

Ekstremni događaji tuče nad sjeverozapadnom Hrvatskom

Jambrošić, Karla

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:217:899056>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Karla Jambrošić

EKSTREMNI DOGAĐAJI TUČE NAD
SJEVEROZAPADNOM HRVATSKOM

Diplomski rad

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA
SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOLOGRAFIJA

Karla Jambrošić

Diplomski rad

Ekstremni događaji tuče nad sjeverozapadnom Hrvatskom

Voditelj diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Maja Telišman Prtenjak

Neposredni voditelj: dr. sc. Barbara Malečić

Zagreb, 2023.

Zahvale

Prije svega želim zahvaliti svojoj mentorici, izv. prof. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak, na ideji, motivaciji, strpljenju i vodstvu tijekom pisanja diplomskog rada.

Nadalje se zahvaljujem dr. sc. Barbari Malečić na provedenim simulacijama, pomoći i savjetima tijekom izrade ovog rada, osobitno na samom početku koji je uvijek izazovan.

Također izražavam zahvalnost dr. sc. Damjanu Jeliću na ustupljenim podacima o munjama iz LINET mreže, kao i na izračunu parametra TSII.

Zahvaljujem se i osoblju DHMZ-a i ESWD-a na ustupljenim meteorološkim podacima te podacima o tuči.

Na kraju se želim iskreno zahvaliti roditeljima i bratu na bezuvjetnoj podršci, razumijevanju i ljubavi, kao i na motivaciji tijekom cijelog studija.

Sažetak

U ovom radu korišten je model WRF-HAILCAST kako bi se simulirala dva (ekstremna) slučaja tuče koja su se dogodila tijekom 2022. godine na području sjeverozapadne Hrvatske. Analiza ovih događaja uključila je pregled sinoptičkih karata, analizu radiosondaža s postaje Zagreb - Maksimir i praćenje prizemnih mjerenja meteoroloških parametara. Mezoskalnim numeričkim modelom WRF-HAILCAST visoke razlučivosti pokušali su se reproducirati atmosferski uvjeti tijekom odabrana dva dana, s posebnim naglaskom na razvoj konvekcije i formiranje tuče. Cilj rada bilo je procijeniti koliko je uspješno model simulirao tuču i mogu li su ovi događaji zaista smatrati ekstremnima. Modelirane prostorne raspodjele tuče uspoređene su s opaženim vrijednostima tuče prikupljenim na prizemnim postajama DHMZ-a, kao i s europskom bazom podataka o opasnim vremenskim pojavama. Također, modelirani potencijal za razvoj munja uspoređen je s mjerenjima udara munja iz mreže LINET. U slučaju 25. svibnja 2022. model je ponegdje precijenio pojavu tuče, dok je je na dan 2. lipnja 2022. na nekim područjima podcijenio. Osim toga, rezultati su pokazali da je model podcijenio veličinu zrna tuče u oba slučaja. Unatoč ovim odstupanjima, kategoričke metrike su ukazivale na zadovoljavajuće rezultate, sugerirajući da je model uspješno simulirao uvjete za razvoj konvekcije i formiranje tuče.

Ključne riječi: konvekcija, tuča, WRF-HAILCAST

Extreme hail events over northwestern Croatia

Abstract

In this study, the WRF-HAILCAST model was used to simulate two (extreme) hail events that occurred in 2022 in the northwest region of Croatia. The analysis of these events included a review of synoptic charts, an examination of radiosonde profiles from the Zagreb - Maksimir station, and the monitoring of surface meteorological parameter measurements. The high-resolution mesoscale numerical model WRF-HAILCAST was used to recreate the atmospheric conditions during the chosen two days, with a specific emphasis on the evolution of convection and the formation of hail. The objective of this study was to evaluate the model's ability to accurately simulate hail events and determine the extent to which these events could be classified as extreme. Simulated spatial distributions of hail were compared to observed hail reports collected from the Croatian Meteorological and Hydrological Service's surface stations, as well as with a European Severe Weather Database. Furthermore, the simulated potential for lightning activity was compared to lightning data provided by LINET network. On 25 May 2022, the model overestimated the occurrence of hail in specific areas, whereas on 2 June 2022, it underestimated hail events in certain regions. Furthermore, the results indicated that the model underestimated hailstone size in both cases. Despite these deviations, verification measures suggested satisfactory results, indicating that the model successfully simulated the conditions for development of convection and the formation of hail.

Keywords: convection, hail, WRF-HAILCAST

Sadržaj

Popis kratica	1
1. Uvod	2
1.1. Konvekcija	2
1.2. Tuča	5
1.3. Istraživanja tuče u Europi i Hrvatskoj	6
1.3.1. Istraživanja tuče u Europi	6
1.3.2. Istraživanja tuče u Hrvatskoj	9
1.4. Munje	10
1.5. Motivacija	11
2. Podaci i metode	13
2.1. Geografski i klimatološki opis domene	13
2.2. Podaci	14
2.2.1. Mjerenja meteoroloških parametara	14
2.2.2. Mjerenja tuče	14
2.2.3. Mjerenja munja	15
2.3. WRF model + HAILCAST	16
2.3.1. Opće karakteristike - set korištenih parametrizacija	16
2.3.2. HAILCAST modul	17
2.3.3. Procjena aktivnosti munja	18
2.4. Korištenje verifikacijskih parametara	19
2.4.1. Set standardnih parametara za meteorološke veličine	19
2.4.2. Način računanja evaluacije za rijetke događaje	20
3. Rezultati	23
3.1. Karakteristike epizoda 25. svibnja 2022. i 2. lipnja 2022.	23
3.1.1. Sinoptička i mezoskalna pozadina 25. svibnja 2022.	23
3.1.2. Sinoptička i mezoskalna pozadina 2. lipnja 2022.	25
3.2. Evaluacija simuliranih meteoroloških uvjeta	27
3.3. Evaluacija konvektivnih osobina – tuča i munje	31
3.3.1. Evaluacija tuče	32
3.3.2. Evaluacija munja	35
4. Zaključak	40
Literatura	42

Popis kratica

CAPE konektivna raspoloživa potencijalna energija, engl. *Convective Available Potential Energy*

Cb Kumulonimbus

CET Srednjeeuropsko vrijeme, engl. *Central European Time*

CEST Srednjeeuropsko ljetno vrijeme, engl. *Central European Summer Time*

CIN konvektivna inhibicija, engl. *Convective Inhibition*

DHMZ Državni hidrometeorološki zavod

EL Ravnotežni nivo, engl. *Equilibrium Level*

ESWD europska baza podataka o opasnim vremenskim pojavama, engl. *European Severe Weather Database*

LCL Nivo kondenzacije, engl. *Lifting Condensation Level*

LFC Nivo slobodne kokvekcije, engl. *Level of free convection*

LINET sustav, engl. *Lightning Network*

LLS Sustav za lociranje munja, engl. *Lightning Location System*

LPI Indeks potencijala za razvoj munja, engl. *Lightning Potential Index*

NCAR Američki nacionalni centar za istraživanje atmosfere, engl. *National Center for Atmospheric Research*

TSII Indeks intenziteta munja engl. *Thunderstorm Intensity Index*

UTC Koordinirano svjetsko vrijeme, engl. *Coordinated Universal Time*

WMO Svjetska meteorološka organizacija, engl. *World Meteorological Organization*

WRF model, engl. *Weather Research and Forecasting*

WRF-ARW, engl. *Weather Research and Forecasting - Advanced Research WRF*

WRF-NMM, engl. *Nonhydrostatic Mesoscale Model*

1. Uvod

1.1. Konvekcija

Konvekcija podrazumijeva složena gibanja unutar fluida koje rezultiraju prijenosom i miješanjem svojstava tog fluida. U kontekstu meteorologije, konvekcija se najčešće odnosi na vertikalni prijenos topline ili vlage u više slojeve troposfere pod utjecajem sile uzgona. Ovakva gibanja igraju bitnu ulogu u općoj cirkulaciji atmosfere – kompleksnom procesu koji nastoji izjednačiti razlike u energiji od ekvatora prema polovima, a samim time omogućava uravnoteženje temperature na Zemlji. Konvekcija se može podijeliti na slobodnu i prisilnu konvekciju. *Slobodna* konvekcija obuhvaća vertikalna gibanja zbog razlika u gustoći zraka, dok je *prisilna* konvekcija uzrokovana vanjskom silom kao što je primjerice planinska prepreka. Također, konvekciju je moguće podijeliti prema dubini i intenzitetu konvektivnih procesa, pa tako postoje suha, plitka i duboka konvekcija. Suha konvekcija odnosi se na gibanja u uvjetima s nedovoljno vlage u zraku pri čemu ne dolazi do ukapljivanja i razvoja oblaka. Vlažna konvekcija podrazumijeva konvekciju kod koje je došlo do zasićenja česti zraka vodenom parom pri čemu dolazi do razvoja oblaka. Ovisno o stabilnosti atmosfere može doći do plitke konvekcije konvekcije te razvoja relativno plitkih *kumulus humilis* ili *kumulus mediokris* oblaka koji ne daju oborinu ili može doći do duboke konvekcije pri čemu se razvijaju oblaci izrazitog vertikalnog razvoja kao što su *kumulus kongestus* i *kumulonimbus*.

Stabilnost atmosfere može se modificirati zagrijavanjem zračne mase od podloge, intenzivnim sunčevim zagrijavanjem ili prisilnim dizanjem zraka (preko planine). Atmosferska stabilnost koja se odnosi na ponašanje česti zraka pri njenom vertikalnom gibanju naziva se statička stabilnost. Statička stabilnost fokusira se na razlike u temperaturi koje podržavaju vertikalno gibanje zraka. Čest koja je adijabatički pomaknuta iz ravnotežnog položaja može se zadržati na novom položaju (neutralna atmosfera), vratiti se u svoj ravnotežni položaj (stabilna atmosfera) ili se može nastaviti gibati vertikalno prema gore (nestabilna atmosfera).

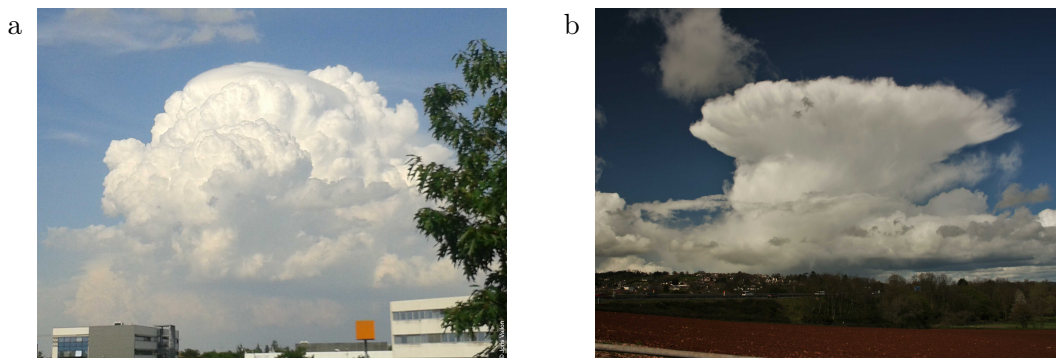
Suha ili nezasićena čest zraka koja se podiže pod utjecajem sile uzgona podvrgnuta je suhoadijabatičkom procesu pri čemu ekspandira te se ohlađuje. Na nekoj visini, čest postane zasićena vodenom parom i kondenzira se, a visina na kojoj se to događa zove se nivo kondenzacije (engl. *Lifting Condensation Level*, LCL). LCL se smatra teorijskom visinom baze oblaka. Prilikom kondenzacije, oslobađa se latentna toplota koja zagrijava čest zraka. Zbog toga se čest iznad ove visine nastavlja dizati po mokroj adijabati po kojoj je stopa ohlađivanja manja nego u slučaju suhe adijabate. Daljnjim dizanjem, čest zraka dosiže nivo slobodne konvekcije (engl. *Level of Free Convection*, LFC), a to je visina na kojoj čest prvi put postaje toplija (rjeđa) od okolnog zraka. Ako je atmosfera dovoljno nestabilna, čest zraka će se nastaviti slobodno dizati iznad LFC-a, bez dodatne prisile. Taj proces onda traje dok se ne dosegne ravnotežni nivo (engl. *Equilibrium Level*, EL), što se definira kao visina na kojoj su temperatura česti i okoline izjednačene. Iznad te visine, čest zraka se može još kratko nastaviti dizati, eventualno zbog akumulirane kinetičke energije vertikalnog gibanja. Na taj način nastaju konvektivni oblaci velikog vertikalnog razvoja – kumulonimbusi.

Kumulonimbus (Cb) je krupni i gusti oblak miješana sastava znatne debljine u obliku planine ili golemih tornjeva. Njegov gornji dio obično je gladak ili vlaknast ili prugast i gotovo uvijek plosnat; širi se u obliku nakovnja ili velike perjanice. Pod

podnicom oblaka, koja je veoma tamna, ima niskih čupavih oblaka (pannus) spojenih s njom u obliku virge (Gelo i sur., 2005). Postoje dvije vrste kumulonimbusa koje razlikuju se prema obliku vrha oblaka: *kumulonimbus calvus* i *kumulonimbus capillatus* (slika 1.1). To je oblak velikog vertikalnog razvoja čija visina varira između 3 i 5 km zimi, dok ljeti može preći i 15 km. Opasne pojave povezane s ovim oblakom uključuju grmljavinu, pljuskove kiše, snijega i tuče kao i jake udare vjetra.

Za inicijaciju duboke vlažne konvekcije (engl. *Deep Moist Convection*, DMC) neophodna su tri sastojka: dovoljno vlage u nižim slojevima troposfere, uvjetna nestabilnost atmosfere i mehanizam dizanja zraka koji mora postojati kako bi zrak dosegao nivo slobodne konvekcije. Uvjetna nestabilnost odnosi se na stopu ohlađivanja česti zraka po vertikali te po iznosu mora biti između suhoadijabatičke i mokroadijabatičke stope ohlađivanja. Na taj se način čest ohlađuje sporije od okolnog zraka. Prisutnost vlage i nestabilnost atmosfere zajedno doprinose formiranju konvektivne raspoložive potencijalne energije (engl. *Convective Available Potential Energy*, CAPE). Na termodijagramu, CAPE se može prepoznati kao područje pozitivnog uzgona, odnosno površina omeđena krivuljama temperature zraka i okoline između LFC-a i EL-a. Visoka vrijednost CAPE-a predstavlja vrlo nestabilnu atmosferu s potencijalom za stvaranje snažnih uzlaznih struja u konvektivnom oblaku.

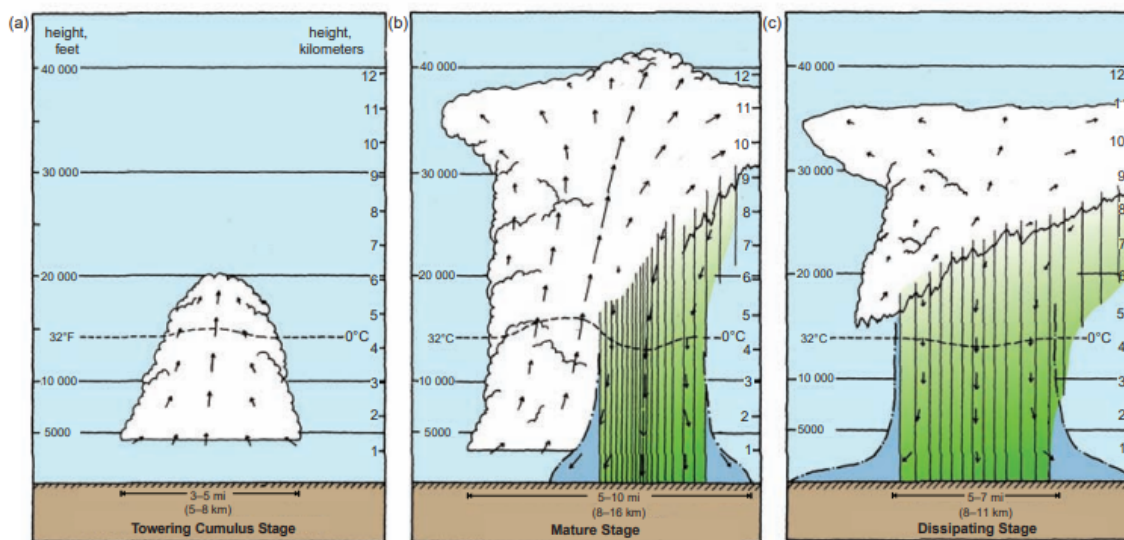
Još jedna važna metrika podrazumijeva konvektivnu inhibiciju (engl. *Convective Inhibition*, CIN) koja se opisuje kao potencijalna energija po jedinici mase koja se mora nadvladati kako bi se čest zraka podigla s razine z_0 do LFC-a. Za razinu z_0 ponekad se uzima Zemljina površina, a nekad LCL (Houze, 2014). Varijabla CIN je važan čimbenik kod promatranja rasprostranjenosti konvekcije jer iznos CIN-a određuje hoće li konvekcija biti izolirana (umjereni do veliki CIN) ili raširena na većem području (mali ili čak nepostojeći CIN).



Slika 1.1. Vrste oblaka kumulonimbus: (a) *kumulonimbus calvus* i (b) *kumulonimbus capillatus*. Izvor: Atlas oblaka Svjetske meteorološke organizacije (<https://cloudatlas.wmo.int/en/home.html>)

Grmljavinska ćelija odnosno Cb - je osnovna strukturalna jedinica konvektivnih oblaka i predstavlja kompaktno područje relativno jakog uzlaznog strujanja koje se kroz određeno vremensko razdoblje širi od nižih na srednje i više slojeve atmosfere (Počakal, 2012). Životni vijek tih oblaka prikazan je na slici 1.2, a započinje stadijem kumulusa. U toj fazi postoji samo uzlazna struja unutar oblaka te se čest zraka počinje naglo dizati nakon što je prešla LFC. Slijedi zrela faza koja započinje stvaranjem čestica oborine dovoljno velikih da padaju kroz uzlaznu struju. Povezano opterećenje hidrometeorima

smanjuje uzgon uzlaznog strujanja te ga na taj način 'guši'. Oborina i naknadno isparavanje oborine na rubovima oblaka i ispod baze pojačavaju silaznu struju koja se širi bočno pri dolasku na površinu, a prednji rub te silazne struje označava frontu udara vjetra (engl. *gust front*). Kada silazna struja postane prevladavajuća unutar oblaka i čest dosegne EL, tada oblak ulazi u stadij disipacije (Markowski i Richardson, 2010). U ovom stadiju, zrak više nije u mogućnosti uzlazno napredovati, što se obično događa blizu visine tropopauze.



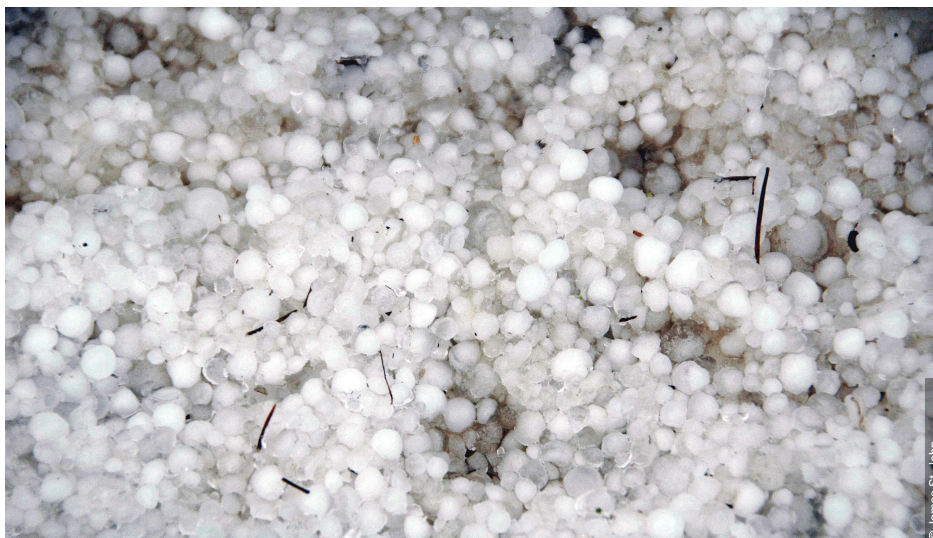
Slika 1.2. Faze razvoja kumulonimbusa (Markowski i Richardson, 2010).

Konvektivne oluje mogu poprimiti različite oblike organizacije. Kreću se u rasponu od izolirane grmljavinske oluje koja uključuje jedan konvektivni oblak (ili ćeliju) do mezoskalnih konvektivnih kompleksa koji se sastoje od više multićelijskih oluja (Holton, 2004). Tri osnovna tipa dijele se na jednoćelijski, multićelijski i superćelijski konvektivni sustav. CAPE pokazuje jesu li termodinamički uvjeti povoljni za razvoj konvekcije, ali ne govori ništa o tipu organizacije oluje. Organizacija konvektivnih oluja ovisi o vertikalnom smicanju vjetra. Jednoćelijski kumulonimbusi javljaju se kada je vertikalno smicanje vjetra (engl. *wind shear*) relativno slabo ($<10 \text{ m s}^{-1}$ u donja 4 km troposfere). Njihov životni vijek je kratak (30 min – 1 h), a zbog slabe organizacije fronta udara vjetra ne može inicirati stvaranje novih ćelija. Slabo vertikalno smicanje vjetra kod jednoćelijske konvekcije obično podrazumijeva slabo forsiranje na sinoptičkoj skali. Drugim riječima, razvoj atmosferskih profila koji podržavaju jednoćelijsku konvekciju uglavnom ovisi o dnevnom hodu graničnog sloja. Zato se jednoćelijski razvoj javlja u vrijeme ili malo nakon maksimuma dnevnog zagrijavanja (kada je CIN najmanji, a CAPE najveći) i obično se brzo raspada nakon zalaska sunca (Markowski i Richardson, 2010). Multićelijske oluje karakterizira umjereno smicanje vjetra ($10 - 20 \text{ m s}^{-1}$ u donja 4 km troposfere) te predstavljaju više ćelija u različitim fazama razvoja. Pojedina ćelija živi 30 min – 1 h, ali cijeli sustav može trajati znatno duže zbog stalnog nastajanja novih ćelija duž fronte udara vjetra gdje je prisila dovoljno jaka da podigne zrak do razine slobodne konvekcije. Superćelija je izuzetno razvijen kumulonimbus koji se sastoji od jedne ćelije u kojoj uzlazna struja rotira brzinom i do 50 m s^{-1} . To je potencijalno najopasniji tip konvektivne oluje koja donosi snažan vjetar, veliku tuču, obilne pljuskove koji mogu izazvati poplave, česte udare groma i tornada. Superćelije

su obično dugotrajne te mogu trajati čak više od 6 sati.

