

# Numeričke simulacije tuče i indeksa potencijalnog razvoja munja nad Hrvatskom

---

**Malečić, Barbara**

**Doctoral thesis / Doktorski 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:217:384968>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-03**



*Repository / Repozitorij:*

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





University of Zagreb

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Barbara Malečić

**NUMERIČKE SIMULACIJE TUČE I INDEKSA  
POTENCIJALNOG RAZVOJA MUNJA NAD  
HRVATSKOM**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2023.



Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Geofizički odsjek

Barbara Malečić

**NUMERIČKE SIMULACIJE TUČE I INDEKSA  
POTENCIJALNOG RAZVOJA MUNJA NAD  
HRVATSKOM**

DOKTORSKI RAD

Mentori:

izv. prof. dr. sc. Maja Telišman Prtenjak

dr.sc. Kristian Horvath, viši znanstveni suradnik

Zagreb, 2023.



University of Zagreb

Faculty of Science

Department of Geophysics

Barbara Malečić

**NUMERICAL SIMULATION OF HAILSTORMS  
AND LIGHTNING POTENTIAL INDEX OVER  
CROATIA**

DOCTORAL THESIS

Supervisors:

Assoc Prof Maja Telišman Prtenjak, PhD

Kristian Horvath, PhD, SR Rsch Assoc



Ova disertacija u potpunosti je napisana na Prirodoslovno matematičkom fakultetu, Geofizičkom odsjeku kao dio doktorskog studija fizike, smjera geofizike. Istraživanje prezentirano u ovom radu dio je projekta SWALDRIC, IZHRZO-180587 (*Severe Weather over the Alpine-Adriatic Region*) i projekta HrZZ-a za mlade istraživače; "Projekt razvoja karijera mladih istraživača - izobrazba novih doktora znanosti".

Mentorica izv. prof. dr. sc. Maja Telišman Prtenjak profesorica je na Prirodoslovno matematičkom fakultetu, Geofizičkom odsjeku.

Mentor dr.sc. Kristian Horvath načelnik je Sektora za meteorološka istraživanja i razvoj Državnog hidrometeorološkog zavoda.

## Informacije o mentorima:

**Maja Telišman Prtenjak** diplomirala je na PMF-u u Zagrebu (1995.), magistrirala je 2001., i doktorirala 2006. godine na Sveučilištu u Zagrebu. Od 1996. godine radi pri Geofizičkom odsjeku PMF-u Sveučilišta u Zagrebu, trenutno u zvanju izvanredne profesorice i znanstvene savjetnice. Dobitnica je Nagrade za znanstvenu izvrsnost MZOŠ-a 2009. te nagradu PMF-a za 2022. Usavršavala se u inozemstvu (Francuska (Meteo-France), Španjolska (UIB), Italija (ICTP), Srbija (Sveučilište Novi Sad)) na nekoliko kraćih specijalizacija i sudjelovala na nizu međunarodnih konferencija/radionica. Maja Telišman Prtenjak je ili je bila članica triju uredničkih odbora časopisa (Geofizika, *Meteorology and Atmospheric Physics* i Hrvatski meteorološki časopis) te je bila članica desetak organizacijskih/znanstvenih odbora međunarodnih znanstvenih i znanstveno-stručnih skupova i radionica. Sudjelovala je u radu više znanstvenih i stručnih međunarodnih i domaćih projekata, kao suradnik (njih 11) i kao voditelj (njih 6). Do sada je koautorica na oko 45 znanstvenih radova i na oko 130 konferencijskih priopćenja u suradnji s domaćim i inozemnim suradnicima. Održala je 2 pozvana predavanja. Recenzirala je više međunarodnih i domaćih projekata i oko 60 radova za više renomiranih međunarodnih i domaćih časopisa. Do sada je bila mentor/komentor u 4 rada za Rektorovu nagradu, 22 diplomskih rada i 4 završena doktorata, a 3 doktorata su u završnoj fazi. Fokus rada je na mezoskalnim meteorološkim fenomenima (s posebnim osvrtom na opasne vremenske prilike kao što su tuča, munje, mraz, jak vjetar, šumski požari itd.) nad kompleksnom topografijom u sadašnjim i budućim klimatskim uvjetima koristeći i mjerenja te mezoskalne numeričke (prognostičke i klimatske) modele.

