivoa smrzavanja 4108 mAGL, a Konarik i Kelly (2016) 4268 m za toplu sezonu i 4257 m za hladnu sezonu no njihova istraživanja su na području SAD-a gdje su prosječne vrijednosti više nego za naša područja jer visina izoterme ovisi o geografskoj širini.



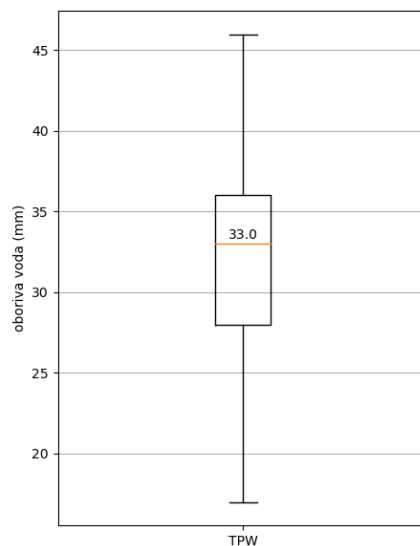
Slika 3.12. Slično kao na slici 3.9, ali za visinu izoterme 0°C.

Kao što je objašnjeno u uvodnom poglavlju, jedan od nužnih meteoroloških uvjeta za nastanak DMK-a, ali i bujičnih poplava, je dovoljno vlage u zraku. Meyer i sur. (2022) ističu kako je sadržaj vlage u zraku ključan za proizvodnju obilnih oborina. Termodinamički parametri analizirani za opis količine vlage u zraku su RH02, RH25 i TPW. Na slici 3.13 prikazan je raspon vrijednosti relativne vlažnosti zraka u slojevima 0-2 km i 2-5 km iznad tla iskazan u postocima. U nižem sloju atmosfere vlažnost je veća, medijan RH02 iznosi 76% ( $q_1 = 68%$  i  $q_3 = 84%$ ) dok je u sloju iznad do 5 km visine medijan RH25 70 % ( $q_1 = 60%$  i  $q_3 = 80,5%$ ). Slične vrijednosti dobivene su i u radu Meyer i sur. (2022) za događaje koji su rezultirali bujičnim poplavama gdje je analizirana relativna vlažnost sloja zraka od tla do visine 700 hPa plohe te je dobiven medijan od oko 75 %. Vrijednosti RH-a za događaje bujičnih poplava uvijek su veći nego za ostale kišne događaje. Veliko odstupanje zamijetili su i u količini oborive vode. Izračunali su medijan TPW-a koji iznosi 20 kg/m<sup>2</sup> za cijelo promatrano razdoblje (i one dane kada nije bilo oborina), a za događaje bujičnih poplava medijan iznosi preko 30 kg/m<sup>2</sup>. Slične vrijednosti TPW-a izražene u mm dobivene su i ovom radu gdje

medijan iznosi 33 mm (slika 3.14). Schroeder i sur. (2016) su analizom slučaja bujičnih poplava također zamijetili odstupanje TPW-a i to čak za dvije standardne devijacije iznad prosječnih vrijednosti zbog čega smatraju povećanu količinu oborive vode nužnim uvjetom za nastanak obilnih oborina i posljedično bujičnih poplava.



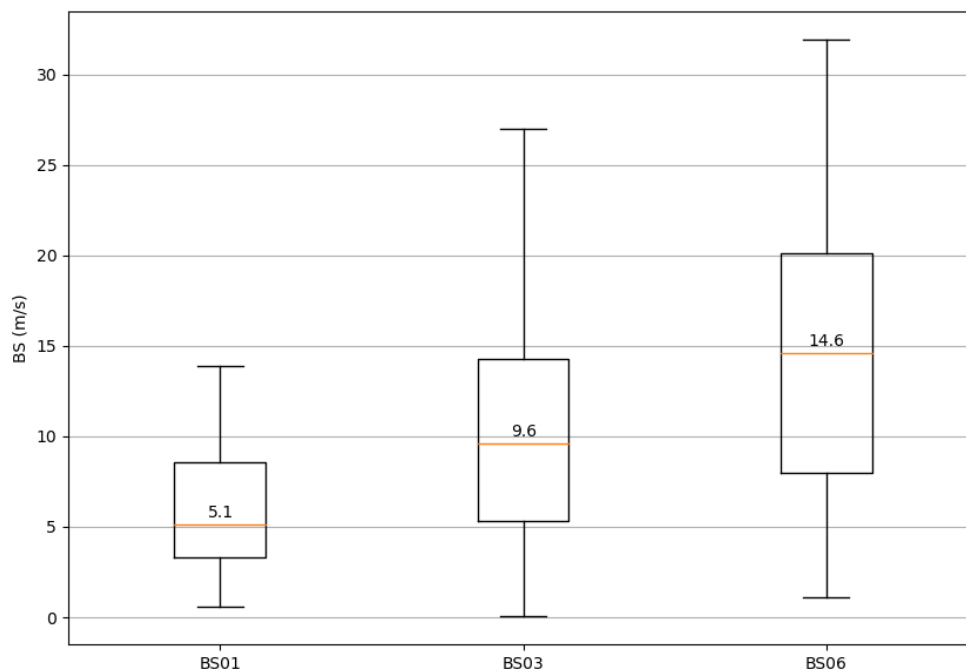
Slika 3.13. Slično kao na slici 3.9, ali za RH02 i RH25.