1.2. Tuča

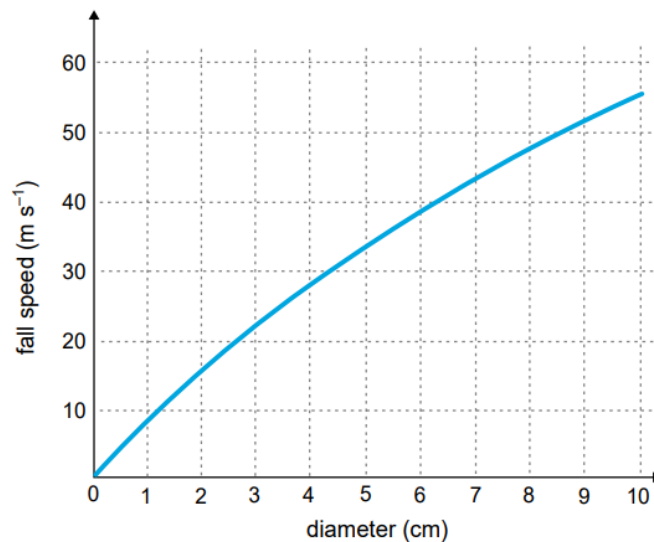
Tuča se definira kao oborina sastavljena od, bilo prozirnih, bilo djelomično ili potpuno neprozirnih čestica leda (zrna tuče), obično kuglasta, stožasta ili nepravilna oblika, promjera većeg od 5 mm (WMO, 2012). Opaža se tijekom jakih grmljavinskih oluja te uvijek pada u obliku pljuskova. Često se, pri naizmjeničnom otapanju i smrzavanju, pojedinačna zrna sljepljuju u veće gromade leda. Masa tih zrna ili gromada daje im pri padu znatnu kinetičku energiju, pa šteta od udara može biti velika (Gelo i sur., 2005). Tuča se najčešće javlja u okviru organiziranih konvektivnih sustava, kao što su višćelijski kumulonimbusi, superćelije ili mezoskalni konvektivni sustavi. Međutim, važno je napomenuti da tuča može nastati i unutar jednoćelijskog kumulonimbusa, ali u takvim olujama ne može znatno narasti zbog njihovog kratkog vremenskog trajanja. Velika tuča, čiji promjer prelazi 5 cm, gotovo je uvijek povezana s pojavom superćelija (Nelson i Young, 1979).



Slika 1.3. Tuča. Izvor: Atlas oblaka Svjetske meteorološke organizacije (<https://cloudatlas.wmo.int/en/home.html>).

Rast tuče ovisi o složenim interakcijama, unutar dubokog konvektivnog oblaka između strujanja i čestica oborine (Markowski i Richardson, 2010). Za nastanak tuče su potrebne ledene jezgre (tzv. embriji) koje se pri niskim temperaturama u kontaktu s molekulama vodene pare oblažu vrlo tankim slojem leda (Gelo i sur., 2005). Međutim, većina hidrometeora u uzlaznoj struji postoji u obliku prehladnih kapljica. Prehladne kapljice podrazumijevaju kapljice u tekućem agregatnom stanju na temperaturama nižim od 0 °C (u tom stanju mogu postojati i na temperaturama do -40 °C). Kada prehladne kapljice dođu u kontakt s embrijima, one se na njima smrzavaju. Smrzavanje se može odvijati postepeno ili naglo. Postupnim smrzavanjem prehladnih kapljica na ledenim jezgrama stvara se proziran sloj leda jer se kapljica razlije po embriju i hladi se relativno sporo. Ovaj proces naziva se vlažan rast tuče. Suprotno tome, postoji i suhi rast tuče, kada je smrzavanje trenutačno jer je okolni zrak znatno hladniji od samog embrija. Tada je novonastali sloj leda neproziran, budući da između nastalih zrnaca

leda ostaju zarobljeni mjehurići zraka. Zona unutar koje je rast tuče najznačajniji nalazi se unutar oblaka u temperaturnom rasponu između -10 °C i -25 °C (npr. Knight i sur., 1981, Foote, 1984). Osim s prehladnim kapljicama, zrna tuče unutar oblaka mogu se sudarati i s ostalim zrnima tuče nošenim strujanjem unutar oblaka. U trenutku kada zrna postanu dovoljno krupna/teška da nadvladaju uzlaznu struju, ispadaju iz oblaka i dopiru do tla kao tuča ili se putem djelomično ili potpuno rastope. Brojna istraživanja ukazala su da postoji empirijski odnos između brzine pada i veličine tuče (Pruppacher i Klett, 1997). Osim o dijametru zrna tuče, brzina pada ovisi i o još nekim parametrima kao što su gustoća leda i zraka te o njezinom obliku i hrapavosti. Jedna takva empirička ovisnost odnosi se na čestice veličina $0.1 - 8\text{ cm}$ i gustoću zraka od $\approx 1\text{ kg m}^{-3}$ i glasi: $v_t \approx 9D^{0.8}$, gdje se v_t odnosi na brzinu pada, a D na promjer zrna tuče. Ova ovisnost prikazana je na slici 1.4. Naravno, veće zrno tuče podrazumijeva i veću brzinu pada. Velike brzine pada zrna tuče impliciraju da unutar oblaka moraju postojati vrlo snažne uzlazne struje kako bi se omogućio rast tako velikih čestica.



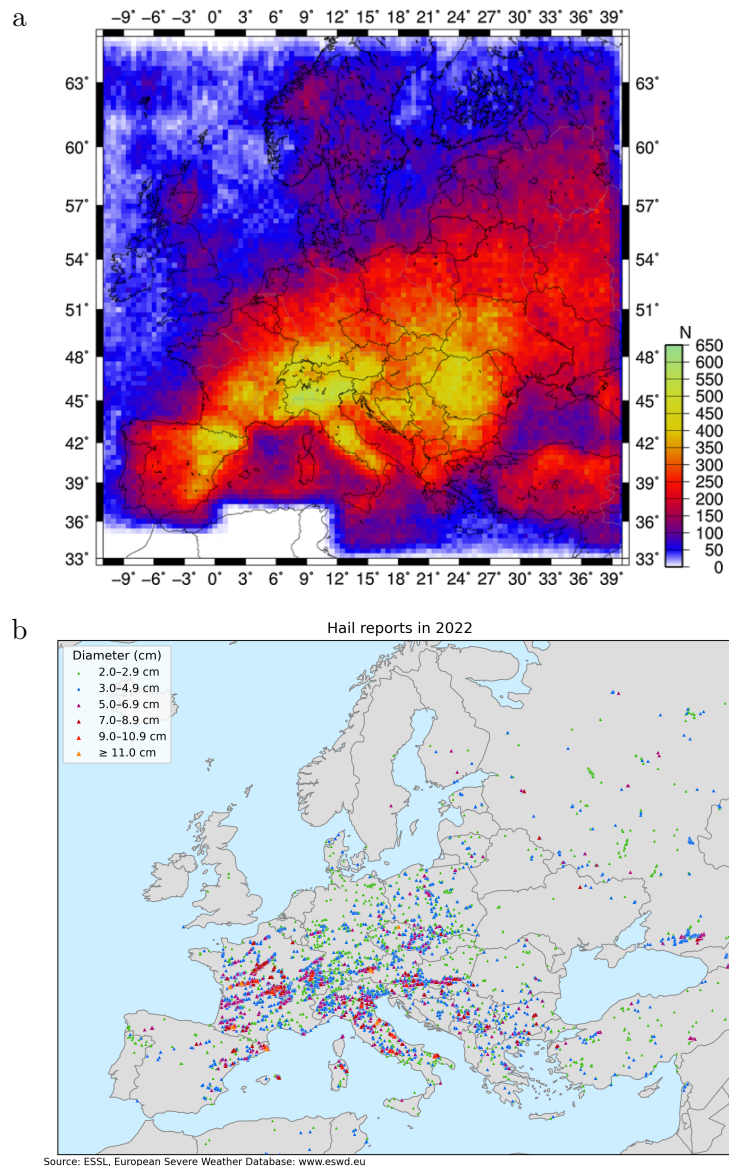
Slika 1.4. Ovisnost brzine pada zrna tuče o dijametru pod pretpostavkom da vrijedi relacija $v_t = 9D^{0.8}$ (Markowski i Richardson, 2010).

1.3. Istraživanja tuče u Europi i Hrvatskoj

1.3.1. Istraživanja tuče u Europi

U sklopu dubokih konvektivnih sustava, tuča se pojavljuje u mnogim dijelovima svijeta. Tuča može biti izuzetan ekonomski problem s obzirom da često nanosi veliku štetu na građevinama, automobilima ili u poljoprivredi (Počakal, 2012). Šteta koju uzrokuje jedna epizoda tuče u Europi ili SAD-u može premašiti i milijardu dolara (Púčik i sur., 2019). U nekim regijama, tuča je relativno detaljno proučavana, međutim, čak i u najbolje proučavanim područjima, podaci su često nepotpuni i ne zadovoljavaju sve potrebe istraživanja. Konkretno, diljem Europe nedostaje vremenski i prostorno homogenih zapisa pojave tuče (Púčik i sur., 2019). Dodatna poteškoća je i činjenica da je tuča (pogotovo velika tuča) relativno rijedak događaj pa je svaka zabilježena pojava tuče izuzetno vrijedna za provođenje statističkih analiza u izradi klimatoloških obilježja tuče. Pouzdane klimatološke analize podataka o tuči trebale bi sadržavati

informacije o veličini i učestalosti tuče, kao i podatke o intenzitetu i frekvenciji oluja, radiosondažama i ostalim bitnim faktorima povezanim s pojavom tuče.

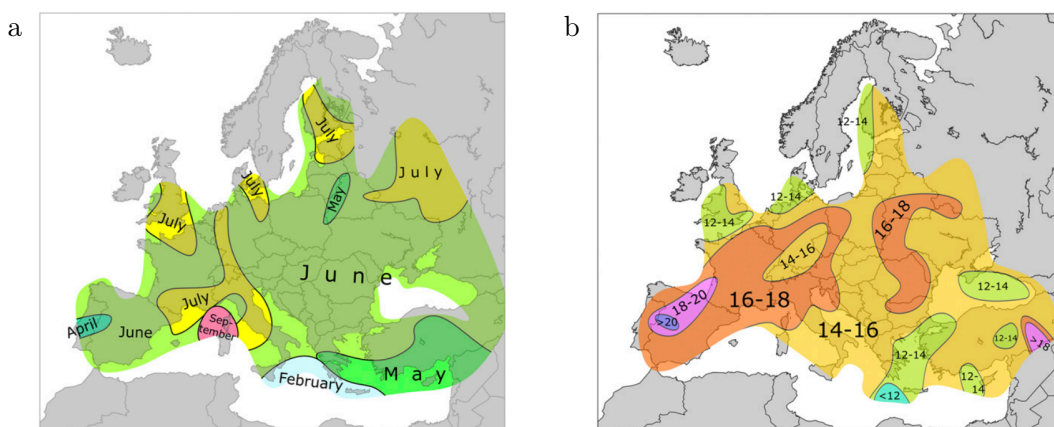


Slika 1.5. Prostorna raspodjela (a) pojave tuče u Europi u mreži točaka $0.5^\circ \times 0.3^\circ$ (Punge i Kunz, 2016) i (b) pojave velike tuče prijavljene u bazi podataka ESWD za 2022. godinu.

Dostupni su različiti izvori informacija o tuči. Prvenstveno su tu mjerenja i opažanja na meteorološkim postajama koja obavljaju stručni ljudi - motritelji. Nadalje, postoje i mreže tučomjernih postaja postavljenih diljem Europe s naglaskom na područja koja su sklonija pojavi tuče: dijelovi Francuske, sjeverna Italija, istočna Austrija, dijelovi Španjolske, Grčka i Hrvatska (Punge i Kunz, 2016). Međutim, gustoća tih mreža i dalje je nedovoljna da se precizno evidentira svaka lokalna pojava tuče. Osim toga, u novije vrijeme prikupilo se mnogo podataka dojavom građana, opažanjima školovanih promatrača oluja ili putem medija. Tako je u Europi 2006. godine uspostavljena otvorena baza podataka (engl. *European Severe Weather Database*, ESWD) (Dotzek i sur., 2009) koju održava znanstvena organizacija ESSL (engl. *European Severe Storms Laboratory*, ESSL). U ESWD-u su sadržane informacije o pljuskovima, velikoj tuči,

snažnim udarima vjetra, tornadima i drugim opasnim meteorološkim pojavama povezanim s konvekcijom.

Još jedan način na koji se može procijeniti pojava tuče je pomoću instrumenata za daljinsko mjerenje kao što su radari i sateliti. Suvremeni meteorološki radari, odnosno dvostruko polarizirani Doppler radari, pružaju kontinuirane informacije o raznim meteorološkim pojavama na širokom području. Oni istovremeno odašilju i primaju elektromagnetske valove u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini. Ovakvi radari omogućuju da, između ostalih korisnih informacija, identificiraju vrstu i dimenzije hidrometeora (kao što su kiša, snijeg, susnježica i tuča). Unatoč tome, precizan izračun kinetičke energije zrna tuče iz radarskih mjerenja i dalje predstavlja problem, pa se za točnije rezultate ipak preporučuje kombiniranje radarskih mjerenja s opažanjima. (Púčík i sur., 2019). Putem satelitskih mjerenja temeljenih na temperaturi vrhova oblaka, moguće je identificirati specifične pojave na vrhovima konvektivnih oblaka, kao što su prebacujući vrhovi (engl. *Overshooting Tops*, OT), hladni prsten (engl. *cold ring*) ili hladno U/V (engl. *cold U/V*). Mnoga istraživanja (npr. Mikuš Jurković, 2017.) pokazuju da konvektivne oluje s ovakvim strukturama često izazivaju opasne vremenske uvjete na površini, uključujući pojavu tuče.



Slika 1.6. (a) Mjeseci i (b) sati u kojima je najčešće zabilježena pojava velike tuče (> 2 cm). (Púčík i sur., 2019).

Slika 1.5a prikazuje prostornu raspodjelu događaja tuče diljem Europe, dok se slika 1.5b odnosi samo na slučajeve koji su prijavljeni Europskoj bazi ESWD za 2022. godinu. Slika 1.5b osim prostorne raspodjele, također prikazuje i veličinu zrna tuče. Pojava tuče prisutna je gotovo u svim dijelovima Europe, no neka područja se ističu – posebno ona između 40°N i 50°N geografske širine. Najveći broj događaja s tučom zabilježen je na sjeveru Italije, a slijede Švicarska, dijelovi Francuske, sjeveroistočna Španjolska, središnja Italija, Austrija, Slovenija, dijelovi Hrvatske, Bosne i Hercegovine, Rumunjske i Bugarske. Svim je ovim područjima zajednička prisutnost planina, a to su Alpe, Središnji masiv, Pirineji, Apenini, Dinaridi i Karpati, gdje je pojava tuče češća budući da takva orografija podržava razvoj konvektivnih oblaka koji proizvode tuču. Sličan uzorak prostorne raspodjele velike tuče vidljiv je i na slici 1.5b te je također vidljivo da je na spomenutim planinskim područjima zabilježeno najviše slučajeva kada je zrno tuče bilo veće i od 5 cm.

Godišnji hod tuče (slika 1.6) pokazuje da je nad većim dijelom kontinenta najčešća tijekom ljeta, posebno u lipnju, a zatim i u srpnju. Međutim, neka područja tuču

najčešće imaju u proljeće ili zimu pa je tako najveći broj događaja s tučom na jugu Grčke, na Cipru i južnoj Turskoj zabilježen u svibnju. Također, na južnim dijelovima Italije, obalama Jonskog mora i na Kreti tuča je najčešća u veljači. Dodatno, pojava tuče generalno je najčešća tijekom poslijepodnevnih sati, uglavnom između 14 i 18 sati, uzimajući u obzir lokalno vrijeme (Púčik i sur., 2019).

Rädler i sur. (2019) istraživali se učestalost snažnih konvektivnih oluja koje donose munje, tuču i snažne udare vjetra u dva klimatska scenarija (RCP4.5 i RCP8.4¹) u Europi. Njihovi rezultati ukazuju na potencijalno povećanje učestalosti ovih opasnih vremenskih pojava do kraja stoljeća. Autori su utvrdili da će konvektivna nestabilnost rasti zbog povećane vlage u donjim slojevima atmosfere, te iako očekuju blagi pad učestalosti oluja na jugozapadu i jugoistoku Europe, vjerojatnost pojave ozbiljnih vremenskih događaja povećat će se diljem Europe, posebice u slučaju vrlo velike tuče (dijametra ≥ 5 cm). Takva tuča, koja može nanijeti značajne štete usjevima, vozilima i krovovima kuća, postat će sve češća u većini europskih regija, s posebnim naglaskom na središnjoj i sjeveroistočnoj Europi prema RCP8.5 scenariju.

1.3.2. Istraživanja tuče u Hrvatskoj

Konvektivna aktivnost u Hrvatskoj, a posljedično i pojava tuče, vrlo je prostorno i vremenski promjenjiva te je stoga vrlo teško konzistentno voditi evidenciju o pojavi tuče i svim njenim obilježjima. U Hrvatskoj se tuča opaža na standardnim meteorološkim postajama, međutim, mnoge postaje raspolažu samo s podacima o vremenu i broju dana s tučom unutar mjeseca ili godine. S druge strane, podaci o veličini zrna tuče često se daju opisno, usporedbom tuče s graškom, orahom, lješnjakom, teniskom lopticom ili dimenzijama nekih drugih poznatih predmeta (Počakal, 2012).

Kontinentalna regija Hrvatske većinom je nizinska, uz iznimku od nekoliko izoliranih planina. Mikuš i sur. (2012) pokazali su da je na ovom području maksimum konvektivne aktivnosti u lipnju kada je nestabilnost atmosfere najveća, a tada je zabilježena i najveća mjesečna vrijednost srednje kinetičke energije tuče koja iznosi $45,7 \text{ J m}^{-2}$ (Počakal, 2012). Za sjeverozapadnu regiju kontinentalne Hrvatske, dostupno je mnogo informacija o pojavi tuče, a posljedično je napravljeno i mnogo analiza tih podataka. Zbog učestalosti tuče na području Hrvatskog zagorja, 2002. godine je postavljena gusta mreža tučomjera (njih 730) na specijalno dizajniranom poligonu u blizini planine Ivanšćice. Istraživanje koje je proveo Počakal (2012) na podacima s lansirnih postaja u kontinentalnom dijelu Hrvatske pokazalo je da je u razdoblju od 2002. do 2009. godine došlo do povećanja srednjeg broja dana s grmljavinom (81) i tučom (41), u odnosu na prethodnih 20 godina (1981. – 2001.) kada je zabilježeno 76 dana s grmljavinom i 41 dan s tučom. Autor je također pokazao da je porastao intenzitet grmljavinskih oluja što se odrazilo na pozitivnom trendu udjela zrna tuče većeg promjera (10.1 – 15 mm) i negativnom trendu udjela zrna tuče manjeg promjera (5 – 7.5 mm). Prosječna dužina padanja tuče za razdoblje od 1981. do 2009. pokazuje uzlazan trend, od 3,5 min (1981.) do 4,7 min (2009.), dok je prosječna duljina padanja za to razdoblje iznosila 4,2 min. Sličan trend povećanja trajanja padanja tuče, pokazuje analiza na postavljenom

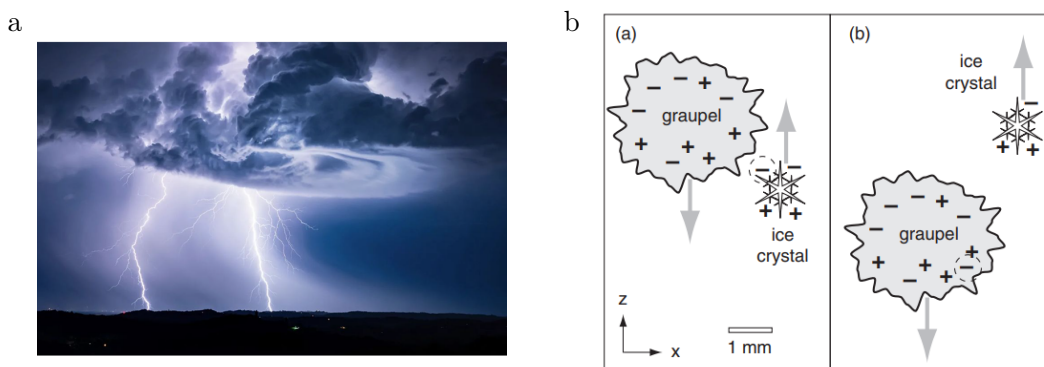
¹RCP4.5 i RCP8.5 (engl. *Representative Concentration Pathway*) odnose se na trajektorije koncentracije stakleničkih plinova. RCP4.5 je tzv. umjereni scenarij u kojem emisije stakleničkih plinova dosežu vrhunac 2040. godine i onda se smanjuju. RCP8.5 odnosi se na scenarij u kojem se do kraja 21. stoljeća emisije nastavljaju povećavati.

poligonu u Hrvatskom zagorju, kada je prosječna duljina padanja bila 6,5 min, što je još jedan pokazatelj povećanja intenziteta grmljavinskih oluja.