**Kristian Horvath** diplomirao je na PMF-u u Zagrebu (2002.) i doktorirao (2008.) na Sveučilištu u Zagrebu. Viši znanstveni suradnik postaje 2018. Od 2002. godine radi na DHMZ-u, od 2021. godine kao načelnik Sektora za meteorološka istraživanja I razvoj. Predstavnik je DHMZ-a u stručnim tijelima WMO-a, ECMWF-a, EUMETNET-a. Usavršavao se u SAD (NCAR, DRI), Danskoj (Risø DTU), Španjolskoj (UIB) i Mađarskoj (HMS). Publicirao je 36 članaka s međunarodnom recenzijom te izradio 111 konferencijskih priopćenja u suradnji s domaćim i inozemnim suradnicima. Sudjelovao je na 19 domaćih i međunarodnih projekata, od čega kao voditelj na 2 te kao voditelj projektne grupe DHMZ-a na njih 6. Mentor je na tri završena doktorata, dva su u završnoj fazi, te je vanjski evaluator domaćih i stranih doktorata. Evaluator je projekata za HRZZ, Europsku komisiju (H2020), INTERREG programe i druge fondacije. Dobitnik je dvije međunarodne nagrade za mlade znanstvenike (EGU, EMS), dvije nagrade za inovacije iz područja primjene meteoroloških informacija u energetici (*Inventum*, ARCA). Održao je 6 pozvanih predavanja. Stalni je član vanjskog tijela Mađarske akademije znanosti i umjetnosti te je bio višegodišnji član Hrvatskog povjerenstva za geodeziju i geofiziku pri HAZU. Sudjelovao je u radu 11 znanstvenih i organizacijskih odbora međunarodnih znanstveno-stručnih skupova. Bio je ili jest član dva urednička odbora časopisa (*Tethys* i HMČ) te je bio urednik jedne knjige. Primarno se bavi numeričkom prognozom vremena i asimilacijom podataka, mezoskalnim meteorološkim fenomenima (s posebnim osvrtom na ekstremne vremenske prilike kao što su jaka oborina, olujni vjetar, tuča, meteorološki tsunamiji itd.) te klimatologijom vjetra i vjetrovnih ekstrema koristeći mezoskalne numeričke modele atmosfere visoke razlučivosti.

## Zahvala

*S poštovanjem želim izraziti svoju iskrenu zahvalnost za završetak ovog doktorskog rada koji predstavlja značajnu prekretnicu u mom životu. Kroz ovaj rad oblikovali su se temelji mojih znanja, iskustava i načina razmišljanja, te su se postavile smjernice za razvoj moje buduće karijere.*

*Nemoguće je ne spomenuti veliku podršku koju sam primila od mnogih ljudi i institucija koje su na svoj način pridonijele ostvarenju ovog uspjeha. Stoga želim iskreno zahvaliti izv. prof. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak, mojoj prvotnoj mentorici, na ukazanom povjerenju, podršci i razumijevanju koje je pružila. Njezina stručnost i moralna podrška bile su od ključne važnosti tijekom ovog procesa. Zahvaljujem i dr. sc. Kristianu Horvathu, mome drugom mentoru, na iskazanom povjerenju, brojnim diskusijama, korisnim sugestijama i savjetima te moralnoj podršci koju je pružao.*

*Posebnu zahvalu želim uputiti Sektoru za meteorološka motrenja i klimatološke podatke Državnog hidrometeorološkog zavoda, čije su neprestano prikupljanje meteoroloških mjerenja i opažanja omogućile ovaj rad. Zahvaljujem i tvrtki Ubimet GmbH na ustupanju mjerenja iz LINET baze podataka o munjama. U ovom radu također je korištena operativna analiza te ERA5 reanaliza Europskog centra za srednjoročnu prognozu vremena (ECMWF) kao i model WRF te COSMO. Zahvaljujem se NASA-i za pružanje IMERG produkta satelitskih procjena oborine. Posebnu zahvalu upućujem i Švicarskoj meteorološkoj službi (MeteoSwiss) za pružanje radarskih produkata procjene tuče.*