Slika 3.14. Slično kao na slici 3.9, ali za TPW.

Veliku ulogu u nastajanju bujičnih poplava ima organizacija konvektivnih sustava što ovisi o vertikalnom smicanju vjetrova. Ukoliko je olujni sustav sporo pokretan

i ima tendenciju zadržati se na istom području to je veća vjerojatnost za nastanak obilne oborine na tom području. Na slici 3.15 su prikazani rasponi vrijednosti kinematičkih parametara BS01, BS03 i BS06 čiji medijani redom iznose: 5,1 m/s, 9,6 m/s i 14,6 m/s. Dobivene vrijednosti se mogu okarakterizirati kao slabo do umjereno vertikalno smicanje vjetra (Pučik i sur., 2021) što se u mnogim radovima smatra pogodnim za nastanak bujičnih poplava (npr., Maddox i sur., 1979; Konarik i Kelly, 2016; Schroeder i sur., 2016; Meyer i sur., 2022). Organizacija konvektivnog sustava definira se prema vrijednostima vertikalnog smicanja vjetra u sloju 0-6 km iznad tla, čiji interval iznosi 10 – 18 m/s za organiziranje multićelija i stvaranje mezoskalnih konvektivnih sustava koji pogoduju nastanku bujičnih poplava<sup>17</sup>. Parametar BS06 u ovom radu ima donji kvartil 8 m/s, a gornji kvartil 20,1 m/s pri čemu se vrijednosti BS06-a za 50% analiziranih slučajeva poklapaju s vrijednostima smicanja vjetra prilikom organizacije multićelija.



Slika 3.15. Slično kao na slici 3.9, ali za BS01, BS03 i BS06.

<sup>17</sup> <https://www.weather.gov/lmk/trainingdoc>

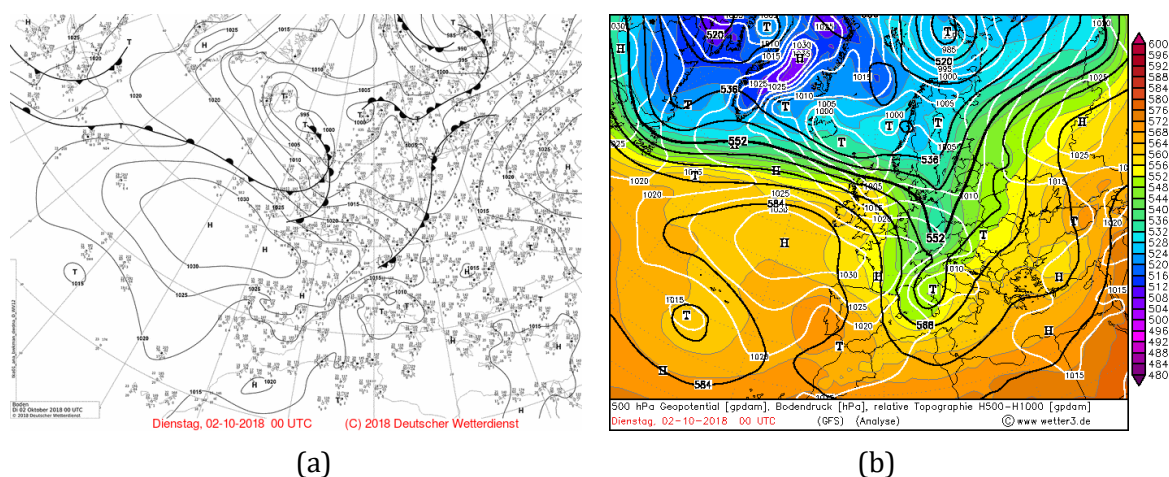


### 3.4. Analiza slučaja bujične poplave 2. listopada 2018.

Za detaljniji prikaz sinoptičkih i mezoskalnih uvjeta u kojima nastaju bujične poplave odabran je jedan reprezentativan slučaj takvog događaja. Iz rezultata je dobiveno da je veći broj događaja u primorskom djelu Hrvatske, najčešće u jesen i kada po visini prevladava tip vremena SWS, stoga je odabran upravo takav slučaj.

Na području grada Dubrovnika, 2. listopada 2018. godine izmjerena je rekordna količina oborine. Tijekom noći konvektivni sustav zahvatio je područje grada pri čemu je u tri sata palo oko 259 mm kiše. Nastale su bujične i urbane poplave koje su uzrokovale materijalne štete.