Počakal i sur. (2018) analizirali su podatke o tuči za razdoblje od 2002. do 2017. godine, na sjeverozapadnom dijelu Hrvatske, uz hipotezu da orografija ima utjecaj na distribuciju tuče. Fokus je bio na području između tri gore: Ivanščice na sjeveru, Kalnika na sjeveroistoku te Medvednice na jugu. Pomoću podataka o tuči i grmljavini, autori su pokazali kako navedena niska gorja imaju utjecaj na gibanje i intenzitet ćelija konvektivnih oblaka, a samim time i na raspodjelu tuče na tučomjernim postajama.

1.4. Munje

Munja je kratkotrajno električno izbijanje u atmosferi, koje se stvara pri velikoj razlici napona nastaloj zbog prostornog odvajanja pozitivnih i negativnih iona. Nastaje u oblaku kumulonimbusu te postoje munje unutar jednog oblaka, između susjednih oblaka, iz oblaka u zrak (rijetko), a najbolje je proučeno električno izbijanje između oblaka i tla. Električni napon je od $50 \cdot 10^3$ do $40 \cdot 10^6$ V, a jačina struje može biti između 10 i 100 kA. Najveći dio energije izbijanja pretvara se u toplinu, kada u kanalu kojim teče izbijanje temperatura može dosegnuti i 30 000 K. Manji dijelovi energije odlaze na zvuk, svjetlost i druge oblike elektromagnetskog zračenja (Gelo i sur., 2005).



Slika 1.7. (a) Munje nad sjevernom Hrvatskom. Izvor: <https://www.instagram.com/bruno.fantulin/>. (b) Prijenos elektrona s ledenih kristalića na zrna solike sudarima (Stull, 2015)

Općenito prihvaćen koncept za razvoj dipola nabijenih čestica u grmljavinskom oblaku je fizičko razdvajanje različito nabijenih čestica u oblaku. Veće čestice oblaka padaju pod utjecajem gravitacije, dok se manje čestice prenose uzlaznom strujom - ako te čestice nose pozitivne i negativne naboje doći će do stvaranja električnog dipola. (Saunders, 2008). Ovi se uvjeti mogu ostvariti u kumulonimbusu na visinama gdje je temperatura između $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Detalji o formiranju naboja još uvijek nisu u potpunosti jasni, ali jedna teorija sugerira da se aktivno razdvajanje naboja događa za vrijeme života konvektivnog oblaka kada dominira proces rasta solike priraščivanjem prehladnih kapljica na njih (Reynolds, 1992). Istovremeno, ledene jezgre omogućuju rast ledenih kristalića direktnom depozicijom vodene pare. Raspodjela molekula vode na navedena dva tipa površine je drugačija, uzrokujući pritom drugačiju raspodjelu naboja na površini (Stull, 2015). Ako jedan od malih ledenih kristalića (koji se diže u uzlaznoj struji) udari u veće zrno solike (koje pada u odnosu na uzlaznu struju) dolazi do prijenosa elektrona iz malog ledenog kristala (koji potom postane pozitivno

nabijen) na veće zrno solike (tako da on postane negativno nabijen). Na taj način gornji dio oblaka postaje pozitivno nabijen, a donji uglavnom negativno nabijen (slika 1.7b). Kako se naboji nastavljaju akumulirati na vrhu i dnu oblaka, tako raste električno polje između oblaka i tla te između oblaka i nakovnja. U trenutku kada nastupi kritična razlika naboja, dolazi do električnog pražnjenja (izbijanja) koje se naziva munja.

1.5. Motivacija

Prognoza konvekcije općenito je vrlo zahtjevan zadatak, no grmljavinska nevremena koja sadrže tuču predstavljaju poseban izazov, često i lokalnu nepredvidljivost. Tuča, kao lokalna pojava, obično traje svega nekoliko minuta, ali njezine posljedice mogu biti znatne i nanijeti veliku materijalnu štetu. Zahvaljujući dostupnosti interneta i različitih oblika medija, posljednjih godina postoji sve veća količina neovisnih izvještaja o tuči što omogućava bolje razumijevanje njezine prostorne raspodjele i utjecaja na razne aspekte društva.



Slika 1.8. Tuča i načinjena šteta 25. svibnja i 2. lipnja 2022. godine. Izvor: novinski članci.²

²<https://www.zagorje-international.hr/2022/05/25/tuca-kakva-se-ne-pamti-nema-kuce-i-staklenika-koji-nisu-ostecen-i-usjeva-koji-nije-unisten/>,
<https://sjever.hr/2022/05/25/tuca-unistila-cvjecarski-kraj-nema-objekta-u-velikom-bukovcu-koji-nije-ostecen-pogledajte-fotografije-unistenih-plastenika-ostecenih-kuca/>,
<https://www.klanjec.hr/o-nama/fotogalerija/nggallery/klanjec/katastrofalna-tuca-2-lipnja-2022>

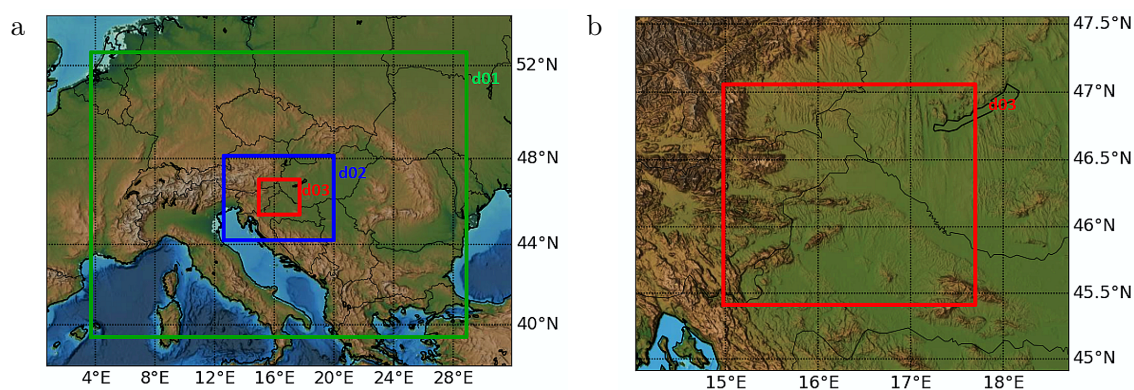
Na temelju novinskih članaka, koji opisuju posljedice dviju vrlo bliskih epizoda tuče, prikupljene su informacije o šteti koju je tuča uzrokovala na području sjeverozapadne Hrvatske. Riječ je o slučajevima 25. svibnja i 2. lipnja 2022. godine, dakle, epizode su se dogodile u razmaku od svega šest dana. Analizom priloženih fotografija i videa, vidljive su ozbiljne štete koje je tuča prouzrokovala. Dana 25. svibnja 2022. prijavljena su zrna tuče od veličine lješnjaka do veličine teniske loptice, a u nekim je dijelovima Varaždinske županije zabilježeno trajanje padanja tuče od 15 min (slike 1.8a-c). S druge strane, 2. lipnja 2022. je sloj napadale tuče u nekim mjestima bio do 10 cm, dok je u pojedinim mjestima bilo nanosa tuče i do 70 cm (slika 1.8d). Zbog toga su brojne ceste bila zatvorene, a mnoga vozila ostala zaglavljena. Epizodama tuče su najviše bili pogođeni poljoprivrednici, čiji su usjevi, vinogradi, voćnjaci, plastenici i staklenici pretrpjeli ozbiljne materijalne štete u iznosima od 40 % do 100 %. Također, oštećeni su brojni automobili, a kućanstva su najveću štetu pretrpjela na krovovima i prozorima. Na području Varaždinske i Međimurske županije proglašena je prirodna nepogoda od tuče.

Istraživanja ukazuju na porast intenziteta grmljavinskih oluja (npr. Počakal, 2012; Rädler i sur., 2019), a snažne i organizirane oluje često su povezane s pojavom tuče. Stoga je izuzetno važno podići svijest i interes za oluje praćene tučom, te detaljnije proučiti obilježja ovog fenomena. S obzirom na dostupnost algoritma za simulaciju tuče pod nazivom HAILCAST (Adams-Selin i Ziegler, 2016), za spomenute epizode tuče dana 25. svibnja i 2. lipnja 2022. godine, u ovom je radu provedena numerička simulacija korištenjem WRF (engl. Weather Research and Forecasting) modela. Rezultati tih simulacija usporedili su se s postojećim mjerenjima i opažanjima koja su prikupljena iz raznih izvora, sa svrhom poboljšanja numeričke prognoze tuče.

2. Podaci i metode

2.1. Geografski i klimatološki opis domene

Hrvatska se nalazi na sjevernoj hemisferi između $42^{\circ} 23'$ i $46^{\circ} 33'$ sjeverne geografske širine, te $13^{\circ} 30'$ i $19^{\circ} 27'$ istočne geografske dužine, a kopnena površina joj iznosi 56694 km^2 . Pripada srednjeeuropskim zemljama, a obilježena je svojim vrlo nepravilnim oblikom i velikom reljefnom raznolikošću. Geografski, Hrvatska se može podijeliti na tri glavne cjeline: relativno niski panonsko-peripanonski prostor kojem pripada 55 % teritorija, primorska ili jadranska regija koja obuhvaća 31 % prostora, dok preostalih 14 % prostora čini planinsko ili dinarsko područje. Planinska regija predstavlja prirodnu granicu između nizinske cjeline koja obuhvaća sjevernu i istočnu Hrvatsku te priobalnog pojasa koji se proteže uz Jadransko more.



Slika 2.1. Područje istraživanja obuhvaćeno numeričkim simulacijama modelom WRF u kojima se provodila analiza ekstremnih događaja tuče. (a) Ugniježdene domene označene su zelenim (d01), plavim (d02) i crvenim (d03) pravokutnikom s mrežnim koracima od 9, 3 i 1 km. (b) Domena od najvećeg interesa (d03).

U ovom radu, područje od najvećeg interesa obuhvaća istočnu Sloveniju, sjeverni dio Hrvatske, te jugozapadnu Mađarsku (prikazano crvenim pravokutnikom d03 na slici 2.1). Ovi prostori dijele slična geografska obilježja s obzirom na klimu, reljef i vegetaciju. Budući da se nalaze na rubu Panonske nizine, pripadaju peripanonskom prostoru koji za razliku od panonskog, ima više brežuljkastog reljefa. Istočna Slovenija pretežno je nizinska, izuzev planine Pohorje koja se nalazi južno od Drave i sjeveroistočno od Maribora, a proteže se uz granicu s Austrijom. Na sjevernom dijelu Pohorja nalaze se visoki planinski vrhovi, od kojih je najviši Črni vrh (1543 m), a na jugu brežuljkasta i šumska područja. Reljef sjeverne Hrvatske čine raznovrsni oblici terena koji se izmjenjuju – brežuljkasti predjeli i nizinska područja obično povezana rijekama. Prevladavaju relativno niska gorja od kojih Medvednica, Ivanščica i Žumberačka gora jedine premašuju 1000 m nadmorske visine. Osim gorja, područje Hrvatskog zagorja i Međimurja karakteriziraju i niža brda između kojih se protežu doline potoka i manjih rijeka, koje se potom ulijevaju u veće rijeke kao što su Sava, Drava ili Bednja. Južni dio regije pretežno je nizinski te obuhvaća doline mnogih rijeka (Kupa, Korana, Mrežnica, Dobra). Prema istoku, teren ulazeći u Slavoniju postaje ravničarski te se dalje proteže u Panonsku nizinu.

Klimu u Hrvatskoj oblikuje njezin položaj u umjerenim geografskim širinama sje-

verne polutke zajedno s utjecajem vremenskih procesa srednjih i velikih razmjera. Prema Köppenovoj klasifikaciji klime koja se definira prema srednjem godišnjem hodu temperature zraka i količine oborina, gotovo cijela Hrvatska ima umjereno toplu kišnu klimu. To znači da su uglavnom srednje mjesečne temperature najhladnijeg mjeseca između $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, izuzev najviših planinskih područja koja pripadaju snježnošumskoj klimi. Područje od interesa pripada kontinentalnom klimatskom području i cijele se godine nalazi u cirkulacijskom pojasu umjerenih širina, gdje je stanje atmosfere vrlo promjenjivo. Označava ga raznolikost vremenskih situacija uz česte i intenzivne promjene tijekom godine koje izazivaju putujući barički sustavi³. Osim toga, klima kontinentalne Hrvatske lokalno može biti modificirana orografijom, odnosno oblikom, nadmorskom visinom i položajem brda i planina. Primjer toga je pojačavanje kratkotrajne jake oborine na navjetrinskoj strani prepreke ili smanjena količina oborina u zavjetrini.

Tijekom hladnijeg dijela godine, u kontinentalnom dijelu Hrvatske izmjenjuju se razdoblja stabilnog anticiklonalnog vremena, ali i kišovitih dana budući da ciklone često prolaze našim krajevima. Anticiklonalno vrijeme u ranoj jeseni praćeno je toplim i sunčanim danima i svježim noćima, dok je u kasnoj jeseni te ranoj zimi obilježeno hladnim i tmurnim vremenom uz čestu pojavu magle, posebno u ravninama.

Što se tiče toplog dijela godine, proljeće je vrlo promjenjivo i često se javljaju nagle promjene vremena zbog brzih prolazaka ciklona i dolina nad ovim područjima. Zato se izmjenjuju topliji i hladniji dani te oborinska i neoborinska razdoblja. Ljeti stabilno vrijeme poremeti dolazak hladnih fronti koje donose vlažan i nestabilan zrak te uzrokuju grmljavinske oluje. Ovi uvjeti obično traju dan ili dva nakon prodora hladnog zraka, prije nego se atmosfera ponovo stabilizira.

2.2. Podaci

2.2.1. Mjerenja meteoroloških parametara

U ovom radu korištena su prizemna meteorološka motrenja s 11 glavnih postaja Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ): postaja Bilogora, Bjelovar, Daruvar, Karlovac, Krapina, Križevci, Puntijarka, Sisak, Varaždin, Zagreb – Grič i Zagreb – Maksimir. Na navedenim postajama prikupljeni su podaci o satnim vrijednostima temperature zraka, relativne vlage i tlaka zraka. Također, korištene su i terminske vrijednosti brzine i smjera vjetra s automatskog sustava. Izmjerene vrijednosti zapisane su po srednjeeuropskom vremenu (engl. *Central European Time*, CET) koje su za potrebe usporedbe s modelom prebačene u koordinirano svjetsko vrijeme (engl. *Coordinated Universal Time*, UTC), odnosno pomaknute za 1 sat (CET = UTC + 1 h). Osim toga, koristila su se i radiosondažna mjerenja s glavne postaje Zagreb – Maksimir (preuzeta sa stranice : <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

2.2.2. Mjerenja tuče

Podaci o tuči prikupljeni su iz nekoliko izvora. Za datume od interesa dobiveni su podaci o postajama koje su zabilježile pojavu tuče iz DHMZ-ove mreže prizemnih postaja. Te postaje uključuju glavne meteorološke postaje (GMP), klimatološke meteorološke postaje (KMP) i kišomjerne postaje (KŠP). Poznate su samo lokacije na kojima je

³Izvor: DHMZ, https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska¶m=k1

zabilježena tuča, dok vrijeme pojave, trajanje te veličina zrna tuče nisu bili dostupni. Nadalje, dostupne su arhivske radarske slike DHMZ-a, s Radarskog centra Bilogora gdje se nalazi dvojno polarizirani Doppler radar. Optimalan domet mu je 240 km, a obuhvaća cijelu kontinentalnu Hrvatsku, te dijelove susjednih zemalja. Radarske slike mogu poslužiti za kvalitativnu analizu podataka budući da radarski odraz veći od 35 dBz-a može ukazivati na konvektivnu naoblaku.

Tablica 2.1. Izvori podataka o tuči. Prvi stupac odnosi se na organizaciju koja je ustupila podatke. Drugi stupac sadrži informaciju o tome gdje je podatak prikupljen: GMP označava glavne meteorološke postaje, KMP predstavlja klimatološke meteorološke postaje, dok se KŠP odnosi na kišomjerne postaje. Zadnji stupac sadrži vrstu informacije dobivenu iz pojedinog izvora.

Organizacija	Izvor	Vrsta informacije
DHMZ	GMP KMP KŠP	Lokacija unutar 24 h
	Radar	Kvalitativna procjena
ESSL	ESWD	Lokacija i vrijeme pojave Promjer zrna tuče Šteta

Korišteni su i podaci iz ESWD-a za tuču koja je opažena na području cijele domene (<https://www.essl.org/cms/european-severe-weather-database/>), a ne samo u Hrvatskoj. Ova baza podataka omogućuje prikupljanje i pohranu podataka o opasnim meteorološkim pojavama i događajima u Europi. Izvješteni događaji o tuči uključuju informacije kao što su lokacija, vrijeme i trajanje pojave, promjer zrna tuče te štetu koju je tuča nanijela. ESWD potom provodi verifikaciju tih izvještaja kako bi podaci bili pouzdani. U ovom radu koristili su se podaci koji su prošli kontrolu kvalitete podataka QC0+ i QC1. Kontrola QC0+ odnosi se na opažanja koja su se vrlo vjerojatno dogodila, ali neki detalji, primjerice točno vrijeme ili karakteristike pojave mogu biti nepoznati ili nesigurni. Kontrola QC1 je najbitnija razina kontrole kvalitete, a podrazumijeva da su događaj i sve njegove karakteristike potvrđene od strane pouzdanog izvora. Svaki događaj tuče ili šteta od tuče, prijavljeni iz različitih naselja, tretirani su kao pojedinačni događaji, čak i kad su nastali od iste konvektivne ćelije.

2.2.3. Mjerenja munja

Mjerenja munja dostupna su iz sustava za lociranje munja (engl. *Lightning Location System*, LLS) kao dio Europskog sustava LINET (engl. *Lighting Network*, Betz i sur.,

2009). LINET mreža koristi se za detekciju i praćenje munja u realnom vremenu, a može detektirati munje oblak-zemlja i munje unutar oblaka. Sastoji se od postaja i senzora koji pokrivaju područje skoro cijele Europe, a u Hrvatskoj je instalirano njih šest: u Zagrebu, Rijeci, Zadru, Splitu, Blatu (na otoku Korčuli) i Dubrovniku. Kako bi se stvorila slika o ukupnoj grmljavinskoj aktivnosti na području Hrvatske, koriste se i senzori postavljeni u susjednim zemljama. U ovom radu bili su dostupni podaci o munjama za područje 38° N – 49° N te 6° E – 21° E, ali je naglasak bio na domeni od interesa koja obuhvaća sjevernu Hrvatsku i dijelove okolnih zemalja.

2.3. WRF model + HAILCAST

WRF (engl. *Weather Research and Forecasting*) model je mezoskalni numerički model koji se koristi za istraživanje atmosfere, ali i za operativnu prognozu vremena. Postoje dvije verzije ovog modela, a to su WRF – ARW (engl. *Weather Research and Forecasting– Advanced Research WRF*) koji omogućava izračun stanja atmosfere realnih i idealiziranih slučajeva te WRF – NMM (engl. *Nonhydrostatic Mesoscale Model*) koji služi za operativne svrhe i svakodnevnu vremensku prognozu. Model je razvijen u suradnji nekoliko istraživačkih institucija, a danas ga i dalje razvija i održava američki nacionalni centar za istraživanje atmosfere (engl. *National Center for Atmospheric Research*, NCAR).

2.3.1. Opće karakteristike - set korištenih parametrizacija

Odabrani događaji ekstremne tuče simulirani su WRF modelom (WRF - ARW) verzije 4.1 u koji je integriran algoritam za rast tuče (HAILCAST), kao i izračun indeksa potencijala za razvoj munja. U tablici 2.2 prikazan je pregled postavki koje su se koristile prilikom numeričkih simulacija WRF modelom. Simulacije se provode na tri ugniježdene domene čiji je korak mreže 9 km (d01), 3 km (d02) i 1 km (d03) te na 97 vertikalnih razina u sve tri domene. Domena d01 obuhvaća Italiju, dijelove srednje, istočne i jugoistočne Europe, te sadrži 194×159 točaka mreže. Domena d02 sadrži dijelove Austrije, Mađarske i Bosne i Hercegovine, kontinentalnu Hrvatsku te sjeverni Jadran te ima 184×145 točaka mreže. Domena d03, odnosno domena od najvećeg interesa obuhvaća sjevernu Hrvatsku, istočnu Slovenije te jugozapadni dio Mađarske, a sadrži 208×184 točaka mreže. Područje koje obuhvaća domena d03 prikazano je i na slici 2.1b. Simulacije su pokrenute u 12 UTC dana prije nego što je opažena konvekcija kako bi se modelu dalo vremena za prilagodbu. Početni i rubni uvjeti dobiveni su svakih 6 sati iz europskog modela za srednjoročnu prognozu vremena (ECMWF-a).

Za simulacije su se koristile sljedeće parametrizacije: WSM6 shema mikrofizike (Hong i Lim, 2011), RRTM shema za dugovalno zračenje (Mlawer i sur., 1997), Dudhia shema za kratkovalno zračenje (Dudhia, 1989), te MYNN 2.5 shema za atmosferski granični sloj (Nakanishi i Niino, 2006). Također, za kumulusnu naoblaku koristila se Kain-Frisch shema (Kain, 2004) koja je bila primijenjena samo u vanjskoj domeni koraka mreže 9 km.