*Veliku zahvalnost želim izraziti i Centru za napredno računanje i modeliranje Sveučilišta u Rijeci te Sveučilišnom računskom centru Sveučilišta u Zagrebu za ustupanje računalnih resursa potrebnih za izvršavanje simulacija.*

*Posebnu zahvalu upućujem i suradnicima na projektu SWALDRIC sa ETH Zurich. Bez njihove podrške, strpljenja, vrijednih diskusija i sugestija dobar dio ovog rada ne bi bilo moguće. Posebno se zahvaljujem i na pružanju LPI koda bez kojeg dobar dio prikazane analize ne bi bio moguće.*

*Također, želim se zahvaliti svim suradnicima na projektu SWALDRIC koji su uvijek bili spremni za diskusiju rezultata i pružanje podrške.*

*Posebna zahvala članovima za ocjenu doktorskog rada izv. prof. dr. sc. Željku Večenaju, prof. dr. sc. Danijelu Belušiću i doc. dr. sc. Nikolini Ban na uloženom trudu i vremenu, konstruktivnim komentarima, sugestijama i raspravama koje su ovaj rad učinile još potpunijim.*

*Veliko hvala kolegama Damjanu Jeliću, Heleni Latečki, Sari Ivasić, Luciji Blašković, Branimiru Omaziću, ali i ostalim kolegama na svim suradnjama i moralnoj podršci te svim kavama na kojima smo raspravljali o našim analizama i time gradili svoj istraživački rad.*

*Za kraj, od srca zahvaljujem svojoj obitelji na bezuvjetnoj podršci, razumijevanju, požrtvornosti i ljubavi koju su mi pružili na ovom putu.*

*U Zagrebu, kolovoz 2023.*

# Sažetak

Tuča i munje, jedan su od produkata olujnog vremena koji su povezani sa značajnim ekonomskim gubitcima u prometu, energetici, poljoprivredi, građevini i još nekim drugim granama gospodarstva. Iako relativno česte pojave na našem području, još uvijek predstavljaju izuzetno izazovan fenomen za simulaciju meteorološkim modelima i prognozu. Ovo proizlazi iz činjenice da procesi odgovorni za formaciju tuče i munja unutar olujnog oblaka još uvijek nisu u potpunosti poznati. Kako je tuča izuzetno lokalna pojava, jedan od najvećih izazova prilikom analize karakteristika tuče jest nedostatak izravnih mjerenja tuče na tlu.

Tijekom godina razvijeni su dijagnostički alati za simulaciju opažene tuče i munja – HAILCAST i indeks potencijalnog razvoja munja (engl. *Lightning potential index*, LPI). U ovom radu korištene su HAILCAST i LPI dijagnostike združene s modelom WRF (engl. *Weather and Research Forecast*) fine razlučivosti. Svrha je istraživanje sposobnosti modela WRF da reproducira atmosferske uvjete prisutne prilikom pojave tuče i munja u Hrvatskoj, ali i široj Alpsko-jadranskoj regiji te sposobnosti dijagnostičkih alata da reproduciraju opažene karakteristike tuče i munja. Provedena je detaljna analiza osjetljivosti rezultata modela WRF na odabir shema parametrizacije mikrofizike i atmosferskog graničnog sloja. Ispitana je robusnost rezultata modela WRF usporedbom s rezultatima mezoskalnog modela COSMO (engl. *Consortium for Small Scale Modelling*) (korištenog u nekoliko zemalja srednje Europe) prilikom simulacije slučaja tuče iznad Alpsko-jadranske domene. Konačno, koristeći model WRF ispitani su uvjeti prilikom nastanka (rano)jutarnje tuče na području Istre.