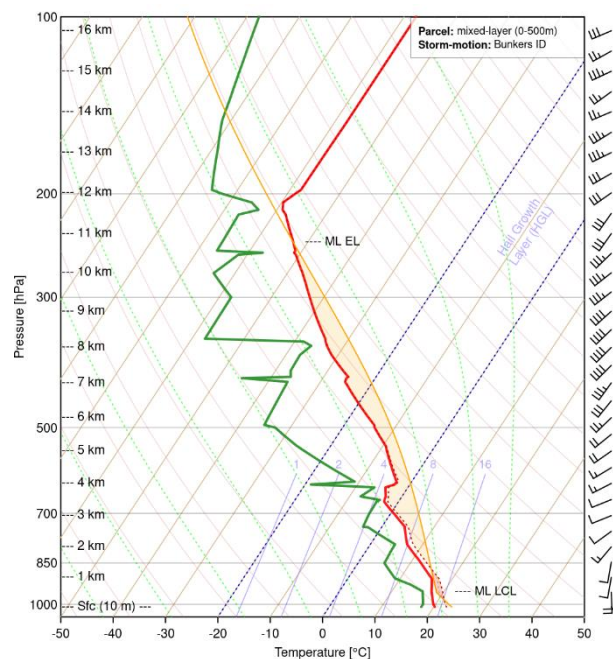
Na slici 3.16 prikazana je prizemna sinoptička situacija u 00 UTC (2 h po lokalnom vremenu). Područje Italije i primorske Hrvatske pod utjecajem je sniženog tlaka zraka, dok sa zapada jača ogranak anticiklone preko kontinentalne Hrvatske. Sjevernije se premješta fronta okluzije. Na 500 hPa plohi (slika 3.17) sa sjeverozapada kontinenta spustila se duboka dolina, a s prelaskom preko Alpa stvorila se visinska ciklona koja se premješta prema području Tirenskog mora pri čemu je Hrvatska pod utjecajem prednje strane doline s prevladavajućim jugozapadnim režimom strujanja. U takvim uvjetima se topao, vlažan i nestabilan zrak advektira sa Sredozemnog mora na hrvatsku obalu i stvaraju se idealni uvjeti za nastanak DMK-a.



Slika 3.16. Sinoptička situacija 2. 10. 2018. godine u 00 UTC: a) prizemno i b) visinski. Izvor: DWD.

Vertikalni profil atmosfere koji nam daje termodinamičke uvjete u trenutku nastanka konvekcije prikazan je na slici 3.17. Odabrana je sondaža s mjerne postaje

Brindisi u 00 UTC promatranog dana koja se smatra reprezentativnom, jer pokriva važne karakteristike zračne mase koja stiže na područje južnog Jadrana jugozapadnim visinskim strujanjem. Izračunati termodinamički i kinematički parametri iz promatrane sondaže dani su u tablici 3.2. Svi dobiveni parametri su unutar interkvartalnih raspona dobivenih u analizi svih slučajeva. Visoke vrijednosti CAPE-a i relativne vlažnosti te niske vrijednosti CIN-a ukazuju na nestabilnost atmosfere te uz značajan iznos TPW-a i na visok sadržaj vlage u zraku, što znači da su u atmosferi prisutni sastojci za nastanak DMK-a. Izgled CAPE-a na termodijagramu jest uzak i visok ("skinny" CAPE), a takav oblik često ukazuje na konvektivne sustave koji donose obilne oborine. Vidi se da se procesi odvijaju u toplom dijelu troposfere, jer je razlika između visine baze oblaka (LCL) i visine izoterme 0 °C gotovo 2,5 km. Prisutno je zakretanje vjetra po visini, od južnih smjerova u nižim slojevima prema jugozapadnim smjerovima iznad 850 hPa. Smicanje vjetra u donjih 6 km iznad tla je umjereno, a iznad 500 hPa nema značajnih promjena u brzini vjetra.



Slika 3.17. Visinsko radiosondažno mjerenje (termodijagram) na postaji Brindisi (Italija) 02. listopada 2018. godine u 00 UTC. Izvor: <http://rawinsonde.com/>.

Tablica 3.2. Vrijednosti termodinamičkih i kinematičkih parametara izračunate iz radiosondažnog mjerenja na postaji Brindisi (Italija) 2. listopada 2018. godine u 00 UTC pomoću *thundeR*-a.

PARAMETAR	VRIJEDNOST
SBCAPE [J/kg]	986
MUCAPE [J/kg]	1264
MLCAPE [J/kg]	1143
CIN [J/kg]	-13
LCL [mAGL]	750
LFC [mAGL]	1220
EL [mAGL]	10965
visina izoterme 0°C [mAGL]	3130
TPW [mm]	30
RH02 [%]	76
RH25 [%]	61
BS01 [m/s]	5,2
BS03 [m/s]	8,6
BS06 [m/s]	14,9

## 4. Zaključak

Cilj ovog rada bio je opisati bujične poplave i analizirati slučajeve istih koji su se dogodili na području Hrvatske u razdoblju od 2012. do 2022. godine. Od 1970-ih godina, sve je veći broj konvektivnih sustava koji stvaraju obilne oborine, kako u svijetu (posebice u SAD-u, prema Maddox i sur. 1979) tako i u Hrvatskoj, a njihova klimatologija nije dovoljno dobro popraćena (Nimac i sur., 2021). Analizom 97 događaja iz razdoblja 2012. do 2022. godine dobivena je prostorna i vremenska razdioba bujičnih poplava na području Hrvatske te tipovi vremena, režimi strujanja i termodinamički uvjeti koji pogoduju njihovom nastanku.