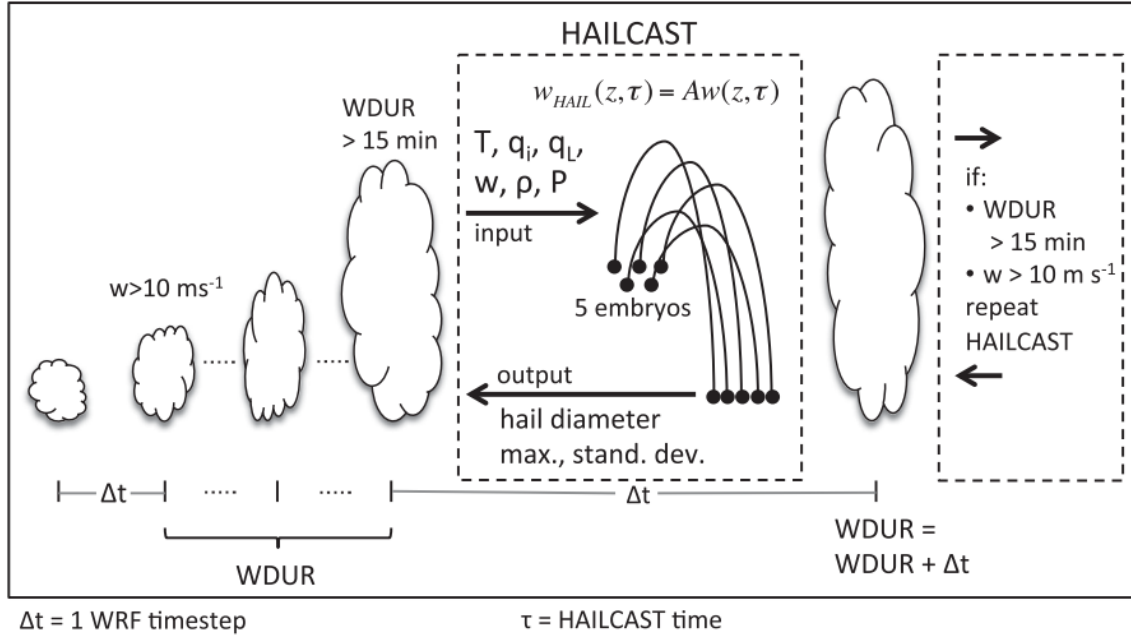
Tablica 2.2. Postavke numeričkih simulacija.

Parametrizacija	WRF
Domena	9 km - (194 × 159) 3 km - (184 × 145) 1 km - (208 × 184)
Vertikalni nivoi	97
Mikrofizika	WSM6
Dugovalno zračenje	RRTM shema
Kratkovalno zračenje	Dudhia shema
Atmosferski granični sloj	MYNN 2.5
Kumulusna naoblaka	Kain-Frisch (aktivna samo u vanjskoj domeni gdje je $dx = 9$ km)
Tuča	HAILCAST
Munje	LPI

2.3.2. HAILCAST modul

HAILCAST je jednodimenzionalni model rasta tuče kojeg je razvio Poolman (1992), a dodatno su ga unaprjeđivali Brimelow i sur. (2002) te Jewell i Brimelow (2008). Sastoji se od modela stacionarnog oblaka i vremenski ovisnog modela rasta tuče koji zajedno predviđaju maksimalnu veličinu zrna tuče na tlu. HAILCAST je dizajniran tako da može biti ugrađen unutar modela koji prognoziraju konvekciju (engl. *Convection-allowing model*, CAM) i na taj se način varijable iz modela stacionarnog oblaka mogu zamijeniti s prognostičkim varijablama iz modela. Adams-Selin i Ziegler (2016) integrirali su HAILCAST u naprednu istraživačku verziju WRF modela (WRF – ARW) koji omogućuje korištenje fizički realističnijih informacija o uzlaznim strujama i mikro-fizičkim procesima.

Simulacije WRF modelom koje se vrše s horizontalnim korakom mreže od 4 km ili manjim, mogu reproducirati cirkulaciju veće skale, ali i polja hidrometeora povezana s organiziranim olujama i konvektivnim sustavima (Weisman i sur., 1997; Kain i sur., 2006). U svakoj točki mreže WRF modela gdje ima dovoljno intenzivne konvekcije (vertikalna brzina veća od 10 m s^{-1} koja je trajala najmanje 15 min) WRF–HAILCAST modelu prenesu se informacije o vertikalnoj brzini, omjeru miješanja vode, leda i snijega te temperaturi. Za svaki vremenski korak u modelu unosi se pet embrija – embriji promjera 5 mm i 7,5 mm ubace se na visinu gdje je temperatura zraka $-8 \text{ }^\circ\text{C}$, dok se oni veličine 5 mm, 7,5 mm i 10 mm unose na $-13 \text{ }^\circ\text{C}$. Embriji su ubačeni u uzlaznu struju te se prati kako se dižu, rastu i u konačnici padaju. Ishod prognoze tuče se prenosi natrag u WRF, koji pohranjuje te podatke i zatim prelazi na sljedeći vremenski korak. Jedini podatak koji se trenutno prenosi iz WRF-HAILCAST-a natrag u WRF je informacija o maksimalnom dijametru tuče na površini.



Slika 2.2. Konceptualni model načina rada WRF-HAILCAST-a (Adams-Selin i Ziegler, 2016.).

U modelu je zanemaren rast zrna sudarima s oborinskim česticama (npr. solikom ili kišom) budući da su takvi sudari rijetki zbog male koncentracije tih čestica u odnosu na čestice unutar oblaka. Početna gustoća embrija u WRF-HAILCAST modelu postavljena je na 500 kg m^{-3} , nakon čega zrno tuče može započeti vlažan ili suh režim rasta. Ako dođe do vlažnog režima, pretpostavlja se da će se sve tekuća voda razliti i upiti na zrno tuče, ako je gustoća zrna tuče ispod 900 kg m^{-3} , te da će novonastali sloj imati gustoću od 900 kg m^{-3} .

2.3.3. Procjena aktivnosti munja

Indeks potencijala za razvoj munja (engl. *Lightning Potential Index*, LPI) je mjera za potencijal stvaranja i odvajanja naboja u oblaku kumulonimbusu (Lyn i Yair, 2008). LPI se računa unutar zone separacije naboja u oblaku koja se nalazi između izoterma $0 \text{ }^\circ\text{C}$ i $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ budući da se pokazalo da su na tim visinama neinduktivni mehanizmi najučinkovitiji. Neinduktivni mehanizmi podrazumijevaju razdvajanje električnog naboja putem odbijanja pri sudarima između kristalića leda koji rastu difuzijom vodene pare i čestica solike koje rastu prirašćivanjem prehladne vode na njih (Yair, 2008). LPI se dobiva iz simulirane vertikalne brzine te omjera miješanja tekuće vode, leda u oblaku, snijega i solike, za svaki vremenski korak u svakoj točki mreže. Definira se kao volumni integral ukupnog toka mase leda i prehladne vode unutar zone razdvajanja naboja, a izražava se u mjernoj jedinici J kg^{-1} :

$$LPI = \frac{1}{V} \int \int \int \varepsilon w^2 dx dy dz \quad (2.1.)$$

gdje je V volumen, w vertikalna brzina (u m s^{-1}). Bezdimezionalna veličina ε skalira vertikalnu brzinu w , a ovisi o vertikalno usrednjenim omjerima miješanja tekuće vode i leda. Ovo zapravo regulira razdvajanje naboja i ovisi o količini raznih hidrometeora koji se nalaze u oblaku. Veličina ε može postići vrijednosti između 0 i

1, a najveći je kada su ranije spomenuti omjeri miješanja jednaki. LPI poprima vrijednosti različite od nule unutar zone razdvajanja naboja i dodatno u točkama mreže gdje većina susjednih ćelija ima vertikalnu brzinu veću od $0,5 \text{ m s}^{-1}$.

U ovom istraživanju također se koristi drugi pristup proračuna aktivnosti munja poznat kao umnožak $\text{CAPE} \times \text{oborina}$ (engl. $\text{CAPE} \times P$) koji su predložili Romps i sur. (2014). Ova metoda sugerira da je stopa pojave munja po površini proporcionalna stopi oborine pomnoženoj s raspoloživom konvektivnom energijom:

$$F = \frac{\eta}{E} \times P \times \text{CAPE} \quad (2.2.)$$

gdje F označava stopu udara munja po površini ($\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), P je količina oborine ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), a CAPE je u J kg^{-1} . Koristeći adijabatičku definiciju CAPE , umnožak CAPE -a i P predstavlja teorijsku maksimalnu stopu pri kojoj se kinetička energija pridjeljuje kondenzatima u uzlaznoj struji, u jedinicama W m^{-2} . Konstanta proporcionalnosti $\frac{\eta}{E}$ sadrži bezdimenzionalnu konverzijsku efikasnost η i otpuštanje energije po bljesku munje E (izraženo u J). Efikasnost η predstavlja omjer snage po površini koja se rasipa munjom i CAPE -a po površini u određenom vremenu dostupnom kondenzatima. Autori nisu predložili određeni mehanizam električnog punjenja, ali napominju da je većina mehanizama punjenja usklađena s idejom da veće uzlazne brzine i sadržaj vode rezultiraju većim stopama munja. Koristeći prostorno usrednjene vrijednosti CAPE -a, oborine (P) i udara munja u unutrašnjosti SAD-a za 2011. godinu pokazali su da postoji linearna ovisnost između stope udara munja i umnoška CAPE -a i oborine i na taj način dobili procjenu konstante proporcionalnosti $\frac{\eta}{E}$. Međutim, budući da se u ovom radu obrađuju samo dva slučaja, nije prikladno raditi linearnu regresiju pa se uzima samo $F = \text{CAPE} \times P$ ($\text{J kg}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$).

Brisson i sur. (2021) navode moguće poteškoće kod korištenja pristupa $\text{CAPE} \times P$ u modelima koji simuliraju konvekciju zbog smanjenja ili nestajanja CAPE -a kada postoji oborina, i obrnuto. Drugim riječima, CAPE se brzo troši na lokacijama konvektivnih ćelija zbog oslobađanja latentne topline u uzlaznoj struji i evaporacijskog ohlađivanja zbog pojave oborine ispod baze oblaka. Dakle, oborina nastaje istovremeno dok nestabilnost postepeno nestaje iz atmosfere, a to rezultira smanjenjem CAPE -a u stupcu zraka gdje je proizvedena konvektivna oborina. Brisson i sur. (2021) ipak predlažu da se i dalje koristi formula 2.2, s time da se CAPE u određenom trenutku t množi sa simuliranom oborinom u slijedećem satu, dakle, oborinom koja je akumulirana između t i $t + 1 \text{ h}$.

2.4. *Korištenje verifikacijskih parametara*

2.4.1. **Set standardnih parametara za meteorološke veličine**

Kako bi se ocijenila sposobnost modela da reproducira prizemne uvjete atmosfere kao što su temperatura zraka, relativna vlažnost, tlak zraka i brzina vjetera korištene su neke od standardnih statističkih veličina. Modelske vrijednosti uspoređivale su se s prizemnim mjerenjima s automatskih meteoroloških postaja na lokacijama navedenim u poglavlju 2.2.1. Pritom treba napomenuti da je tlak na postaji reduciran na standardnu razinu, odnosno na srednju morsku razinu kako bi vrijednosti bile usporedive.

U ovom radu korištene su statističke veličine: pristranost (engl. *BIAS*), korijen srednje kvadratne pogreške (engl. *Root Mean Square Error*, RMSE) i koeficijent korelacije

(r) koje su prikazane u tablici 2.3. Oznaka M se odnosi na vrijednosti prognozirane modelom, dok simbol O označava izmjerene podatke. Pristranost modela je statistička veličina koja se koristi za procjenu razlike između prognoziranih vrijednosti modela i opaženih vrijednosti, odnosno mjerenja. Ova mjera govori o sistematskoj pogrešci koju model posjeduje, odnosno ima li model tendenciju precjenjivanja ili podcjenjivanja iznosa određenih meteoroloških elemenata. Ako je pristranost oko nule, znači da se model vrlo dobro slaže s mjerenjima. Pozitivna pristranost ukazuje da model precjenjuje varijablu, dok negativna znači da ju model podcjenjuje.

Tablica 2.3. Standardne statističke veličine korištene u istraživanju.

Statistička veličina	Formula
Pristranost (BIAS)	$BIAS = \bar{M} - \bar{O}$
Korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}$
Koeficijent korelacije (r)	$r = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})}{\sigma_M \sigma_O};$ $\sigma_M^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2; \sigma_O^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2$

RMSE je mjera pogreške modela u odnosu na izmjerene podatke, a zbog druge potencije dosta je osjetljiv na veće pogreške modela. Pouzdanost modela je bolja što je RMSE manji, a idealni slučaj je kada RMSE iznosi 0 (što se u praksi teško postiže). Koeficijent korelacije daje uvid u linearnu vezu između izmjerenih i prognoziranih vrijednosti. Koeficijent korelacije poprima vrijednosti između -1 i 1, a da bi model bio pouzdan, koeficijent korelacije trebao bi biti što bliže vrijednosti 1.

2.4.2. Način računanja evaluacije za rijetke događaje

Meteorološka pojava kao što je tuča, pripada kategoriji rijetkih i ekstremnih vremenskih događaja. Verifikacija tuče predstavlja značajan izazov budući da je to vrlo lokalna i prostorno varijabilna pojava.

Tuča je jedan od fenomena koji se mogu smatrati jednostavnim binarnim događajima, a prognoze ili upozorenja za ove događaje često se izdaju kao nepotpune izjave hoće li se ili neće dogoditi. Ovaj tip prognoze ponekad se naziva „da/ne“ prognozama. U tablici kontingencije (tablica 2.4) prikazana su (2×2) moguća ishoda za događaj. Postoje dvije mogućnosti da prognoza bude ispravna (ili pogodak ili točno odbacivanje) i dvije mogućnosti da prognoza bude netočna (ili lažna uzbuna ili promašaj) (Jolliffe i Stephenson, 2003). Dakle, oznaka a označava da je tuča na nekoj postaji opažena i simulirana; slovo b se odnosi na slučaj kada tuča nije opažena, ali je simulirana; slovo c

označava da tuča nije opažena, ali ju je model prognozirao; te d se odnosi na slučajeve kada tuča nije niti opažena niti simulirana na određenoj postaji.

Tablica 2.4. Tablica kontingencije

Pojava je simulirana	Pojava je opažena	
	Da	Ne
Da	a	b
Ne	c	d

Tablica 2.5. Mjere uspješnosti za rijetke događaje.

Metrika	Formula
Vjerojatnost otkrivanja	$POD = \frac{a}{a+c}$
Stopa lažnih alarma	$F = \frac{b}{b+d}$
Indeks ekstremne ovisnosti	$EDI = \frac{\log F - \log POD}{\log F + \log POD}$

U ovom radu, rezultati dobiveni iz modela uspoređuju su se s diskretnim mjerenjima na DHMZ-ovim postajama. Budući da vrijeme opažanja tuče nije poznato, analizirat će se 24-satni periodi, odnosno gledat će se samo je li toga dana tuča opažena na postaji ili nije. Također, koristi se tzv. „fuzzy“ metoda koja ne zahtijeva preveliku prostornu i vremensku preciznost, to jest usklađenost opažene i simulirane pojave. Pri tome su se posebno promatrale postaje na kojima je zabilježena tuča te se provjerava je li tuča simulirana unutar radijusa od 15 km oko postaje. Ukoliko je tuča zabilježena, onda se toj postaji ipak pridjeljuje pogodak, odnosno postaja se tretira kao da je na njoj modelom simulirana tuča. Na taj se način ipak povećava broj „ispravno“ prognoziranih događaja tuče na promatranim postajama jer se time modelu dopušta manja pogreška kod prostorne rasprostranjenosti simulirane tuče.

Mjere uspješnosti su verifikacijske metode koje se usredotočuju na usklađenost između prognoza i opažanja, bilo na pojedinačnoj ili na kolektivnoj razini (Katz i Murphy, 1997; Jolliffe i Stephenson, 2003). U ovom radu korišteno je nekoliko metoda uspješnosti (tablica 2.5), a to su vjerojatnost otkrivanja (engl. *Probability of Detection*, POD), stopa lažnih alarma (engl. *False Alarm Rate*, F) i indeks ekstremne ovisnosti (engl. *Extremal Dependence Index*, EDI). Veličina POD, koji se često naziva i stopa pogodaka (engl. *Hit Rate*, HR) predstavlja udio događaja koji su ispravno prognozirani. To je procjena uvjetne vjerojatnosti događaja koji je prognoziran kada se događaj stvarno dogodio (tuča je simulirana na mjestu gdje je tuča i opažena). Vrijednosti POD-a se kreću između 0 i 1, gdje 0 znači da događaj nikad nije prognoziran, a 1 znači da je svaki događaj uspješno prognoziran. Stopa lažnih alarma je udio događaja koji se nisu dogodili, a lažno su prognozirani. Drugim riječima, stopa lažnog alarma je uvjetna vjerojatnost pogrešnog alarma, uz uvjet da događaj nije opažen. Ponekad se naziva i vjerojatnost lažnog otkrivanja (engl. *Probability of False Detection*, POFD)

u analogiji s POD (Jolliffe i Stephenson, 2003). Vrijednosti se kreću između 0 i 1, a što je vrijednosti bliže nuli, prognoza je uspješnija. Indeks EDI je metrika koja daje značajne rezultate kod procjene rijetkih i ekstremnih događaja. Vrijednosti se nalaze u intervalu $[-1, 1]$ te se maksimizira kada POD teži u 1 i minimizira kada F teži u 1 (Ferro i Stephenson, 2011).

Za kvalitativnu evaluaciju intenziteta oluje koristio se indeks intenziteta munja (engl. *Thunderstorm Intensity Index*, TSII). TSII je razvio Jelić (2022) koristeći metodu skoka munje i prelazeći s Langrangeovog u Eulerov sustav, a budući da se u takvom pristupu svaka točka mreže promatra kao zasebni objekt, nisu potrebne metode za određivanje putanja oluja. Domena je podijeljena u male segmente u kojima je svaki kvadratić veličine $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ te su za svaki kvadratić zbrojeni svi bljeskovi munje za svaki 2-min interval. Na taj se način mogu detektirati značajni skokovi u dinamici munja u svakoj točki i vremenskom trenutku. Dakle, TSII je dijagnostički alat koji identificira područja nagle pozitivne promjene aktivnosti munja. Može poprimiti vrijednosti 0 ili 1, pri čemu $\text{TSII} = 1$ znači da se naglo povećao broj udara munja, dok će u ostalim slučajevima TSII biti jednak nuli. TSII se dobiva na način da se računaju uzastopni trendovi udara munja za određeno vremensko razdoblje. Potom se za svaki od pet uzastopnih vremenskih koraka računa standardna devijacija tih trendova (σ). Zahtjeva se da šesti uzastopni trend bude veći od $2 \times \sigma$ dobivenih u prethodnom koraku kako bi se TSII-ju pridijelila pozitivna vrijednost. Ova metoda ponavlja se u svakoj točki mreže pa tako jedna oluja može proizvesti i više TSII-a.

Iako se TSII računa iz broja bljeskova munja, pokazalo se da se rezultati TSII-ja mogu povezati i s ostalim ekstremnim pojavama koje donosi grmljavinsko nevrijeme kao što su obilni pljuskovi, tuča, prizemni vjetar ili pijavice. U ovom radu, trag TSII-ja, osim s tragom munja, uspoređivat će se i s opažanjima tuče budući da se i tuča javlja na mjestima gdje je oluja najintenzivnija. Jedno istraživanje o vremenskoj i prostornoj povezanosti munja i tuče u Europi napravila je Wapler (2017). Autorica je istraživala životni ciklus oluja s tučom uz fokus na karakteristike munja unutar takvih oluja. Pokazala je da se munje u prosjeku javljaju unutar 15 km oko središta oluje te da je uglavnom najveća gustoća munja na mjestu gdje je tuča opažena. Međutim, u slučajevima jako velike tuče (dijametar $\geq 5 \text{ cm}$), lokalna gustoća munja je veća te se maksimum ipak nalazi sjevernije od mjesta gdje je opažena tuča. Autorica je također pokazala da netom prije opažanja tuče dolazi do naglog porasta broja munja, koji se nakon toga smanji. Međutim, ističe da tuča ne mora nužno biti opažena za vrijeme najveće stope porasta udara munja.

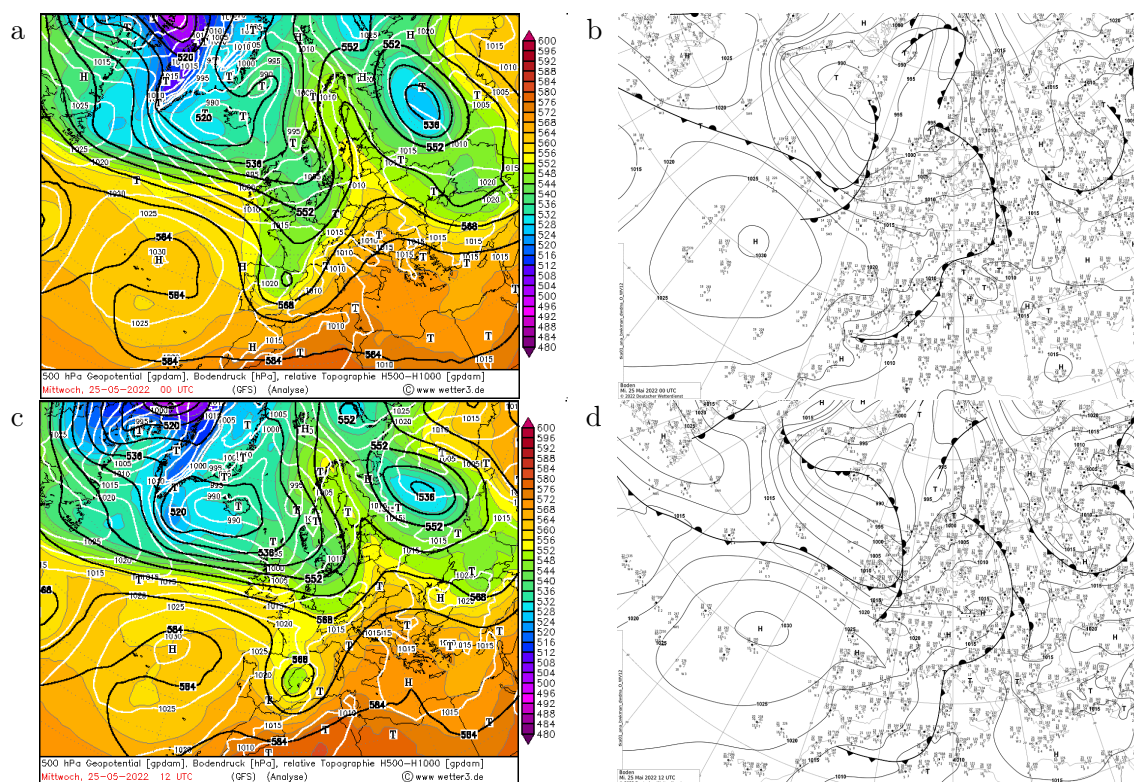
3. Rezultati

3.1. Karakteristike epizoda 25. svibnja 2022. i 2. lipnja 2022.

Temeljem uočenih i prijavljenih šteta, za analizu su odabrana dva slučaja sa snažnom grmljavinskom olujom praćenom velikom tučom. Epizode su se dogodile 25. svibnja i 2. lipnja 2022. godine u poslijepodnevnom i večernjim satima, a zahvaćeni su dijelovi Međimurske, Varaždinske, Krapinsko-zagorske, Koprivničko-križevačke, Sisačko-moslavačke i Bjelovarsko-bilogorske županije. U slučaju 25. svibnja 2022. sustav se premještao preko istočne Hrvatske pa je i tamo opažena tuča.