Rezultati pokazuju da današnji mezoskalni modeli mogu vjerodostojno reproducirati atmosferske uvjete prisutne prilikom pojave tuče u Hrvatskoj, ali i u široj Alpsko-jadranskoj regiji. Štoviše, dijagnostički alati za simulaciju tuče i munja pokazuju obećavajuće rezultate u simulaciji opaženih karakteristika tuče i munja iznad Hrvatske, ali i šire Alpsko-jadranske regije. Odabrani dijagnostički alati uspješni su u simulaciji prostornih značajki i intenziteta opažene aktivnosti munja. Slično, utvrđena je dobra uspješnost u simulaciji prostornih obilježja tuče izmjerenih radarskim produktima iz Švicarske te mreže tučomjera iz Hrvatske. Varijabilnost rezultata u odabiru mezoskalnog modela i postavkama pojedinog modela ukazuje na korist korištenja

multimodelskog i/ili multifizičkog ansambla pri simulaciji i prognozi ovih događaja. Za kraj, utvrđeno je da se ranojutarnja tuča iznad Istre većinom javlja u ciklonalnim vremenskim tipovima. Osim sinoptičkih uvjeta, za nastanak konvekcije i tuče, bitnu ulogu predstavljaju i mezoskalni, ali i lokalni uvjeti. Trenutni modeli pokazuju dobru uspješnost u simulaciji odabranih događaja.

Dobiveni rezultati su obećavajući te ukazuju da bi analizirani dijagnostički alati mogli biti vrijedan doprinos operativnoj numeričkoj prognozi tuče, ali i klimatskoj ocjeni pojave tuče i munja u sadašnjoj i budućoj klimi. Ovo izravno doprinosi poboljšanju prognoza tuče i munja za javnost, ali i specifične korisnike (npr. energetski sektor, promet, poljoprivreda...). S druge strane, dobiveni rezultati otvaraju mogućnost za analizu učestalosti i obilježja tuče u budućoj klimi što izravno doprinosi stvaranju budućih prijedloga prilagodbe klimatskim promjenama.

**Ključne riječi:** tuča, munje, WRF, HAILCAST, LPI

# Extended abstract

## Introduction

Hail is a severe weather hazard that can produce significant crop and property damage across the world (Allen et al., 2020), especially when it occurs over highly populated areas with high-density assets (Kunz et al., 2018). In the literature, a large number of even individual hailstorms causing more than US\$1 billion in damage is reported across the world (Schuster et al., 2005; Changnon, 2009; Brown et al., 2015; Kunz et al., 2018; Púčik et al., 2019). As described by Punge and Kunz (2016) and Púčik et al. (2019), several hail hotspots can be found in Europe, including the pre-Alpine and Adriatic areas. Although large hail occurs less often over the highest mountain peaks in the central Alps, severe hailstorms frequently affect Switzerland with up to 4 large hail days per year (Nisi et al., 2016; Púčik et al., 2019). In this area, the maximum hail diameter can sometimes exceed 10 cm (e.g., see Figure 8 from Púčik et al., 2019). Furthermore, parts of Croatia (Počakal et al., 2018; Jelić et al., 2020a) and broader northern Adriatic region (e.g. Manzato (2012)) have similar statistics of hail frequency as southern Germany or south-eastern Austria (Punge and Kunz, 2016). Therefore, considering the high economic losses associated with (severe) hailstorms, and high frequencies of hail occurrence, it is very important to have reliable hail forecasts, both for short-term numerical weather prediction and long-term climate-change adaptation strategies.

One of the largest limitations in understanding processes involved in hail formation is the lack of dense and direct measurements of hail properties on the ground. Hailpads, which are simple meteorological devices consisting of a stand and a measuring plate, represent one of the few methods to detect and measure hailstones directly on the ground. Besides the number of falling hailstones and their diameters, hailpads can also detect the intensity (i.e., kinetic energy) of hail (Smith i Waldvogel, 1989). In Europe, hailpad networks exist in several regions including parts of Spain, France, Greece, northern Italy, eastern Austria and parts of Croatia (Svabik, 1989; Dessens, 1998; Giaiotti et al., 2003; Sioutas et al., 2009; Počakal et al., 2009; Berthet et al., 2011; Počakal, 2011) and have also been used in randomized hail suppression experiments in Switzerland (Federer et al., 1978). Although hailpads are one of the few sources of direct information on hail occurrence, they provide spatially discrete (but unique) information on hail occurrence as they only record hail at the point where they are installed.