Hrvatska je podijeljena na prirodno-geografske regije zbog raznolikosti u krajoliku i prema tome ima i različita klimatska područja što utječe na vremenske prilike. Više od dvije trećine događaja vezano je za područje primorske Hrvatske, dok je ostatak događaja vezan za kontinentalnu Hrvatsku. Svake godine prosječno možemo očekivati barem jedan ekstremni oborinski događaja na kontinentu, posebice u ljetnim mjesecima kada je konvekcija nad kontinentom najizraženija. Na Jadranu su slučajevi bujičnih poplava češći zbog interakcije mora i atmosfere te orografije, a mogu se dogoditi u bilo koje doba godine, iako su najvjerojatniji u jesen. Često mjesto nastanka su urbana područja zbog neadekvatnog i neodržavanog sustava odvodnje i prekomjernog iskorištavanja površina za gradnju. Dnevni hod događaja ima izražen maksimum u poslijepodnevnom satima zbog utjecaja Sunčevog zagrijavanja te sekundarni maksimum noću, jer je za obalna područja noćna konvekcija česta.

Najzastupljeniji tip vremena na 500 hPa plohi je prednja strana doline koju karakterizira jugozapadni režim strujanja. Takav tip vremena se posebno ističe u primorskoj Hrvatskoj gdje je vezan za više od 50% slučajeva pri čemu dolazi vlažan i nestabilan zrak s mora na kopno. Na kontinentu, veću zastupljenost imaju bezgradijentno polje, visinska ciklona i dolina.

Termodinamički i kinematički parametri dobiveni su iz radiosondažnih mjerenja koja prikazuju svojstva zračne mase prisutne u vrijeme nastanka bujičnih poplava. Analizom parametara je dobiveno da u atmosferi moraju biti zadovoljeni uvjeti povećane nestabilnosti te povećane vrijednosti vlažnosti zraka da bi nastao DMK. Glavna mjera nestabilnosti atmosfere je iznos CAPE-a čiji medijan iznosi 1310 J/kg, a

da je atmosfera bogata vlagom govori prisutnost iznadprosječne vrijednosti relativne vlažnosti i oborive vode. Vrijednosti CIN-a su dovoljno male što omogućava lakšu realizaciju konvekcije. Olujni oblaci koji su se razvili imaju nisku bazu i sežu sve do vrha troposfere te imaju duboki topli sloj, jer su visine izoterme 0°C također iznad prosjeka. Vertikalno smicanje vjetra je slabo do umjereno što već omogućava organizaciju konvektivnih sustava, odnosno nastanak multićelijskih sustava (Markowski i Richardson, 2010).

Bujične poplave sve su češća i opasnija vremenska nepogoda, stoga je od izuzetne važnosti njihovo rano prepoznavanje kako bi se zaštitili ljudi i imovina. Za mogućnost poboljšanja operativne prognoze važno je razumjeti koji procesi uzrokuju bujične poplave, odnosno koji sastojci su nužni za nastanak sustava koji uzrokuju obilne oborine. Osim meteoroloških uvjeta, veliku važnost u nastanku poplava imaju i hidrološka obilježja, jer ista količina oborine nema isti učinak na svakom mjestu. Istovremena analiza meteoroloških uvjeta i praćenje hidroloških modela, poput FFGS-a i EFAS-a, dala bi bolji uvid u nastanak bujičnih poplava. Uz preciznije praćenje i bilježenje događaja te njihovu daljnju analizu, uvelike će se poboljšati sustav za prognozu obilnih oborina, a time i bujičnih poplava.