3.1.1. Sinoptička i mezoskalna pozadina 25. svibnja 2022.

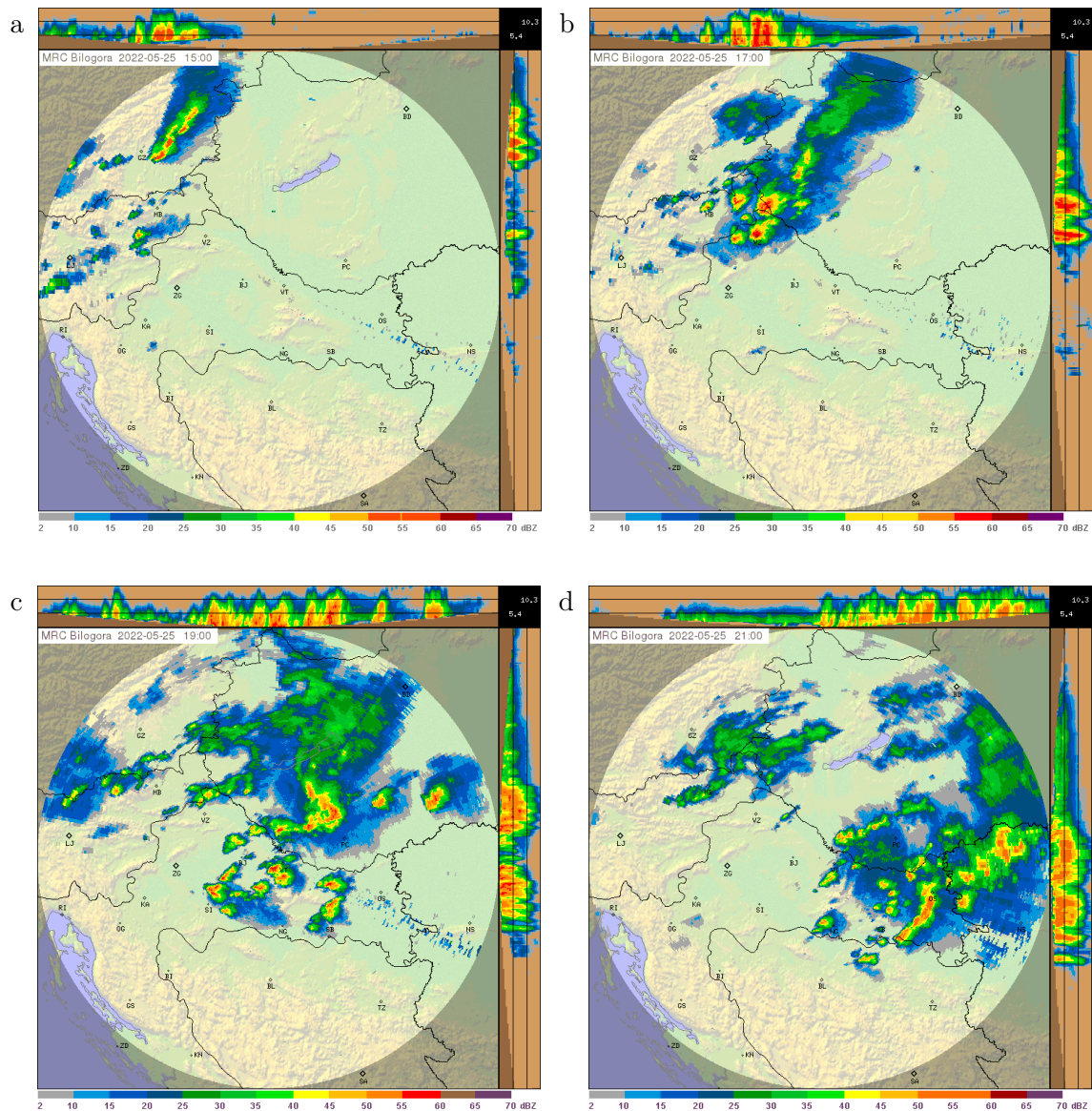
U tjednu koji je prethodio snažnom grmljavinskom nevremenu s velikom tučom, Hrvatska se nalazila na području pod utjecajem izraženog visinskog grebena. Dana 25. svibnja 2022., greben postupno slabi i Hrvatska se nalazila na prednjoj strani doline koja podržava visinsko jugozapadno strujanje koje na pregrijano tlo donosi nešto hladniji i nestabilan zrak (slika 3.1a). Prizemno se Hrvatska nalazila pod utjecajem plitke ciklone s pripadnim frontalnim sustavom koji se premještao sa sjeverozapada prema jugoistoku (slika 3.1b). U poslijepodnevnom satima, fronta je zahvatila sjever Hrvatske donoseći pritom sustav konvektivnih oblaka u kojima je bilo i velike tuče.



Slika 3.1. Sinoptički uvjeti za slučaj 25. svibnja 2022. (a, b) u 00 UTC i (c, d) u 12 UTC. (a, c) geopotencijalna visina apsolutne topografije izobarne plohe AT 500 hPa i (b, d) prizemne dijagnostičke karte. Izvor: <https://www.wetter3.de/>.

Već se tijekom ranih poslijepodnevni sati, duboka vlažna konvekcija stvarala na jugu Austrije koja se potom premještala prema jugoistoku što je vidljivo na slici 3.2.

Sustav je na područje Hrvatske stigao oko 14 UTC⁴. Na slici 3.2b su vidljive snažne konvektivne ćelije čiji je radarski odraz veći od 50 dBz što ukazuje na mogućnost stvaranja velike tuče. Sustav se dalje premještao prema istoku i pritom zahvatio istočnu Hrvatsku i južne dijelove Mađarske. Iz radarskog odziva vidljiva je prisutnost nekoliko superćelija najprije na sjeveru Hrvatske, a potom i u Mađarskoj, dok se kroz Slavoniju premještala linijski organizirana konvekcija (slika 3.2d).

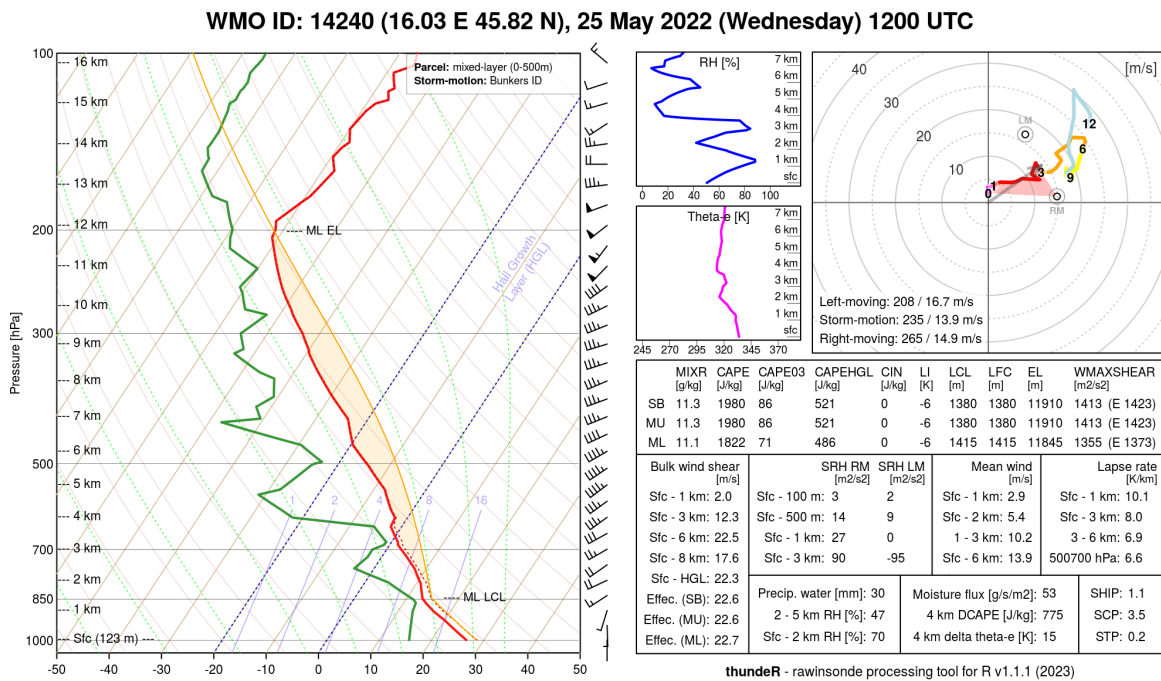


Slika 3.2. Radarski odraz s MRC Bilogora 25. svibnja 2022. (a) u 13 UTC, (b) u 15 UTC, (c) u 17 UTC i (d) 19 u UTC. Izvor: <https://irb.meteoadriatic.net/radar/2022/>.

Neposredno prije konvekcije, nad područjem sjeverozapadne Hrvatske bilo je djelomično oblačno s niskom do srednjom naoblakom. U 12 UTC temperatura zraka na prizemnim postajama kretala se između 26 °C i 29 °C, dok je temperatura rosišta bila od 14 °C do 17 °C. Ovakva temperatura rosišta govori da je u prizemnom sloju bilo puno vlage, a to je jedan od nužnih sastojaka za iniciranje duboke vlažne konvekcije.

⁴Vrijeme na slikama 3.2 i 3.5 dano je u ljetnom srednjoeuropskom vremenu (engl. *Central European Summer Time*, CEST), CEST = UTC + 2 h

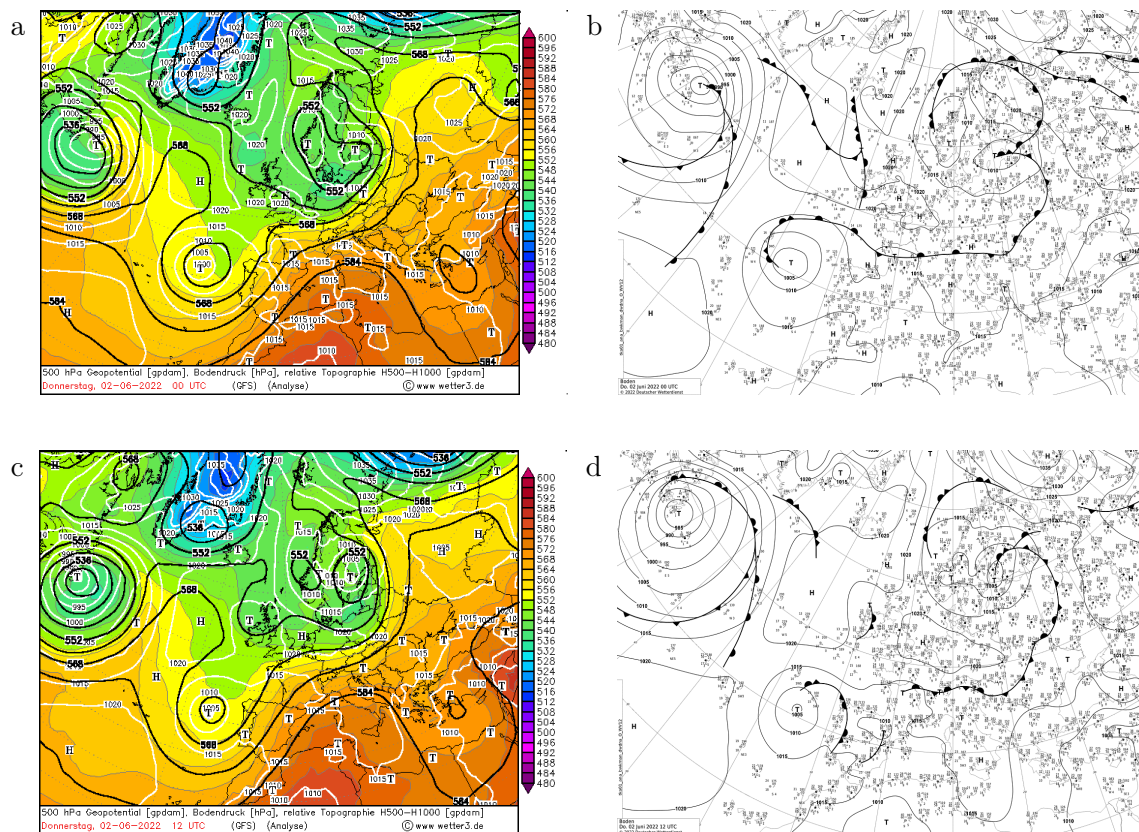
U istom terminu (12 UTC, odnosno 14 sati po lokalnom vremenu, CEST) na slici 3.3 prikazan je i vertikalni profil atmosfere na postaji Zagreb – Maksimir. Izračunati MU-CAPE (engl. *MU – most unstable*) iznosio je 1980 J kg^{-1} što ukazuje na značajnu nestabilnost atmosfere. Također, velik dio MUCAPE-a se nalazio unutar zone rasta tuče koja se nalazi na visinama gdje je temperatura između $0 \text{ }^\circ\text{C}$ i $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ kako je i naznačeno na slici. Dakle, sondaža ukazuje na veliku vjerojatnost za konvektivnu oluju s izraženim pljuskovima, grmljavinom i potencijalno tučom. Za nastanak tuče također je poželjno da se većina CAPE-a (barem dvije trećine) nalazi na temperaturama nižim od nulte izoterme, što je vidljivo i na ovom vertikalnom profilu atmosfere. U protivnom bi bilo premalo prehladnih kapljica koje su presudne za rast tuče. Budući da je CAPE proporcionalan vertikalnoj brzini ($w \simeq \sqrt{2CAPE}$), a vertikalna brzina ovisi o dijametru zrna tuče prema ovisnosti koja je dana na slici 1.4, iz CAPE-a se može procijeniti maksimalni dijametar tuče. Iznosu CAPE-a od 1980 J kg^{-1} odgovara vertikalnoj brzini od 63 m s^{-1} koja podržava promjer zrna tuče od otprilike 11 cm. Iz slike 3.3 može se iščitati da smicanje vjetra (engl. *Bulk wind shear*) od tla do 6 km visine iznosi $22,5 \text{ m s}^{-1}$. Izraženo smicanje vjetra u dubljem sloju još je jedan od indikatora dobro organizirane konvekcije i superćelija.



Slika 3.3. Radiosondaža na postaji Zagreb - Maksimir 25. svibnja 2022. u 12 UTC. Izvor: http://www.rawinsonde.com/thunder_app/.

3.1.2. Sinoptička i mezoskalna pozadina 2. lipnja 2022.

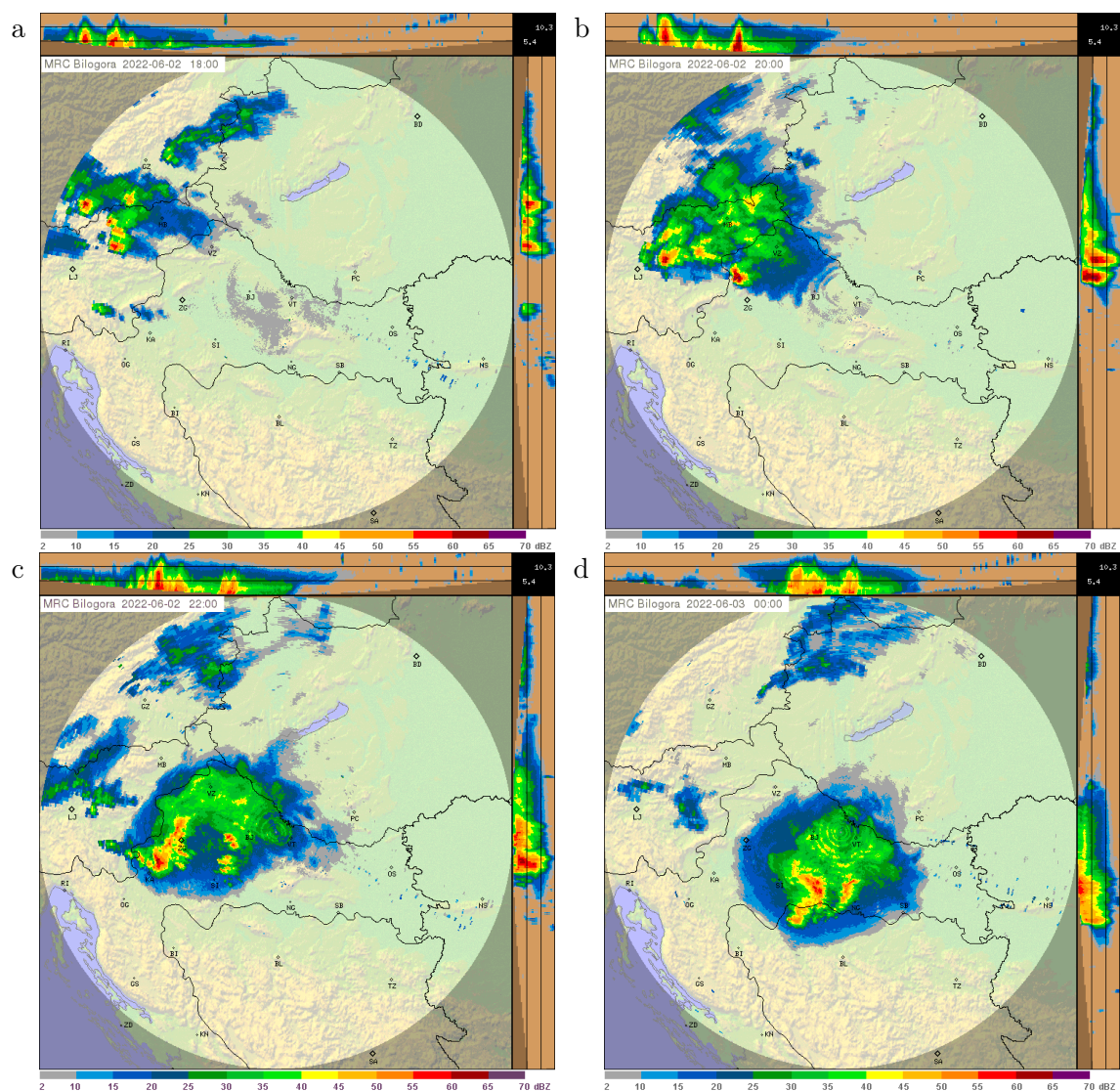
Prema izobarnoj plohi AT 500 hPa (slika 3.4a) Hrvatska se nalazila na stražnjoj strani visinskog grebena. U takvoj sinoptičkoj situaciji postoji visinsko zapadno i jugozapadno strujanje te pritjecanje vlažnog i nestabilnog zraka na zagrijanu podlogu. Prizemno se Hrvatska nalazila u bezgradijentnom polju srednjeg tlaka zraka uz stacionarni frontalni sustav na sjevernom dijelu Hrvatske (slika 3.4b). Uslijed toga, nastao je sustav konvektivnih oblaka donoseći pritom i veliku tuču.



Slika 3.4. Sinoptički uvjeti za slučaj 2. lipnja 2022. (a, b) u 00 UTC i (c, d) u 12 UTC. (a, c) geopotencijalna visina apsolutne topografije izobarne plohe AT 500 hPa i (b, d) prizemne dijagnostičke karte. Izvor: <https://www.wetter3.de/>.

Tog se dana, u poslijepodnevним satima, duboka vlažna konvekcije premještala preko Slovenije prema sjevernoj i središnjoj Hrvatskoj. Na slici 3.5 vidljiv je sustav konvektivnih oblaka, čiji radarski odraz ponegdje premašuje 60 dBz, što znači da lokalno može biti i tuče. Prvi konvektivni oblaci približili su se sjeveru Hrvatske oko 16 UTC (18 sati po lokalnom vremenu), nakon čega je sustav dodatno jačao i premještao se prema jugoistoku.

Neposredno prije konvekcije, u 12 UTC, iz SYNOP izvješća iščitana su naoblaka, vjetar, temperatura zraka i rosište. Nad područjem sjeverozapadne Hrvatske bilo je djelomično sunčano uz nisku naoblaku, dok je vjetar bio pretežno sjeveroistočnog smjera i brzina između 1 m s^{-1} i 3 m s^{-1} . Temperatura zraka bila je između $25 \text{ }^\circ\text{C}$ i $28 \text{ }^\circ\text{C}$, dok se temperatura rosišta kretala između $15 \text{ }^\circ\text{C}$ i $17 \text{ }^\circ\text{C}$ što upućuje da je u prizemnim slojevima bila prisutna značajna količina vlage. Rutinsko radiosondažno visinsko mjerenje na postaji Zagreb – Maksimir prikazano je na slici 3.6. Toga dana procijenjeni MUCAPE iznosi 837 J kg^{-1} i znatno je manji nego u prethodnom slučaju. Unatoč tomu, CAPE je i dalje najširi u rasponu temperatura pogodnih za rast tuče, koji su naznačeni na slici. Nulta izoterma ni u ovom slučaju po visini ne prelazi granicu od donje trećine CAPE, što opet pogoduje rastu tuče zbog dovoljnog sadržaja prehladnih kapljica. Za procijenjeni CAPE od 837 J kg^{-1} , vertikalna brzina otprilike iznosi 41 m s^{-1} , što prema slici 1.4, odgovara zrnu tuče promjera oko 6.5 cm. Smicanje vjetra u sloju između tla i 6 km visine prema radiosondažnom mjerenju iznosilo je $20,5 \text{ m s}^{-1}$ što je svakako pridonijelo boljoj organizaciji i dugotrajnosti ove oluje, a potencijalno može ukazivati i na prisustvo superćelije.