Another source of information on hail occurrence is related to weather radars. As the abilities of weather radars to detect different kinds of hydrometeors such as rain, snow and hail progressed over the years, several hail detection algorithms have been developed (e.g. Waldvogel et al., 1979; Witt et al., 1998). At the present, hail detection algorithms are widely used as hail proxies and can provide spatially continuous information on various hail properties, e.g., probability of hail occurrence or maximum expected hailstone size. In Switzerland, two hail detection algorithms are operational in real-time, namely, Probability of Hail (POH, Waldvogel et al., 1979; Foote et al., 2005) that indicates a probability of a hailstorm occurring at a certain location, and Maximum Expected Severe Hail Size (MESHS, Treloar, 1998; Joe et al., 2004) that estimates expected severe hail size at the ground over the Alpine region.

An additional challenge in understanding hail processes is the limited number of high-resolution modelling studies of hailstorms. With increasing computational power, it has become possible to run simulations at convection-permitting scales (horizontal grid spacing < 4 km). Several studies reported the benefits of using models at kilometre scales for more realistic representations of convective processes (Leutwyler et al., 2017), mean diurnal cycles of precipitation (Ban et al., 2014a), spatial precipitation patterns and associated extreme values (Prein et al., 2013; Brisson, Van Weverberg, et al., 2016; Brisson et al., 2018; Fowler et al., 2021; Pichelli et al., 2021), better representation of convective clouds (Keller et al., 2016; Brisson, Van Weverberg, et al., 2016; Hentgen et al., 2019), local wind systems like sea breeze (Belušić et al., 2018), and complex terrain winds (Horvath et al., 2012). Since models, when run at km scales, can produce a more realistic representation of convective processes, Adams-Selin and Ziegler (2016) integrated a physically improved 1D hail growth scheme – called HAILCAST (Poolman, 1992; Brimelow et al., 2002; Jewell and Brimelow, 2009) – with the km-scale WRF model. When HAILCAST is coupled with WRF, the model simulates the maximum expected hail size at the ground using the profiles of cloud liquid and ice water, vertical velocity, temperature, water vapor and pressure fields from a given model timestep. Several recent studies employed HAILCAST embedded in high-resolution numerical models, such as WRF or COSMO, to study hailstorms occurring over the United States and parts of Europe. The studies found that the models can reproduce the atmospheric conditions and triggering mechanisms responsible for hailstorm formation, resulting in simulating comparable hailstorms to those observed over the complex terrain of the United States (Adams-Selin and Ziegler, 2016; Adams-Selin et al., 2019), Switzerland (Trefalt et al., 2018; Raupach et al., 2021; Cui et al., 2023), and Italy (Manzato et al., 2020; Tiesi et al., 2022).

Similar to hail, lightning poses a serious threat to human lives (Curran et al., 2000; Holle et al., 2005), wind turbines (Rachidi et al., 2008) and transportation (Kanata et al., 2012; Lee and

Collins, 2017; Thornton et al., 2017). Moreover, lightning is a major cause of wildfires (Latham and Williams, 2001; Abatzoglou and Williams, 2016; Dowdy et al., 2017). Considering the hazards associated with lightning occurrence, the lightning potential index (LPI) was developed as a tool for diagnosing areas prone to lightning discharges (Lynn and Yair, 2008; Yair et al., 2010). With a better representation of convective processes km-scale simulations, LPI offers the possibility to use the parameterizations of lightning that describe the non-inductive process occurring inside a thundercloud (Yair et al., 2010; Brisson et al., 2021). It is defined as a potential for charge formation and separation inside a thundercloud and it relies on the presence of both solid and liquid hydrometeors. Even though LPI is not directly connected to the observed number of lightning flashes, several studies found that LPI could be a valuable tool for implicit lightning forecasting in COSMO (Sokol and Minářová, 2020, Cui et al., 2023) and WRF (Yair et al., 2010; Lagasio et al., 2017a) models. Recently, LPI was used in the climatological assessment of lightning over Germany (Brisson et al., 2021) and proved to be a better indicator of lightning occurrence than the commonly used convective available potential energy times precipitation (CAPE x PREC) parameterization (Romps et al., 2014).