# Literatura

- Ashley, S. T. i Ashley, W. S. (2008). Flood fatalities in the United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(3), 805-818.
- Betz, H. D., Schmidt, K., Oettinger, W. P. i Montag, B. (2008). Cell-tracking with lightning data from LINET. *Advances in Geosciences*, 17, 55-61.
- Brong, B. (2006). Synoptic patterns associated with flash floods in Eastern California and Western Nevada. *Western Region Technical Attachment Lite*, 6-15.
- Cressman, G. P. (1977). NOAA News Release. Washington, D.C. 77-197.
- Ćurić, M. i Stilinović, T. (2014). *Analiza indeksa nestabilnosti atmosfere na temelju radiosondaža i detekcije munja u Hrvatskoj*. Rad za dodjelu Rektorove nagrade. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet.
- Davison, M. (1999). *Shallow/Deep Convection*. NCEP. Dostupno na: <https://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/training/deep/index.htm> [15. srpnja 2024.]
- Doswell III, C. A. (1993). Flash flood - producing convective storms: current understanding and research. *Proc. US-Spain Workshop on Natural Hazards*.
- Doswell III, C. A., Brooks, H. E. i Maddox, R. A. (1996). Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Weather and Forecasting*, 11(4), 560-581.
- Emanuel, K. A. (1994). *Atmospheric Convection* [online], (pp. 3-13). New York: Oxford University Press. Dostupno na: [https://books.google.hr/books?id=VdaBBHEGAcMC&printsec=frontcover&hl=hr&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.hr/books?id=VdaBBHEGAcMC&printsec=frontcover&hl=hr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false) [15. srpnja 2024.]
- Fragoso, M., Trigo, R. M., Pinto, J. G., Lopes, S., Lopes, A., Ulbrich, S. i Magro, C. (2012). The 20 February 2010 Madeira flash-floods: Synoptic analysis and extreme rainfall assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(3), 715-730.
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., ... i Viglione, A. (2009). A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*, 367(1-2), 70-78.
- Gelo, B., i sur. (2005). *Meteorološki pojmovnik i višejezični rječnik: hrvatski, engleski, njemački i francuski jezik*. Zagreb: DHMZ, HINUS. p. 655.

- Grisogono, B., Večenaj, Ž. i Belušić, D. (2009). *Uvod u mezoskalnu meteorologiju i atmosfersku turbulenciju*. p. 186. Dostupno na: <https://www.pmf.unizg.hr/geof/predmet/dinmet4>. Zadnja verzija: 13. lipnja 2024.
- Groenemeijer, P. H. (2003). *Three events of strong deep moist convection in the Netherlands*. ESTOFEX. Dostupno na: <https://www.estofex.org/html/literature.html> [17. srpnja 2024.]
- Holton, J. R. (2004). *An Introduction to dynamic meteorology*, Fourth edition. Amsterdam; Boston; Heidelberg: Elsevier, pp. 282-304.
- Ivančan-Picek, B., Horvath, K., Mahović, N. S. i Gajić-Čapka, M. (2014). Forcing mechanisms of a heavy precipitation event in the southeastern Adriatic area. *Natural hazards*, 72, 1231-1252.
- Jessup, S. M. i DeGaetano, A. T. (2008). A statistical comparison of the properties of flash flooding and nonflooding precipitation events in portions of New York and Pennsylvania. *Weather and Forecasting*, 23(1), 114-130.
- Konarik, S. i Kelly, L. (2016). Improving flood and flash flood forecasts at the Miami National Weather Service, poster. *96<sup>th</sup> American Meteorological Society Annual Meeting, New Orleans*.
- Lóczy, D., Czigány, S. i Pirkhoffer, E. (2012). Flash flood hazards. U: Kumarasamy, M., *Studies on Water Management Issues*. IntechOpen, 27-52.
- Lončar, E. i Bajić, A. (1994). Weather types in Croatia. *Hrvatski Meteorološki Časopis*, 29, 31-41.
- Maddox, R. A., Hoxit, L. R, Chappell, C. F. i Caracena, F. (1978). Comparison of meteorological aspects of the Big Thompson and Rapis City flash floods. *Montly Weather Review*, 106(3), 375-389.
- Maddox, R. A., Chappell, C. F. i Hoxit, L. R (1979). Synoptic and meso- $\alpha$  scale aspects of flash flood events. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 60(2), 115-123.
- Markowski, P. i Richardson, Y. (2010). *Mesoscale meteorology in midlatitude: Part III - Deep moist convection*. pp. 181-312. Wiley-Blackwell.
- Meyer, J., Neuper, M., Mathias, L., Zehe, E. i Pfister, L. (2022). Atmospheric conditions favouring extreme precipitation and flash floods in temperate regions of Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(23), 6163-6183.

- Mikuš, P., Prtenjak, M. T. i Mahović, N. S. (2012). Analysis of the convective activity and its synoptic background over Croatia. *Atmospheric Research*, 104, 139-153.
- Mikuš, P. (2017). *Satelitske karakteristike i grmljavinska aktivnost intenzivnih konvektivnih oluja*. Doktorski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet.
- Nimac, I., Cindrić Kalin, K., Renko, T., Vujnović, T. i Horvath, K. (2022). The analysis of summer 2020 urban flood in Zagreb (Croatia) from hydro-meteorological point of view. *Natural Hazards*, 112(1), 873-897.
- Pandžić, K. (2002). *Analiza meteoroloških polja i sustava*. Zagreb: HINUS. pp. 223-229, 267-272.
- Penzar, B. i Penzar, I. (1981). O položaju i uzrocima ekstrema u godišnjem hodu oborine u Hrvatskoj (Dio II). *Hrvatski Geografski Glasnik*, 43(1), 27-48.
- Porcú, F., Caracciolo, C. i Prodi, F. (2003). Cloud systems leading to flood events in Europe: an overview and classification. *Meteorological Applications*, 10(3), 217-227.
- Rasmussen, E. N. i Blanchard, D. O. (1998). A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Weather and Forecasting*, 13(4), 1148-1164.
- Renko, T. (2018). *Pijavice na Jadranu: Učestalost, karakteristike, uvjeti nastanka i mogućnost prognoziranja*. Doktorski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet.
- Saharia, M., Kirstetter, P. E., Vergara, H., Gourley, J. J., Hong, Y. i Giroud, M. (2017). Mapping flash flood severity in the United States. *Journal of Hydrometeorology*, 18(2), 397-411.
- Schroeder, A., Basara, J., Shepherd, J. M. i Nelson, S. (2016). Insights into atmospheric contributors to urban flash flooding across the United States using an analysis of rawinsonde data and associated calculated parameters. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(2), 313-323.
- Shelton, M. L. (2009). *Hydroclimatology: Perspectives and applications*. Cambridge University Press. pp. 305-343.
- Stull, R. (2015). *Practical Meteorology: An algebra-based survey of atmospheric science*. University of British Columbia, Kanada. pp. 63, 481-534.