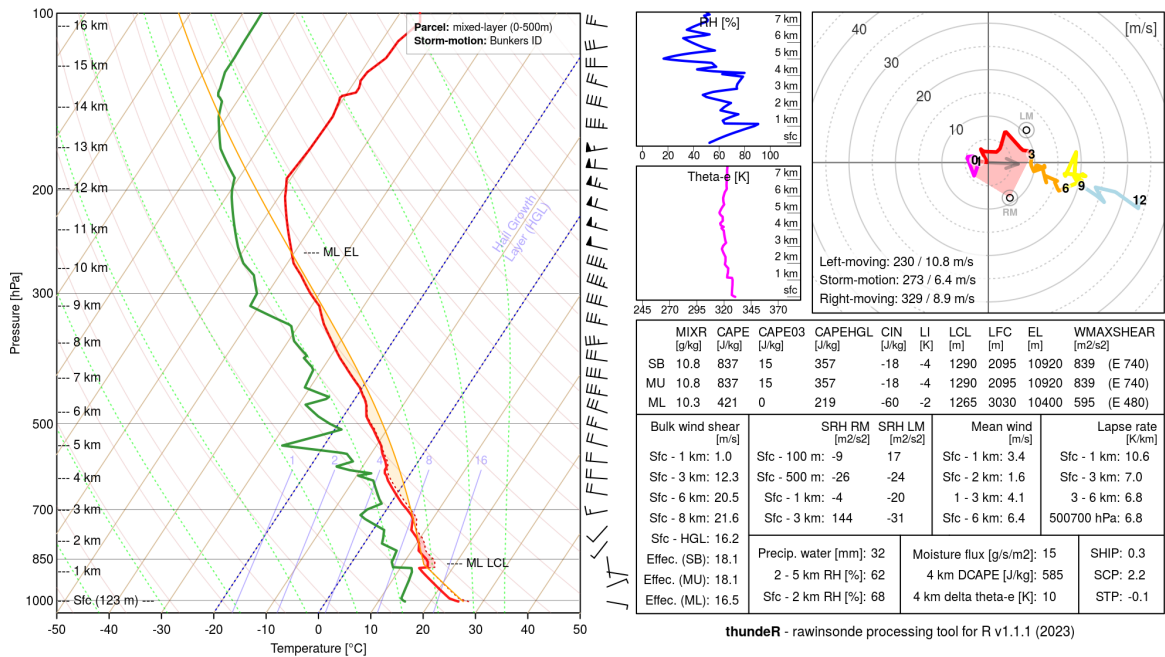


Slika 3.5. Radarski odraz s MRC Bilogora 2. lipnja 2022. (a) u 16 UTC, (b) u 18 UTC, (c) u 20 UTC i (d) u 22 UTC. Izvor: <https://irb.meteoadriatic.net/radar/2022/>.

3.2. *Evaluacija simuliranih meteoroloških uvjeta*

Simulirana maksimalna radarska reflektivnost i vektori prizemnog vjetra prikazani su na slikama 3.7 (25. svibnja 2022.) i 3.8 (2. lipnja 2022.) te se može usporediti s opaženim radarskim odrazom danim u prethodnom poglavlju. Prema modeliranim poljima, u svibanjskom slučaju vidljivo je da model vrlo dobro simulirao dolazak sustava sa sjeverozapada između 15 i 17 UTC (slike 3.7a i 3.7b). Radarski odraz konvektivnih ćelija pri dolasku na područje sjeverne Hrvatske od 50 dBz-a i prostorna raspodjela oborine također su u dobrom slaganju s mjerenjima. Model je dobro prognozirao kretanje sustava prema jugoistoku, međutim, iza 17 UTC, je ipak precijenio intenzitet i prostornu pokrivenost oborinom, posebno na području sjeveroistočne Slovenije (slika 3.7c).

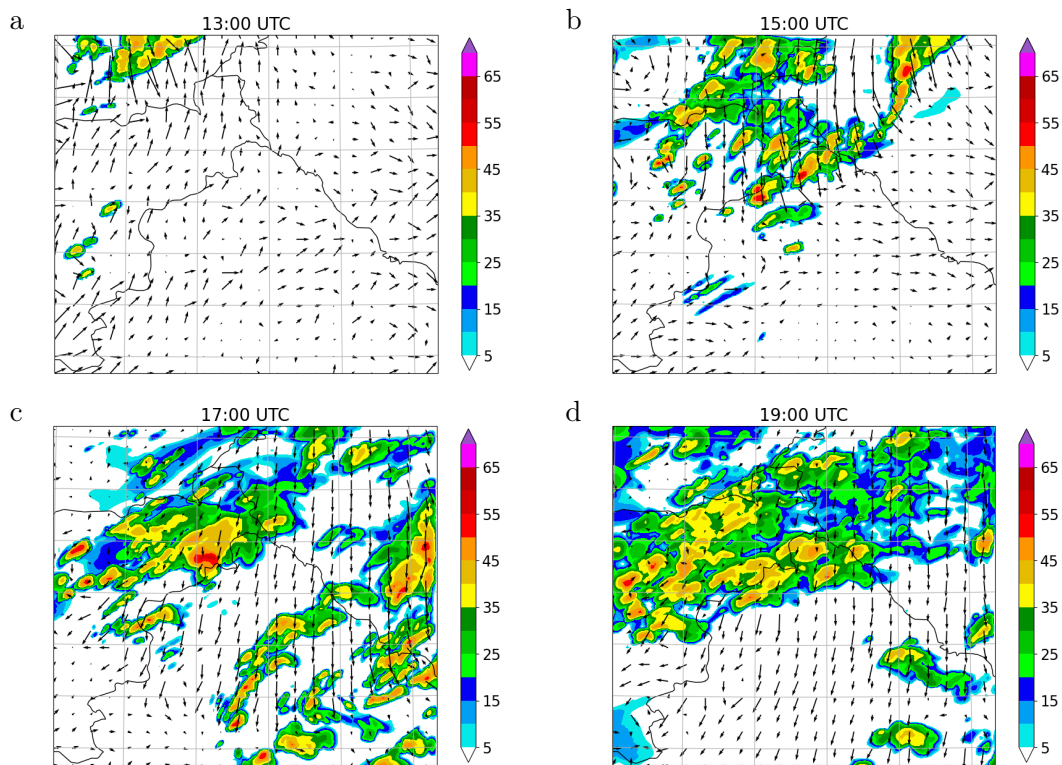
WMO ID: 14240 (16.03 E 45.82 N), 02 Jun 2022 (Thursday) 1200 UTC



Slika 3.6. Radiosondaža na postaji Zagreb - Maksimir 2. lipnja 2022. u 12 UTC. Izvor: http://www.rawinsonde.com/thunder_app/.

Na slici 3.8 prikazana su polja simulirane maksimalne radarske refleksivnosti 2. lipnja 2022. za razdoblje od 16 do 22 UTC. Model je ukazao na raniji dolazak konvektivnog sustava na područje sjeverne Hrvatske. Intenzitet i prostorna raspodjela su u rano poslijepodne dobro simulirana, osim što model nije prognozirao oborinu na jugozapadnom dijelu domene, gdje je pak opažen radarski odraz od 50 dBz. Nadalje, model je, kao i u prethodnom slučaju, pred kraj dana ponovo precijenio oborinu na sjeveroistoku Slovenije i sjeveru Hrvatske što je vidljivo na slikama 3.8c i 3.8d.

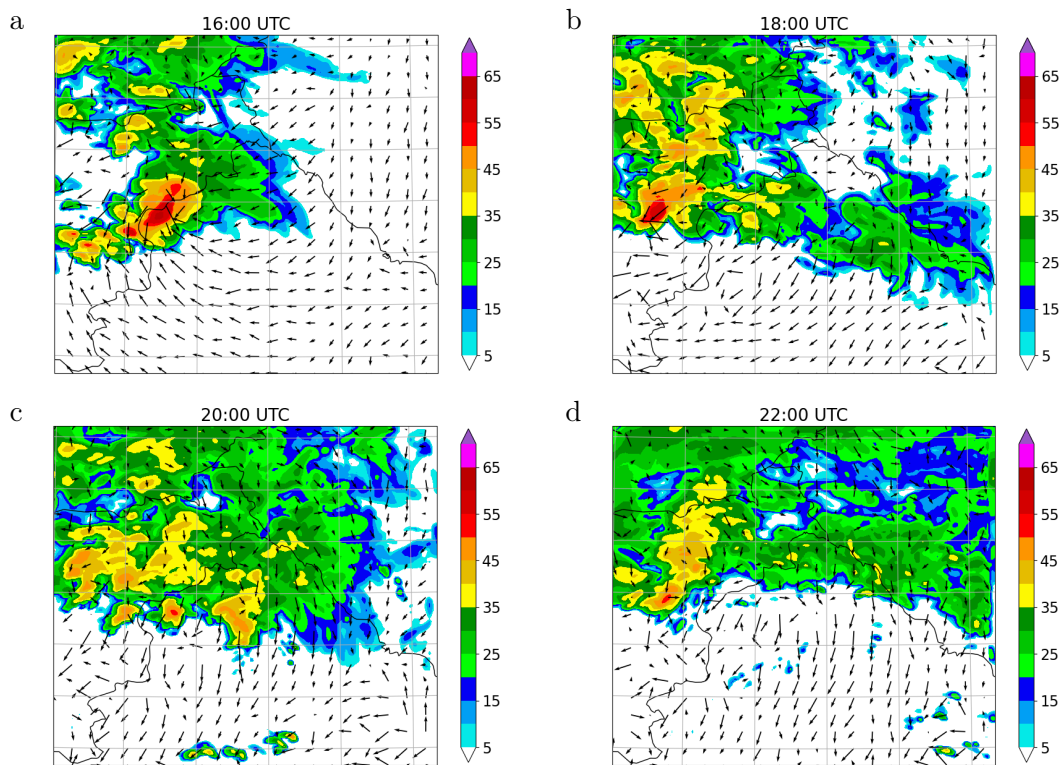
Statističke veličine za četiri meteorološka elementa na pojedinim postajama u domeni prikazane su na slikama 3.10 za 25. svibnja 2022. i 3.11 za 2. lipnja 2022. Za svaku postaju, usrednjavale su se vrijednosti pojedinog meteorološkog parametra unutar 24 sata. U oba odabrana slučaja, pristranost modela za temperaturu zraka generalno je negativna što ukazuje na to da model teži podcijeniti temperature, odnosno simulirati hladnije uvjete. Ipak, postoje iznimke poput postaja Karlovac, Krapina i Varaždin kada je pristranost vrlo blizu nuli. S druge strane, na postaji Puntijarka model je precijenio temperaturu zraka (pristranost je +4 °C). Puntijarka je visinska postaja pa je precjenjivanje temperature moguće zbog izgladene visine topografije u modelu. Unatoč navedenim odstupanjima, pristranost ne prelazi vrijednosti od ±5 °C. Kvaliteta slaganja između simulacija i opažanja temperatura zraka dodatno se potvrđuje vrijednostima korijena srednjeg kvadratnog odstupanja (RMSE), koje nisu veće od 6 °C, a za postaje Karlovac, Krapina i Varaždin, vrlo su blizu nule u oba simulirana slučaja. Koeficijent korelacije također ukazuje na dobro slaganje jer su vrijednosti na većini postaja vrlo blizu 1, izuzev Bilogore, Bjelovara i Daruvara kada je r nešto niži, ali i dalje preko 0,6.



Slika 3.7. Simulirana maksimalna radarska reflektivnost 25. svibnja 2022. i vektori prizemnog vjetra (a) u 13 UTC, (b) u 15 UTC, (c) u 17 UTC i (d) u 19 UTC.

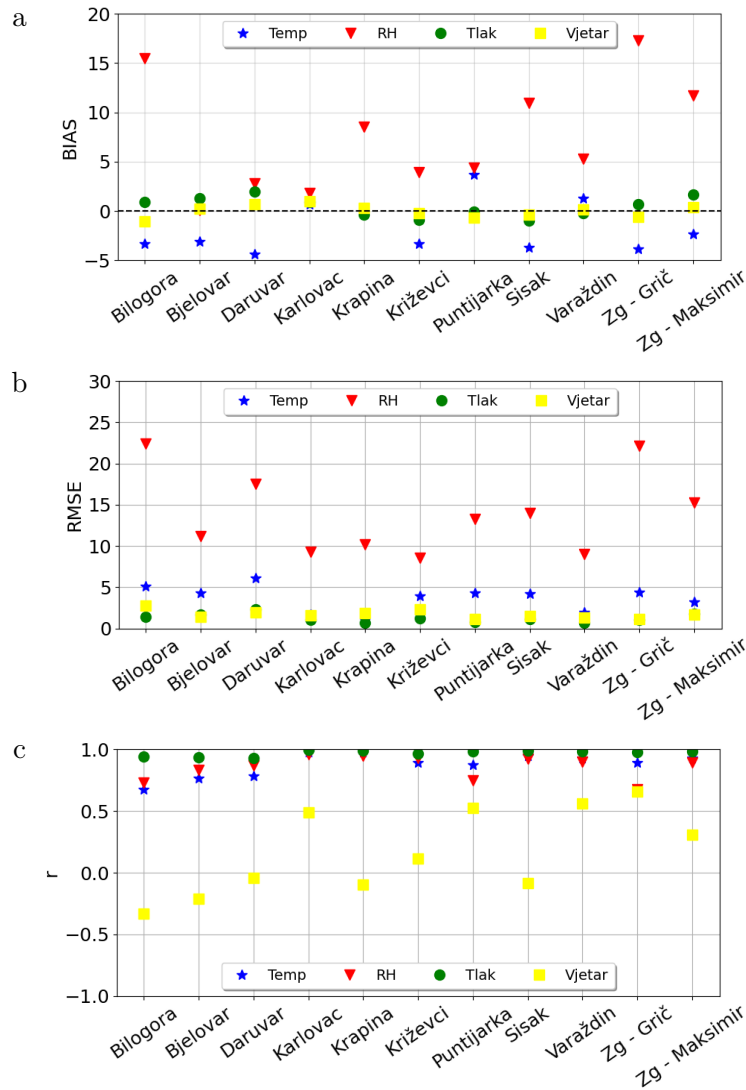
Relativnu vlagu u oba je slučaja na većini postaja model precijenio pa zato pristranost uglavnom poprma pozitivne vrijednosti koje ne prelaze 16 %. Većina odstupanja relativne vlage nalaze se u intervalu između 7 % i 25 %. Iz grafova koji prikazuju pristranost i RMSE za oba simulirana slučaja vidljivo je kako postaja na Bilogori pokazuje najveća odstupanja. Mogući uzrok tomu je to što je Bilogora planinska postaja te se u modelu nalazi na nižoj nadmorskoj visini nego u stvarnosti. Koeficijent korelacije 25. svibnja 2022. pokazuje vrlo dobro slaganje modela i mjerenja budući je na većini postaja blizu 1, osim Bilogore, Puntijarke i Zagreb - Grič kada približno iznosi 0,5. Korelacija između mjerenih i simuliranih vrijednosti relativne vlage 2. lipnja 2022. također pokazuje vrlo dobro slaganje na većini postaja. Jedino postaje Bilogora i Daruvar toga dana pokazuju nešto slabije korelacije koje otprilike iznose 0,2.

S obzirom na razlike između stvarnih nadmorskih visina meteoroloških postaja i onih u modelu, izvršena je redukcija tlaka zraka na normalni nivo kako bi se rezultati mogli međusobno usporediti. Većina postaja pokazuje blagu pozitivnu pristranost tlaka, obično manju od 2 hPa. Izuzeci su postaje Krapina, Križevci i Sisak, koje pokazuju blagu pristranost ispod nule. Vrijednosti srednjeg kvadratnog odstupanja (RMSE) za tlak zraka na svim postajama i u oba odabrana događaja ukazuju na dobro slaganje između modela i stvarnih mjerenja. Što se tiče koeficijenta korelacije, u slučaju događaja 25. svibnja 2022., sve postaje pokazuju iznimno dobru korelaciju, budući da se vrijednost približava 1. U slučaju događaja 2. lipnja 2022., korelacijski koeficijent je nešto niži, ali i dalje značajan, s vrijednostima koje prelaze 0,5 na svim postajama.



Slika 3.8. Simulirana maksimalna radarska reflektivnost 2. lipnja 2022. i vektori prizemnog vjetra (a) u 16 UTC, (b) u 18 UTC, (c) u 20 UTC i (d) u 22 UTC.

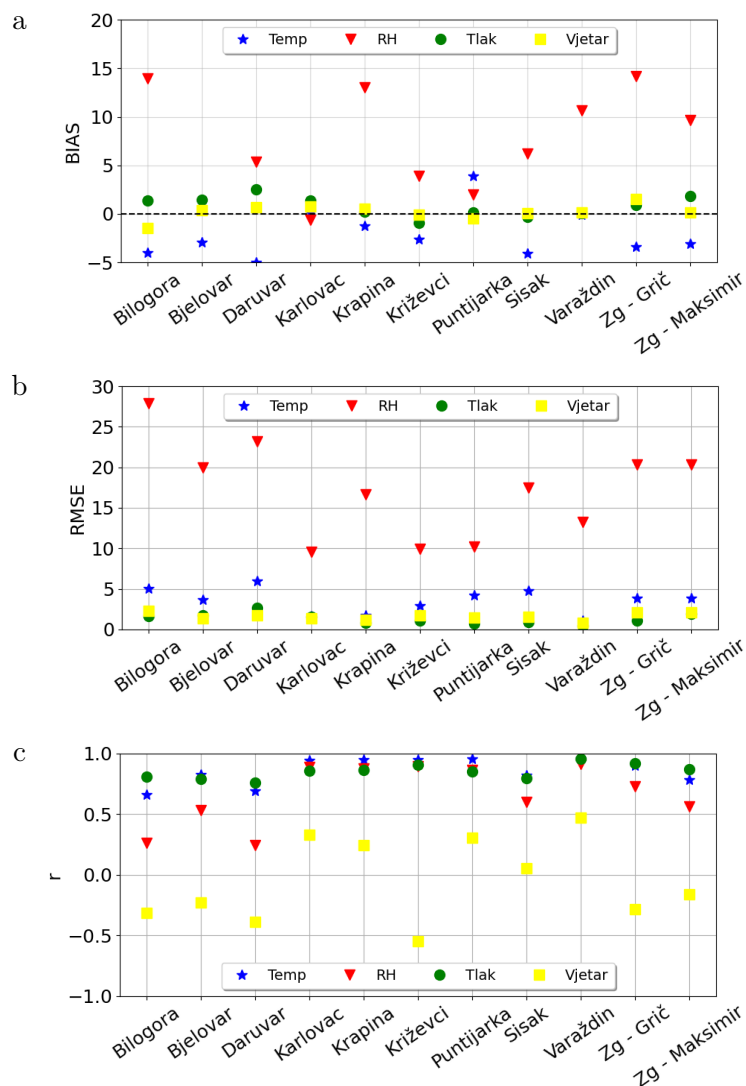
Analiza pristranosti brzine vjetra ukazuje na to da model nema sustavnu tendenciju precjenjivanja ili podcjenjivanja brzine vjetra. Naime, približno jednak broj postaja pokazuje pozitivnu i negativnu pristranost. Vrijednosti pristranosti ostaju unutar granica od $\pm 3 \text{ m s}^{-1}$ za brzinu vjetra. Primjetno je da se na istim postajama često događa podcjenjivanje ili precjenjivanje brzine vjetra. Iznosi RMSE za brzinu vjetra također pokazuje određenu pravilnost. Usporedbom ta dva odabrana događaja vidljivo je da postoje postaje s većim ili manjim odstupanjima u oba slučaja. Što se tiče koeficijenta korelacije, rezultati su manje zadovoljavajući. U slučaju događaja 25. svibnja 2022., većina postaja pokazuje vrlo male koeficijente korelacije. Samo su postaje Karlovac, Puntijarka, Varaždin i Zagreb - Grič ostvarile korelaciju od 0,5 ili veću. Na drugim postajama zabilježena je izuzetno slaba korelacija, bilo pozitivna ili negativna. Što se tiče događaja 2. lipnja 2022., samo postaja Varaždin pokazuje pozitivnu korelaciju od 0,5, dok druge postaje također imaju slabe korelacije. Postaja Križevci čak ostvaruje korelaciju od -0,5. Ovi rezultati mogu se objasniti ranim dolaskom konvektivnog sustava u modeliranom scenariju i netočnom prognozom njegove putanje.



Slika 3.9. Statističke veličine 25. svibnja 2022. - (a) pristranost (BIAS), (b) korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE), (c) koeficijent korelacije (r) za temperaturu zraka (plavo), relativnu vlagu (crveno), tlak zraka (zeleno) i brzinu vjetra (žuto) za odabrane postaje.

3.3. Evaluacija konvektivnih osobina – tuča i munje

Meteorološke pojave poput tuče ili munja su rijetki događaji koji se ne mogu pouzdano procijeniti pomoću standardnih statističkih metoda, kao što je to učinjeno u prethodnom poglavlju. Ove pojave su vrlo lokalne i prostorno varijabilne te se mogu izuzetno brzo razviti. Kao rezultat toga, njihova analiza zahtijeva specijalizirane metode i alate koji uzimaju u obzir njihovu prirodu i karakteristike. Statističke metode, iako korisne u mnogim aspektima meteorologije, često nisu prikladne za procjenu pojedinačnih ekstremnih i rijetkih događaja poput tuče ili munje. Umjesto toga, ovakvi događaji se evaluiraju na temelju kvalitativnih analiza, neposrednih opažanja i praćenja njihovih osobina kako bi se bolje razumjela njihova priroda i posljedice.

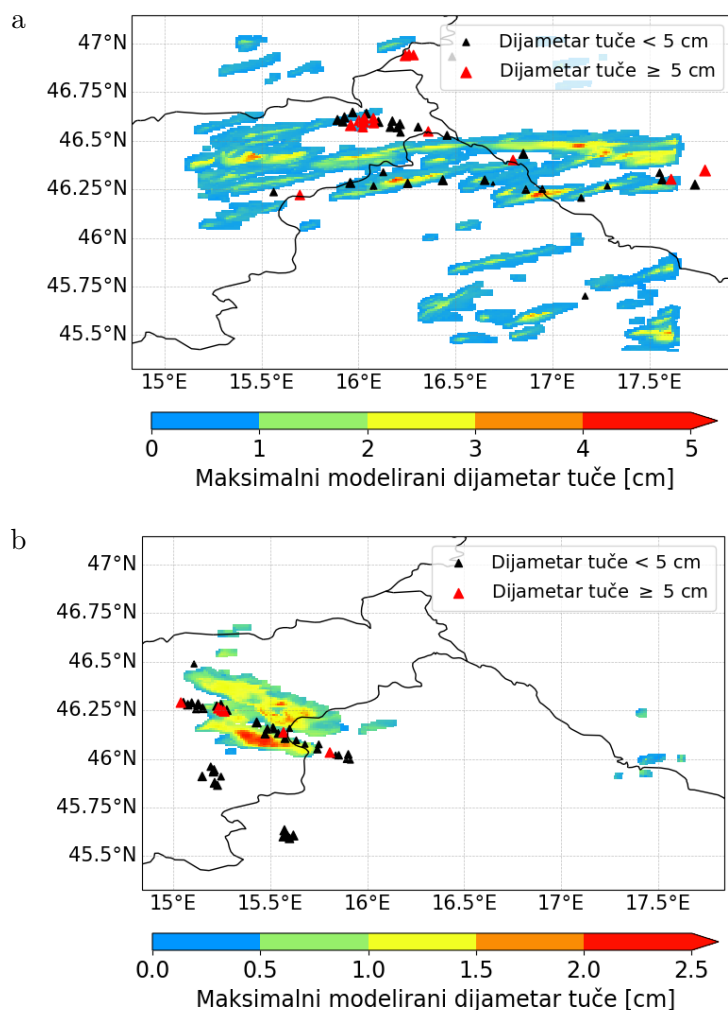


Slika 3.10. Statističke veličine 2. lipnja 2022. - (a) pristranost (BIAS), (b) korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE), (c) koeficijent korelacije (r) za temperaturu zraka (plavo), relativnu vlagu (crveno), tlak zraka (zeleno) i brzinu vjetra (žuto) za odabrane postaje.

3.3.1. Evaluacija tuče

Budući da je model relativno dobro prognozirao intenzitet te vremensku i prostornu raspodjelu konvektivne aktivnosti, moguće je analizirati simulirane događaje tuče. Na slici 3.11 prikazani su maksimalni modelirani dijametri tuče (boje) u oba odabrana slučaja. Dodatno, trokutićima je prikazana tuča koja je prijavljena u bazi podataka ESWD. Crvenom bojom istaknuta su zrna tuče kojima dijametar iznosi 5 cm ili više. Crni trokutići označuju zrna manjih dimenzija, kojima je dijametar od 2 cm do 5 cm. Valja napomenuti da ova baza podataka sadrži informacije samo o velikoj tuči, a to podrazumijeva zrna tuče veličine 2 cm i više. Informacije o zrnima manjim od 2 cm nisu poznate što znači da postoji mogućnost da je tuča manjih dimenzija padala na nekim dijelovima domene, međutim nije bila zabilježena u bazi podataka ESWD. Vidljivo je da je u oba slučaja zabilježeno mnogo slučajeva velike tuče, s time da je 25. svibnja 2022. bilo više tuče promjera većeg od 5 cm nego u slučaju 2. lipnja 2022. Najveće zrno tuče koje je 25. svibnja 2022. prijavljeno u bazi imalo je dijametar 8 cm, a zabilježeno je

mjestu Crvenjak u Podravskoj regiji u Sloveniji. Najveće zrno tuče u slučaju 2. lipnja 2022. bilo je nešto manje, dijametra 5,5 cm te je također bilo prijavljeno u Sloveniji, u gradu Celju.

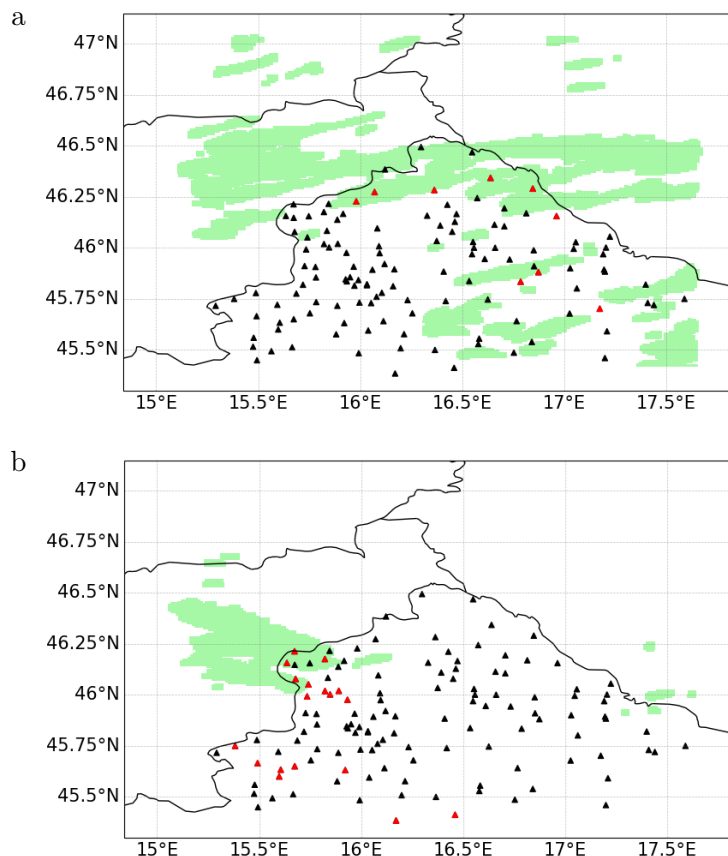


Slika 3.11. Simulirani maksimalni dijametar tuče unutar 24 sata (boja) i pojava tuče zabilježena u bazi podataka ESWD (trokutići) za (a) 25. svibnja 2022. i (b) 2. lipnja 2022. Crni trokutići označavaju tuču promjera manjeg od 5 cm, dok crveni prikazuju tuču dijametra 5 cm i više.

U prvom odabranom slučaju (slika 3.11a), uočava se izuzetno dobro slaganje u prostornoj raspodjeli tuče između modela i stvarnih događaja zabilježenih u bazi podataka. Posebno se to ističe na području sjeverne Hrvatske i dijelu Mađarske. Maksimalni simulirani dijametar tuče na sjevernom dijelu Hrvatske tijekom 24 sata kretao se između 1 cm i 4 cm, što se izuzetno dobro slaže s opaženim dimenzijama tuče. Međutim, model je predvidio tuču u Sloveniji na području gdje takvih događaja nije bilo. Ova neusklađenost može se objasniti promatranim maksimalnim radarskim odrazima, što je rezultiralo lažnom prognozom oborine u toj regiji. Dodatno, na sjeveroistoku Slovenije, zabilježena je tuča s vrlo velikim promjerima zrna, od 5 cm do 8 cm, koju model nije uspio prognozirati. Nekoliko lažnih alarma također je zabilježeno na dijelu Mađarske, Austrije i na jugoistoku domene u Hrvatskoj.

U drugom slučaju (slika 3.11b), model je pokazao iznimno precizno prostorno pre-

dviđanje traga tuče u Sloveniji, premještajući se sa sjeverozapada prema jugoistoku, pri čemu je bilo i ponešto lažnih alarma sjeverno od područja zahvaćenog tućom. Međutim, važno je napomenuti da model nije uspio reproducirati tuću koja je opažena na jugozapadnom dijelu domene, obuhvaćajući dijelove Slovenije i Hrvatske (oko područja Karlovca). Također, model je generalno podcijenio veličinu zrna tuče. Iz slike je vidljivo je je na nekoliko mjesta zabilježena tuća promjera 5 cm i više, dok model nije prognozirao tuću veću od 3 cm unutar cijele domene.



Slika 3.12. Simulirani trag tuče unutar 24 sata i mreža DHMZ-ovim prizemnih postaja za (a) 25. svibnja 2022. i (b) 2. lipnja 2022. Crni trokutići označavaju postaje na kojima nije bilo tuče, a crvene one na kojima je tuća opažena.

Na slici 3.12 prikazan je simulirani trag tuče i raspored DHMZ-ovih prizemnih meteoroloških postaja, koje uključuju glavne meteorološke, klimatološke i kišomjerne postaje. Crni trokutići označavaju postaje na kojima tuća nije opažena, dok crveni trokutići označavaju postaje na kojima je tuća zabilježena. U ovom koraku analize, naglasak je stavljen na izračun kategoričkih metrika koje omogućuju procjenu uspješnosti modela u reprodukciji tuče, s posebnim fokusom na područje Hrvatske. Dodatno, promatralo se i ako je tuća simulirana unutar 15 km oko postaje na kojoj je tuća opažena - ako je, onda se i ta postaja smatrala pogotkom.

Rezultati metrika prikazani su u tablici 3.1. U prvom slučaju (S1 u tablici 3.1) rezultati su iznimno dobri, s obzirom na to da se modelirana tuća u potpunosti podudara s opaženom tućom na svim postajama gdje je tuća bila zabilježena. F iznosi samo 0,07, što ukazuje da je samo na tri postaje model lažno prognozirao tuću koja se nije stvarno dogodila. Zbog visoke stope ispravno detektirane tuče (POD), EDI prikazuje

vrijednost 1, što proizlazi iz formule (tablica 3.1). Međutim ovaj se rezultat ipak treba razmatrati s određenim oprezom, budući da je prema slici 3.11a vidljivo kako je model imao mnogo lažnih alarma i neprognoziranih događaja na području sjeveroistočne Slovenije. Za vjerodostojniju evaluaciju modela, trebala bi se napraviti detaljnija analiza, uzevši u obzir mjerenja tuče iz slovenske mreže prizemnih postaja koja nisu bila dostupna u ovom istraživanju.

Tablica 3.1. Kategoričke metrike za odabrane slučajeve.

	POD	F	EDI
S1	1	0,07	1
S2	0,56	0,03	0,72

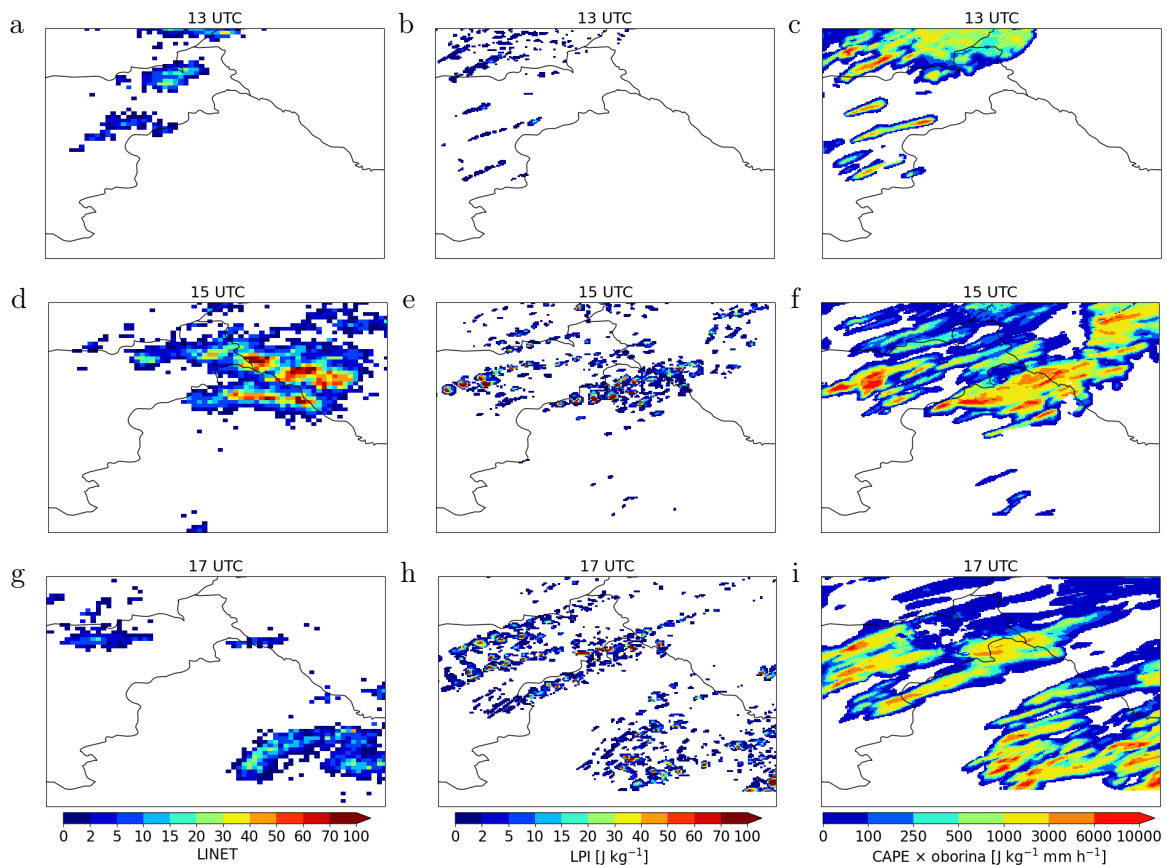
Drugi slučaj koji se dogodio dana 2. lipnja 2022. (S2 u tablici 3.1) pokazuje nešto niže rezultate u usporedbi s prvim slučajem, no i dalje su zadovoljavajući. Model je točno prognozirao dio Hrvatskog zagorja na kojem je tuča opažena, dok su niži rezultati u kategoriji POD posljedica toga što model nije predvidio tuču na jugozapadnom i južnom dijelu domene (Žumberak i Pokuplje), iako je bila stvarno opažena na nekoliko postaja. Vrijednost F je niska jer je samo na tri postaje tuča lažno prognozirana.

Ovi rezultati sugeriraju da je model uspješno reproducirao tuču na većini postaja na kojima je opažena, posebno u prvom slučaju, uz malo lažnih alarma u oba slučaja. Kao i u prethodnom slučaju, za precizniju evaluaciju modela, bila bi korisna dostupnost mjerenja tuče iz slovenske mreže prizemnih postaja. Na osnovu slike 3.11b, jasno je da je model vrlo točno reproducirao pojavu tuče u Sloveniji, stoga bi te podatke trebalo uključiti u procjenu modela kako bi se dobio sveobuhvatan uvid u njegovu uspješnost.

3.3.2. Evaluacija munja

Rezultati prognozirane aktivnosti munja su kvalitativno evaluirani pomoću mjerenja udara munja iz mreže LINET. Osim izračuna LPI-a pomoću integrala danog u formuli 2.1, koristila se i metoda koja množi CAPE u danom vremenskom trenutku s oborinom koja se akumulirala unutar sat vremena od tog trenutka. Dobiveni rezultati prikazani su na slici 3.13 za prvi slučaj i slici 3.14 za drugi slučaj. Na slikama se prvi stupac odnosi na mjerenja munja dobivenih iz LINET mreže, središnji stupac na modelirani LPI dobiven iz formule 2.1, dok se posljednji stupac odnosi na procjenu aktivnosti munja preko metode $CAPE \times$ oborina.

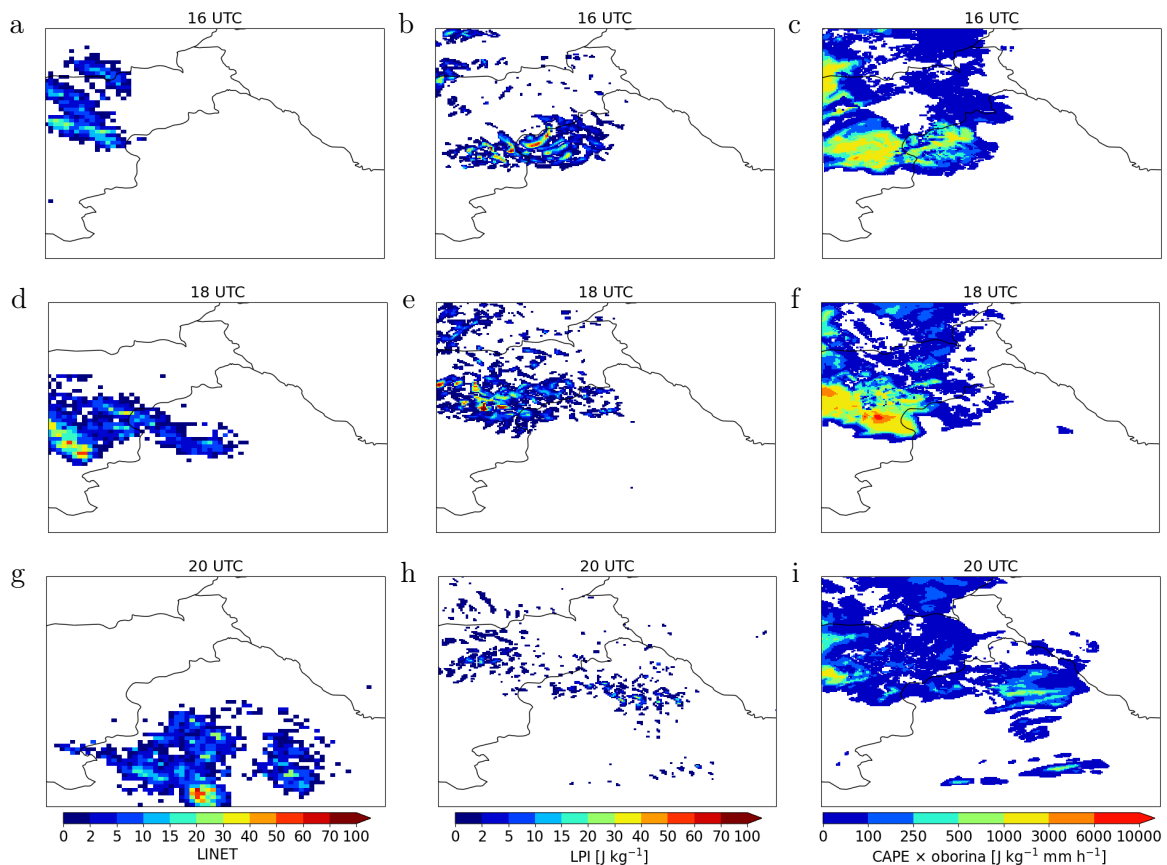
U prvom slučaju dana 25. svibnja 2022., analizirana je prostorna razdioba munja od 13 do 17 UTC, što se podudaralo s prolaskom konvektivnog sustava iznad sjeverne Hrvatske. Uočljivo je da je model vrlo precizno simulirao dolazak tog sustava na područje Hrvatske te je usklađen sa stvarnim udarima munja. Prolaskom sustava kroz Hrvatsku, usporedbom s mjerenjima iz LINET mreže, primjećuje se iznimno dobra korelacija s prostornim rasporedom potencijala za generiranje munja (slika 3.13e). Međutim, treba napomenuti da je LPI precijenjen na području Slovenije, gdje se već u prethodnim poglavljima diskutiralo o lažnim alarmima za tuču i lažnoj simulaciji oborine. Ovaj obrazac se zadržava i kasnije, uz ispravno predviđeno područje s visokim potencijalom za munje na jugoistočnom dijelu domene (slika 3.13h).



Slika 3.13. (a, d, g) Izmjereni udari munja iz mreže LINET, simulirani LPI-a dobiven (b, e, h) prema jednadžbi (2.1) i (c, f, i) procjena aktivnosti munja pomoću metode $\text{CAPE} \times \text{oborina}$ za 25. svibnja 2022., 13 - 17 UTC.

Odmah se može primijetiti da je metoda proračuna aktivnosti munja kao umnoška CAPE-a i oborine bila manje uspješna. Već je u prvom koraku primjetna precijenjenost intenziteta i prostornog rasporeda potencijala za generiranje munja (slika 3.13c). Nadalje, u 15 UTC (slike 3.13f) dobro je simulirana prostorna razdioba munja iznad sjeverne Hrvatske i dijela Mađarske, ali je ponovno vidljiv utjecaj lažno simulirane oborine u Sloveniji, što izravno utječe na rezultate zbog uključivanja količine oborine u izračun. Na posljednjoj slici ponovno su vidljivi mnogi lažni alarmi na sjeveroistočnom dijelu domene i sjevernom dijelu Hrvatske, ali unatoč tome, model je precizno simulirao prisutnost munja na jugoistoku domene (slika 3.13i).

Rezultati za lipanjski slučaj prikazani su na slici 3.14. Ponovno je vidljivo da je model simulirao raniji dolazak konvektivnog sustava na područje Hrvatske u odnosu na stvarne događaje. Međutim, kad usporedimo te simulacije s mjerenjima iz LINET mreže, možemo zaključiti da LPI (iz jednadžbe (2.1)) prilično precizno opisuje prostornu razdiobu munja. Najveće odstupanje od mjerenja izdvaja se na slici 3.14h, gdje ponovno vidimo da je model krivo simulirao putanju kretanja sustava prema istoku umjesto prema jugoistoku, što je bilo podržano visokim potencijalom za munje na slovenskom području.