- Taszarek, M., Czernecki, B. i Szuster, P. (2023). thundeR - A rawinsonde package for processing convective parameters and visualizing atmospheric profiles, poster. *11<sup>th</sup> European Conference on Severe Storms in Bucharest, Romania*.
- Vujnović, T., Oskoruš, D., Berbić, J. i Macek, K. (2018). Operativno hidrološko prognoziranje DHMZ-a na primjeru izabranih događaja 2017. godine. U: *Znanstveno stručni skup s međunarodnim sudjelovanjem: Hidrologija u službi zaštite i korištenja voda te smanjenja poplavnih rizika-suvremeni trendovi i pristupi*, 133-142.
- Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M., ... i Vučetić, V. (2008). *Klimatski atlas Hrvatske / Climate atlas of Croatia 1961 - 1990., 1971 - 2000*. Zagreb: DHMZ. pp. 43-59.

## Dodatak A

Tablica A1. Dani kada su zabilježene bujične poplave na području Hrvatske (2012.-2022.).

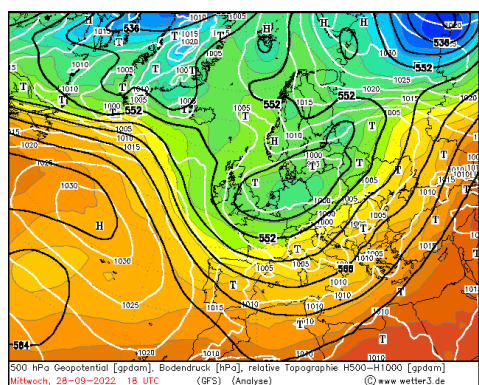
DATUM	MJESTO	VRIJEME
18. 11. 2022.	Novi Vinodolski, Malinska	u noći
29. 9. 2022.	sjeverna Istra	u noći
28. 9. 2022.	Rijeka	navečer
26. 9. 2022.	Dubrovnik	u noći
9. 9. 2022.	Neretvanska dolina - Ploče	u noći
16. 8. 2022.	Ploče	ujutro
13. 8. 2022.	Split	oko podneva
9. 6. 2022.	Požega	navečer
8. 6. 2022.	Knin	poslijepodne
30. 5. 2022.	Kaštela	ujutro
7. 5. 2022.	Zagorje - sjevernije od Krapine	navečer
5. 12. 2021	Split, Dicmo	ujutro
14. 11. 2021.	Hvar	poslijepodne
16. i 18. 7. 2021.	Slavonija, Baranja	kroz sva tri dana
6. 6. 2021.	Požega	poslijepodne
8. i 9. 12. 2020.	dubrovačko područje, Mljet	u noći s 8. na 9.
7. 12. 2020.	Mali Lošinj, Dugi otok	navečer
4. 8. 2020.	Slavonija, Baranja	poslijepodne
4. 8. 2020.	Dubrovnik	navečer
24. 7. 2020.	Zagreb	navečer
20. 6. 2020.	Kaštela	oko podneva
14. 6. 2020.	Međimurje - G.Poljana, Macinec	poslijepodne
21. 12. 2019.	zadarsko područje	poslijepodne
20. 12. 2019.	splitsko područje	u noći
12. i 13. 11. 2019.	Vela Luka	u noći s 12. na 13.
10. 7. 2019.	Makarska	oko podneva
5. 6. 2019.	Jagnjedovac	poslijepodne
29. 5. 2019.	Drniš	poslijepodne
2. 2. 2019.	Istra - Raša	oko podneva