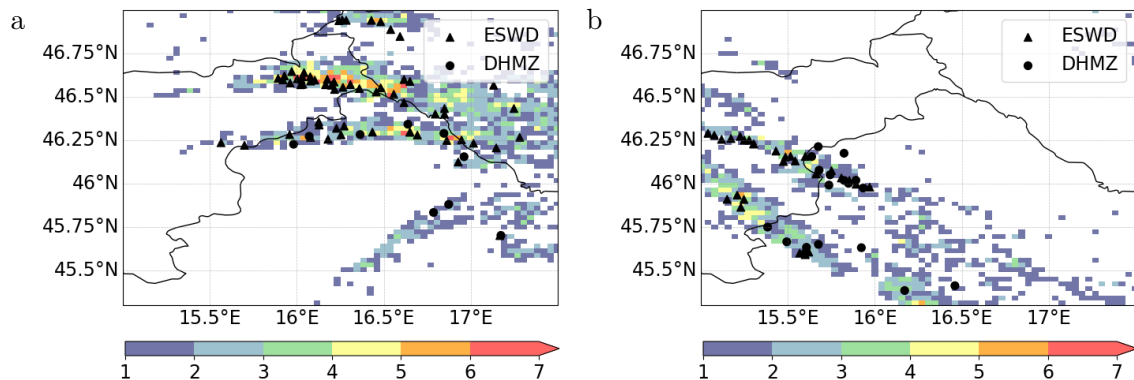
Slika 3.14. (a, d, g) Izmjereni udari munja iz mreže LINET, simulirani LPI-a dobiven (b, e, h) prema jednadžbi (2.1) i (c, f, i) procjena aktivnosti munja pomoću metode $\text{CAPE} \times \text{oborina}$ za 2. lipnja 2022., 16 - 22 UTC.

Metoda $\text{CAPE} \times \text{oborina}$ i u ovom slučaju pokazuje precjenjivanje prostorne raspodjele munja kao i intenzitet. Već je u prvom koraku simuliran potencijal za razvoj munja nad Hrvatskom kada munje uopće nisu izmjerene (slika 3.14c). U kasnijem trenutku i dalje je precijenjen na području sjeverne Slovenije, međutim najveći potencijal dan je upravo na mjestu gdje je i zabilježeno najviše udara munja (slika 3.14f). Ovo se također može usporediti s prostornom raspodjelom tuče budući da su na području na kojem je izmjereno najviše udara munja bila opažena i najveća zrna tuče. U kasnijem trenutku (slika 3.14i) ponovno se vidi manje uspješna simulirana putanja sustava i praćene oborine što je kao posljedicu precijenilo aktivnost munja u Sloveniji i sjevernoj Hrvatskoj.

Na slici 3.15 prikazan je TSII sumiran unutar 24 sata zajedno s opaženom tučom prijavljenoj u ESWD bazi podataka kao i na DHMZ-ovim prizemnim postajama. Drugim riječima, brojevi na skali označavaju koliko je puta toga dana TSII iznosio 1. Dakle, što je više puta u danu TSII bio preko 1, to znači da je unutar točke mreže veličine $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ više puta opažena intenzifikacija aktivnosti munja što se može povezati s jakom konvektivnom aktivnosti. Rezultati dobiveni za TSII, osim s mjerenjima munja, mogu se dalje uspoređivati i s prostornom raspodjelom izmjerenih vrijednosti tuče budući da se tuča javlja na mjestima gdje je oluja najintenzivnija.

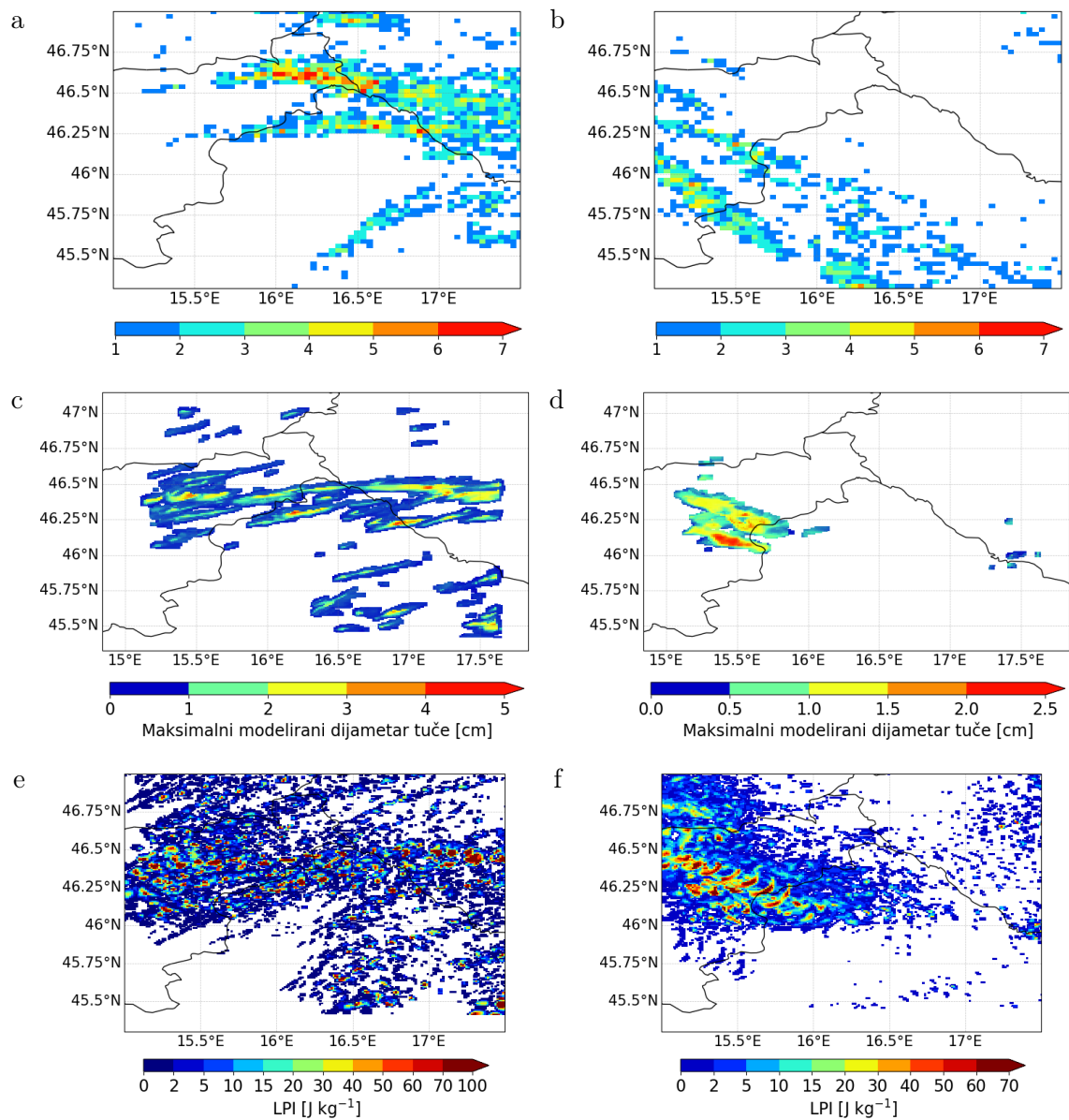
TSII u svibanjskom slučaju (slika 3.15a) pokazuje da je oluja bila najintenzivnija na krajnjem sjeveru Hrvatske i sjeveroistoku Slovenije. Na tim je područjima u nekoliko

točaka domene pet ili šest puta zabilježen nagli pozitivan trend udara munja. Uspoređujući se to s tučom opaženom unutar 24 sata vidljivo je da je upravo na području sjeveroistočne Slovenije, zabilježeno najviše slučajeva tuče. Također, na tom su području toga dana zabilježena i najveća zrna tuče (vidljivo na slici 3.11a). Ostale točke domene uglavnom broje jedan do dva puta u danu kada je TSII bio pozitivan, te je i na tim mjestima ponegdje opažena tuča. Prostorna raspodjela TSII-ja za drugi slučaj (slika 3.15b) pokazuje da je to bila manje intenzivna oluja. Ovdje je samo unutar tri kvadratića domene pet puta zabilježen nagli pozitivan trend udara munja. Usporedbom traga TSII-ja s mjerenjima tuče ponovno je vidljivo da je pojava tuče na području Hrvatske i Slovenije vezana uz područja većeg intenziteta oluje prema TSII-ju.



Slika 3.15. Prostorna razdioba vrijednosti parametra TSII unutar 24 h te opažena tuča iz ESWD baze podataka (trokutići) i s DHMZ-ovim prizemnih postaja (kružići) za (a) 25. svibnja 2022. i (b) 2. lipnja 2022.

Na slici 3.16 ponovno su prikazane prostorne razdiobe TSII-ja unutar 24 sata, ali ovoga puta u usporedbi sa simuliranim poljima tuče i LPI-em. U svibanjskom slučaju vidljivo je da je model dobro reproducirao tuču i LPI na području s intenzivnijom aktivnošću munja u Hrvatskoj. S druge strane, u Sloveniji je LPI unutar 24 h bio precijenjen, osim eventualno na krajnjem sjeveroistoku Slovenije, gdje je aktivnost munja toga dana bila najintenzivnija. Međutim, upravo na tom konvektivno najaktivnijem području model nije reproducirao tuču. U lipanjskom slučaju, model je dobro reproducirao sjeverniji trag pojačane aktivnosti munja što se vidi iz traga simulirane tuče i LPI-a. Međutim, više intenzivne konvektivne aktivnosti bilo je na jugozapadnom dijelu domene, gdje model uopće nije simulirao tuču, niti značajni LPI.



Slika 3.16. (a, b) Prostorna razdioba vrijednosti parametra TSII, (c, d) simulirane tuče i (e, f) LPI unutar 24 h za 25. svibnja 2022. (prvi stupac) i 2. lipnja 2022. (drugi stupac).

4. Zaključak

Dosadašnje analize ukazuju na visoku učestalost konvektivnih oluja, često praćenih tučom, u toplijem dijelu godine na području sjeverozapadne Hrvatske. Dva značajna događaja, zabilježena su u poslijepodnevnim satima 25. svibnja i 2. lipnja 2022. godine, a zbog izraženog intenziteta i uzrokovane štete od tuče, postale su predmetom istraživanja ovog rada. Cilj ovog rada bio je rekonstruirati atmosferske uvjete tijekom dva ekstremna slučaja koristeći visokorazlučivi mezoskalni numerički model WRF. Poseban naglasak bio je na praćenju razvoja konvekcije i formiranju tuče, simulirane s pomoću HAILCAST-a, jednodimenzionalnog algoritma rasta tuče integriranog u model WRF. Osim evaluacije simulirane tuče, cilj je bio procijeniti uspješnost modela u reprodukciji aktivnosti munja, koristeći dva pristupa: računanje LPI-a i metodu CAPE \times oborina. Rezultati tih simulacija dalje su se usporedili s postojećim mjerenjima i opažanjima koja su prikupljena iz raznih izvora, sa svrhom poboljšanja numeričke prognoze tuče.

Za dva odabrana slučaja izvršena je sinoptička i mezoskalna analiza atmosferskih uvjeta koji su dominirali nad područjem od interesa tijekom određenog razdoblja. Pri analizi su se koristile prizemne dijagnostičke karte i karte geopotencijalne visine apsolutne topografije izobarne plohe AT 500 hPa. Također korištena su i radiosondažna mjerenja s postaje Zagreb - Maksimir. Oba slučaja obilježila je slična sinoptička situacija - Hrvatska se nalazila pod utjecajem prednje strane doline te je u poslijepodnevnim satima fronta zahvatila sjever Hrvatske donoseći pritom sustav konvektivnih oblaka u kojima je bilo i velike tuče. Također, bile su dostupne arhivske radarske slike DHMZ-a s Radarskog centra Bilogora koje su se koristile za kvalitativnu usporedbu modelskog i izmjerenog dBz-a. Iz modelskog i stvarnog radarskog odraza vidljivo je kako je model bolje reproducirao vremensku i prostornu rasprostranjenost oluje u slučaju 25. svibnja 2022., dok je u slučaju 2. lipnja 2022. simulirao raniji dolazak sustava na područje Hrvatske te manje uspješno reproducirao smjer kretanja oluje. Nadalje, za procjenu sposobnosti modela u reprodukciji prizemnih atmosferskih uvjeta, korištena su prizemna meteorološka mjerenja temperature zraka, relativne vlage, tlaka zraka i brzine vjetra s glavnih postaja DHMZ-a unutar domene od najvećeg interesa (d03).

Budući da se iz radarskog odraza vidjelo da je model relativno dobro prognozirao intenzitet te vremensku i prostornu raspodjelu konvektivne aktivnosti, u daljnjoj analizi evaluirale su se konvektivne osobine oluje - tuča i munje. Uspješnost prognoze ovakvih događaja ocjenjuje se na temelju kvalitativnih analiza, neposrednih opažanja i praćenja njihovih osobina. Opažanja tuče prikupljena su iz mreže prizemnih meteoroloških postaja DHMZ-a kao i iz europske baze podataka o ekstremnim događajima ESWD-a. Dodatno, za opažanja tuče na prizemnim DHMZ-ovim postajama računale su se mjere uspješnosti za rijetke događaje (POD, F i EDI) pri čemu se koristila tzv. „fuzzy“. U svibanjskom slučaju postoji izuzetno dobro slaganje u prostornoj raspodjeli tuče između modela i opažanja na području Hrvatske, dok je u sjeveroistočnoj Sloveniji, model ipak precijenio tuču. Rezultati metrika u prvom slučaju iznimno su dobri s obzirom na to da se modelirana tuča u potpunosti podudara s opaženom tučom na svim postajama (na području Hrvatske) gdje je tuča bila zabilježena. Vrijednost F iznosi svega 0,07 što ukazuje da je bilo vrlo malo lažnih alarma. U lipanjskom slučaju model je uspješno prognozirao tuču u Sloveniji, međutim nije uspio reproducirati tuču na jugozapadnom dijelu domene (točnije oko područja Karlovca), obuhvaćajući dijelove Slovenije i Hrvatske. Osim toga, model je podcijenio veličinu zrna tuče. Rezultati

metrika u ovom su slučaju nešto niži ($POD = 0,56$ i $EDI = 0,72$) zbog manje uspješne prognoze tuče u jugozapadnom i južnom dijelu domene, dok je vrijednost F niska zbog malo lažnih alarma. Rezultati u oba slučaja sugeriraju da je model uspješno simulirao tuču na većini postaja na kojima je ona opažena, uz mali broj lažnih alarma. Međutim, ove rezultate treba razmatrati s određenim oprezom, budući da je račun metrika proveden samo na području Hrvatske, a u prvom je slučaju na području Slovenije bilo mnogo lažnih alarma i neprognozirane tuče. Za temeljitiju evaluaciju modela, preporučuje se provesti detaljnu analizu koja uključuje i mjerenja tuče iz slovenske mreže prizemnih postaja koja nisu bila dostupna u ovom istraživanju. Za procjenu aktivnosti munja korištene su dvije metode: izračun LPI-a te metoda $CAPE \times$ oborina koje su se potom uspoređivale s mjerenjima udara munja iz LINET mreže. U oba slučaja LPI (izračunat prema jednadžbi 2.1) pokazuje bolje slaganje s mjerenjima nego $CAPE \times$ oborina metoda koja precjenjuje prostornu pokrivenost kao i intenzitet munja. Na kraju su još rezultati dobiveni za TSII uspoređeni s prostornom raspodjelom izmjerenih vrijednosti tuče budući da se tuča javlja na mjestima pojačanog intenziteta oluje. U oba slučaja pokazano je da je na mjestima na kojima je više puta opažena intenzifikacija aktivnosti munja (TSII je nekoliko puta u danu bio veći od 0) također opaženo i najviše slučajeva tuče.

Iako rezultati ove analize pokazuju da je model općenito dao bolju prognozu za slučaj iz 25. svibnja 2022., za temeljitu analizu te sveobuhvatan uvid u uspješnost modela trebalo bi razmatrati više od dva slučaja. U tom procesu analize višemjesečnog testiranja kao i združeni pristup analize izlaznih rezultata dodatnih meteoroloških polja (osobito onih koji opisuju tuču i munje) s primjenom strojnog učenja, mogao bi dati bolje rezultate i bolju prognozu tuče. Time se otvara prostor daljnjeg usavršavanja izrada prognoza ekstremnih pojava kao što su tuča i munje u budućim istraživačkim studijama.

Literatura

- Adams-Selin, R. D., Ziegler, C. L. (2016) Forecasting hail using a one-dimensional hail growth model within WRF. *Monthly Weather Review*, 144, 4919–4939.
- Betz, H. D., Schmidt, K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W. P., Defer, E., Dzewit, Z., Konarski, J. (2009) LINET - An international lightning detection network in Europe. *Atmospheric Research* 91, 564–573.
- Brimelow, J. C., Reuter, G. W., Poolman, E. R. (2002) Modeling maximum hail size in Alberta thunderstorms. *Weather and Forecasting* 17, 1048–1062.
- Brisson, E., Blahak, U., Lucas-Picher, P., Purr, C., Ahrens, B. (2021) Contrasting lightning projection using the lightning potential index adapted in a convection-permitting regional climate model. *Climate Dynamics* 57, 2037–2051.
- Dotzek, N., P. Groenemeijer, B. Feuerstein, A. M. Holzer, (2009) Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. *Atmospheric Research* 93, 575–586.
- Dudhia, J. (1989) Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46, 3077–3107.
- Ferro, C. A. T., Stephenson, D. B. (2011) Extremal Dependence Indices: Improved verification measures for deterministic forecasts of rare binary events. *Weather and Forecasting* 26, 699–713.
- Foote, G. B. (2016) A study of hail growth utilizing observed storm conditions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 23, 84–101.
- Gelo, B. (2005) *Meteorološki pojmovnik i višejezični rječnik : hrvatski, engleski, njemački i francuski jezik*. Državni hidrometeorološki zavod : Hinus.
- Holton, J. R. (2004) *An introduction to dynamic meteorology: Fourth edition*. Elsevier Academic Press.
- Hong, S., Lim, J. (2006) The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society*, 42, 129–151.
- Houze, Jr, R. A. (2014) *Cloud dynamics: Second edition*. Elsevier Academic Press.
- Jelić, D. (2022) *Obilježja tuče u sadašnjim i budućim klimatskim uvjetima na području Hrvatske*. Doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- Jewell, R., Brimelow, J. (2008) Evaluation of Alberta hail growth model using severe hail proximity soundings from the United States. *Weather and Forecasting* 24, 1592–1609.
- Jolliffe, I. T., Stephenson, D. B. (2003) *Forecast verification: A practitioner's guide in atmospheric science*. John Wiley & Sons

- Kain, J. S. (2004) The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 43, 170–181.
- Kain, J. S., Weiss, S. J., Levit, J. J., Baldwin, M. E., Bright, D. R. (2006) Examination of convection-allowing configurations of the WRF model for the prediction of severe convective weather: The SPC/NSSL spring program 2004 *Weather and Forecasting* 21, 167–181.
- Katz, R. W., Murphy, A.H. (1997) Economic value of weather and climate forecasts. Cambridge University Press: Cambridge, New York.
- Knight, C. A., Ehhalt, D. H., Roper, N., Knight, N. C. (1975) Radial and tangential variation of deuterium in hailstones. *Journal of the Atmospheric Sciences* 32, 1990–2000.
- Lynn, B. H., Yair, Y. Y. (2008) Lightning Power Index: A new tool for predicting the lightning density and the potential for extreme rainfall. *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 10)
- Markowski, P., Richardson, Y. (2010) *Mesoscale meteorology in midlatitudes*. Penn State University, University Park, PA, USA : John Wiley & Sons.
- Mikuš, P., Telišman Prtenjak, M., Strelec Mahović, N. (2012) Analysis of the convective activity and its synoptic background over Croatia. *Atmospheric Research* 104-105, 139–153.
- Mikuš Jurković, P. (2017) *Satelitske karakteristike i grmljavinska aktivnost intenzivnih konvektivnih oluja*. Doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., Clough, S. A. (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102, 16663-16682.
- Nelson, S. P., Young, S. K. (1979) Characteristics of Oklahoma hailfalls and hailstorms. *Journal of Applied Meteorology* 18, 339-347.
- Nakanishi, M., Niino, H. (2006) An improved Mellor–Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog *Boundary-Layer Meteorology* 119, 397–407.
- Počakal, D. (2012) *Energija zrna tuče u kontinentalnom dijelu Hrvatske*. Doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- Počakal, D., Večenaj, Ž., Mikuš Jurković, P., Grisogono, B. (2018) Analysis of orographic influence on hail parameters in NW Croatia. *International Journal of Climatology* 38, 5646–5658.
- Poolman, E. R. (1992) Die voorspelling van haelkorrelgroei in Suid-Afrika (The forecasting of hail growth in South Africa). M.S. thesis, Faculty of Engineering, University of Pretoria

- Pruppacher, H. R., Klett, J. D. (1997) *Microphysics of clouds and precipitation: Second edition*. Kulwer Academic Publishers
- Púčik, T., Castellano, C., Groenemeijer, P., Kühne, T., Rädler, A., Antonescu, B., Faust, E. (2019) Large hail incidence and its economic and societal impacts across Europe. *Monthly Weather Review* 147, 3901–3916.
- Punge, H. J., Kunz, M. (2016) Hail observations and hailstorm characteristics in Europe: A review. *Atmospheric Research* 176-177, 159–184.
- Rädler, A.T., Groenemeijer, P. H., Faust, E., Sausen, R., Púčik, T. (2019) Frequency of severe thunderstorms across Europe expected to increase in the 21st century due to rising instability. *Climate and Atmospheric Science* 2, 2–30.
- Reynolds, S. E., Brook, M., Gourkey, M. F. (1957) Thunderstorm charge separation. *Journal of Meteorology* 14, 426-436.
- Romps, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D., Molinari, J. (2014) Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science* 346, 851-854.
- Saunders, C. (2008) Charge separation mechanisms in clouds. *Space Science Reviews* 137, 335–353.
- Stull, R. (2015) *Practical meteorology: An algebra-based survey of atmospheric science*. University of British Columbia
- Wapler, K. (2017) The life-cycle of hailstorms: Lightning, radar reflectivity and rotation characteristic. *Atmospheric Research* 193, 60–72.
- Weisman, M. L., Skamarock, W. C., Klemp, J. B. (1997) The resolution dependence of explicitly modeled convective systems *Monthly Weather Review* 125, 527–548.
- WMO (1975) International cloud atlas manual on the observation of clouds and other meteors (WMO-No. 407), Dostupno na: <https://cloudatlas.wmo.int/en/home.html>
- Yair, Y. (2008) Charge generation and separation processes. *Space Science Reviews* 137, 119–131.