DATUM	MJESTO	VRIJEME
19. 1. 2019.	Orebić	navečer
19. i 20. 11. 2018.	Makarska	u noći s 19. na 20.
28. 10. 2018.	Senj	poslijepodne
2. 10. 2018.	Dubrovnik	u noći
3. 9. 2018.	Osijek	navečer
26. 8. 2018.	Dubrovnik	tokom cijelog dana
25. 8. 2018.	Rabac, Poreč, Peroj	tokom cijelog dana
22. 6. 2018.	Rovinj, Pula	u noći
13. 6. 2018.	Zagreb, Međimurje, Podravina	poslijepodne
5. 6. 2018.	Pula, Karlovac	poslijepodne
1. 6. 2018.	Koprivnica	poslijepodne
13. 5. 2018.	Buzet	poslijepodne
12. 5. 2018.	Zaprešić, Samobor, Pribislavec	poslijepodne
2. 5. 2018.	Sisak, Petrinja	poslijepodne
22. 10. 2017.	Rijeka, Bakar	poslijepodne
25. 9. 2017.	Dubrovnik	oko podneva
19. 9. 2017.	Trogir	oko podneva
16. i 17. 9. 2017.	Crikvenica, Rab	u noći sa 16. na 17.
11. 9. 2017.	Zadar, Nin, Sali	prijepodne
10. 9. 2017.	Istra - Potpićan	prijepodne
11. 7. 2017.	Ivanec	poslijepodne
7. 7. 2017.	Hrvatsko Zagorje	poslijepodne
25. 6. 2017.	kontinentalna Hrvatska	poslijepodne
2. 6. 2017.	bjelovarski kraj	poslijepodne
1. 6. 2017.	dijelovi Baranje	prijepodne
15. 5. 2017.	Slavonski Brod	oko podneva
15. 10. 2016.	Šibenik, Vodice	poslijepodne
16. 9. 2016.	Poreč	prijepodne
12. 9. 2016.	Donji Miholjac, Valpovo	poslijepodne
28. 7. 2016.	Belišće	u noći
25. 7. 2016.	okolica Osijeka	navečer
6. 7. 2016.	Imotski i okolica	poslijepodne

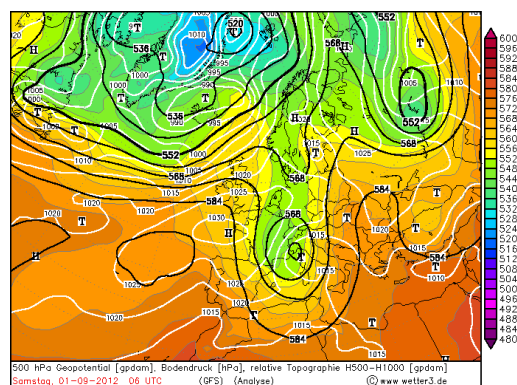
DATUM	MJESTO	VRIJEME
27. 6. 2016.	Feričanci	poslijepodne
25. 6. 2016.	Kumrovec	poslijepodne
12. 6. 2016.	Pazin, Labin, Novi Vinodolski	oko podneva
14. 10. 2015.	Vodice, Šibenik	navečer
5. 9. 2015.	Imotski	navečer
25. 8. 2015.	Zagreb	u noći
2. 8. 2015.	Nova Gradiška	poslijepodne
24. 6. 2015.	Dubrovnik	poslijepodne
18. 1. 2015.	Župa Dubrovačka, Metković	oko podneva
2. i 3. 12. 2014.	Vis	u noći s 2. na 3.
12. 11. 2014.	Rovinj, Medulin	u noći
15. 10. 2014.	Rijeka, Bakarac, Umag	u noći
20. 9. 2014.	Zadar, Makarska	prijepodne
12. 9. 2014.	Župa Dubrovačka	u podne
11. 9. 2014.	Šibenik, Vodice, Tribunj	u noći
1. 9. 2014.	područje cijele Hrvatske	u noći
21. 8. 2014.	Novi Vinodolski, Crikvenica	u noći
14. 8. 2014.	sjeverozapadna Hrvatska	u noći
5. 8. 2014.	Karlovac, Slatina, Daruvar	u noći
30. 7. 2014.	okolica Zadra i otoci	ujutro
21. 7. 2014.	Biograd	navečer
14. 7. 2014.	Pula	ujutro
15. 6. 2014.	Dubrovnik	u noći
12. 12. 2014.	otok Zlarin	u noći
11. 11. 2013.	Dubrovnik	ujutro
15. 10. 2013.	Dubrovnik	navečer
11. 10. 2013.	Opatija	u noći
9. 10. 2013.	Dubrovnik, Slano	poslijepodne
29. 9. 2013.	Rijeka	poslijepodne
12. 9. 2013.	Split	oko podneva
11. 7. 2013.	Rijeka, Gradinje	poslijepodne
9. 7. 2013.	pakračko i lipičko područje	poslijepodne

DATUM	MJESTO	VRIJEME
24. 6. 2013.	Makarska	navečer
16. 10. 2012.	Makarska	ujutro
12. i 13. 9. 2012.	Rijeka, Zadar, Šibenik	navečer
1. 9. 2012.	Zadar	prijepodne

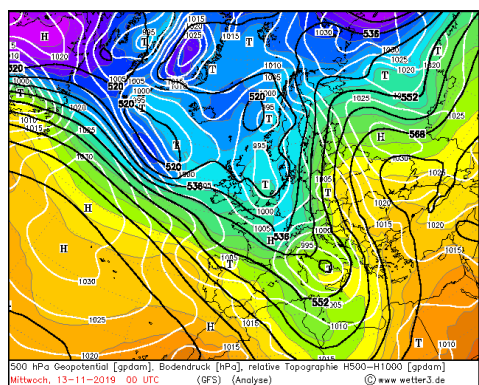
# Dodatak B



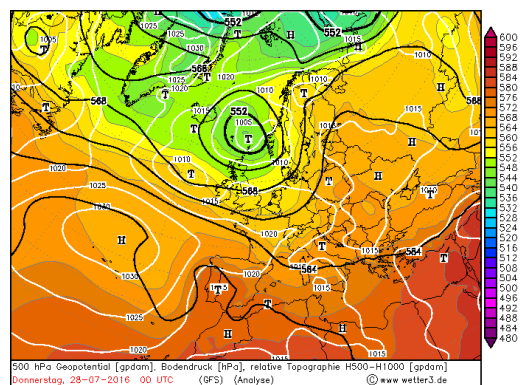
(a)



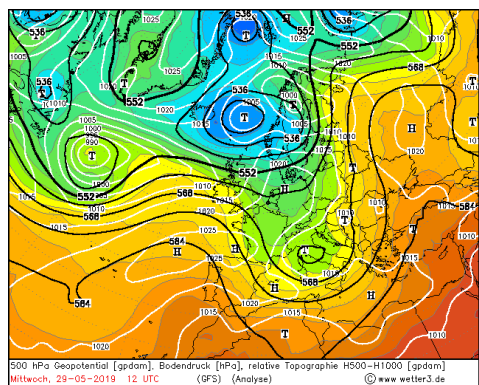
(b)



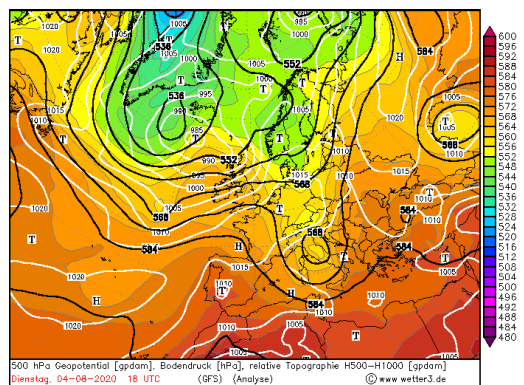
(c)



(d)

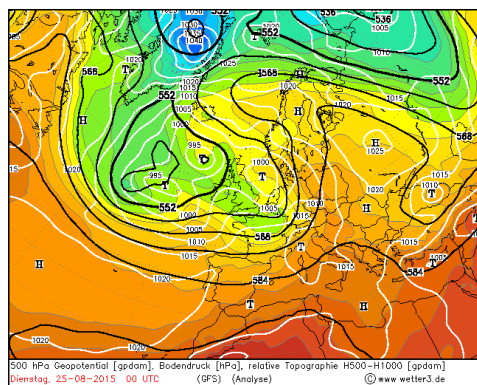


(e)

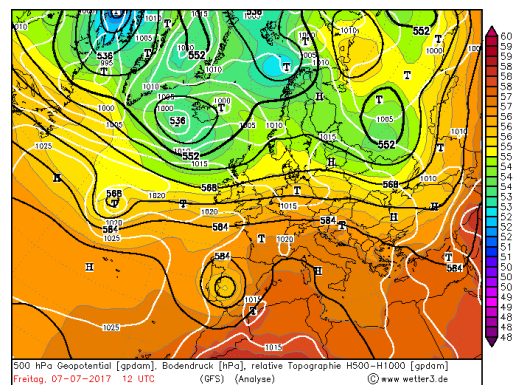


(f)

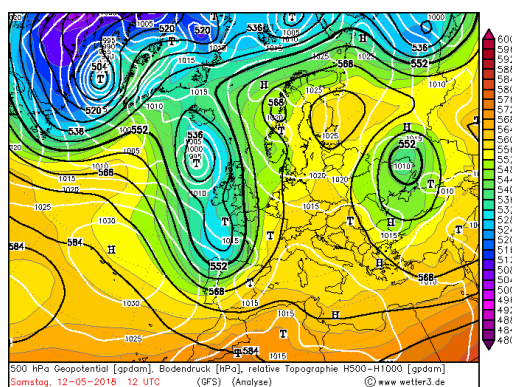
Slika B1. Tipična visinska strujanja u danima nastanka bujičnih poplava: (a) prednja strana doline - 28. 9. 2022. (b) južno strujanje - 1. 9. 2012. (c) jugoistočno strujanje - 13. 11. 2019. (d) bezgradijentno polje - 28. 7. 2016. (e) dolina - 29. 5. 2019. (f) visinska ciklona - 4. 8. 2020. Izvor: DWD.



(g)



(h)



(i)

Slika B1. Nastavak. Tipična visinska strujanja u danima nastanka bujičnih poplava: (g) stražnja strana grebena - 25. 8. 2015. (h) stražnja strana doline - 7. 7. 2017. (i) greben - 12. 5. 2018. Izvor: DWD.