In this context, the aim of this research is to investigate the predictive ability of the mesoscale WRF and COSMO models in simulating atmospheric conditions leading to hail and lightning occurrence, but also examine the ability of HAILCAST and LPI diagnostics in reproducing the characteristics of hail and lightning during storms over the Alpine-Adriatic region with a special focus on Croatia. Furthermore, using the WRF model alongside HAILCAST and LPI, the conditions present during the occurrence of (early) morning hail in Istria will be investigated. Specifically, the aims of this study can be summarized as:

- i. Evaluation of WRF-HAILCAST and LPI results in simulation of observed characteristics of hail and lightning during several selected hail cases over Croatia. Sensitivity tests of results on the choice of planetary boundary layer (PBL) and microphysics parameterization schemes.
- ii. Comparison of COSMO and WRF results in simulating hailstorms over the Alpine-Adriatic region.
- iii. Investigation of the atmospheric conditions during the occurrence of early morning hail in Istria.

## **Data and methods**

Within this study several datasets were used to evaluate the numerical simulations. Firstly, the model's ability to reproduce general surface conditions on the selected hail days using



standard meteorological measurements from automatic stations maintained by the Croatian Meteorological and Hydrological Service (DHMZ). We used hourly values of temperature, relative humidity and hourly maximum wind speed from the stations across Croatia. The surface conditions are evaluated using the RMSE decomposition methods.

For the evaluation of precipitation, the Final Run of Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG) mission (Huffman et al., 2019) dataset is used. IMERG is a globally gridded precipitation product that estimates surface precipitation rates at 0.1° spatial and 30 min temporal resolution. IMERG incorporates satellite microwave precipitation estimates, microwave-calibrated infrared satellite estimates and rain gauge observations. To evaluate the precipitation, Taylor diagrams are used.

To assess the ability of LPI to reproduce the observed lightning activity, lightning data from the Lightning Detection Network (LINET) (Betz et al., 2009) is used. Here, we considered total lightning information, i.e., we did not differentiate between types or polarities of lightning flashes as LPI presents the overall potential for lightning activity without distinction to the type or polarity of lightning discharges. The total lightning for the examined cases was taken from the 2D database of lightning flashes at a 3 km x 3 km horizontal and 2 min temporal resolution (developed by Jelić et al., 2021). LPI is assessed against LINET measurements using the minimum coverage neighbourhood verification method as well as the object-based Structure-Amplitude-Location (SAL) verification method.

Next, hail detection products from the Swiss radar network (Germann et al., 2015; Willemse and Furger, 2016) operated by MeteoSwiss are used to assess the HAILCAST results. Namely, operationally computed probability of hail (POH) product is used. POH indicates the grid-based probability of hail reaching the ground. Similar to evaluating lightning, a minimum coverage neighbourhood verification method is used.

Finally, HAILCAST results are assessed against direct hail measurements from the Croatian hailpad network. It consists of (i) hail suppression stations in the continental region of Croatia, (ii) a specially designed hailpad polygon in north-western Croatia, and (iii) hailpad stations in the north-eastern (NE) Adriatic region. Here, a proposed upscaled neighbourhood verification method is used to evaluate HAILCAST results against hailpad measurements.

## **Results and conclusion**

The current study presents an analysis of the capabilities of recently developed diagnostic tools for the simulation of hail and lightning, specifically HAILCAST and LPI. These diagnostic tools

were used for the first time over Croatia, but also over the wider Alpine-Adriatic region. Moreover, the hail simulations were evaluated, for the first time, using direct hail measurements on the ground. A systematic analysis and evaluation of the results was carried out both in the regime of short-term weather forecasts and in the regime of climate simulations. The conducted doctoral research represents an important scientific contribution to the improvement of weather forecasts and climate simulations of extreme weather with an emphasis on hail and lightning through:

- i. Detailed statistical and dynamic evaluation of simulated atmospheric conditions present during selected cases of hail over the wider Alpine-Adriatic area. Quantifying the performance of current mesoscale numerical models in simulating the present atmospheric conditions during selected hailstorms.
- ii. A detailed statistical and dynamic evaluation of diagnostic tools for the simulation of hail and lightning over the wider Alpine-Adriatic area. An analysis of the advantages/disadvantages of the selected diagnostic tools was carried out, as well as the sensitivity of the results to the choice of mesoscale model and settings within one model. This represents the first attempt in Croatia, and one of the few in Europe, to use diagnostic tools such as HAILCAST and LPI for the purpose of simulating the observed characteristics of hail and lightning and their systematic and detailed evaluation.
- iii. Analysis of the atmospheric conditions during early morning convection, with an emphasis on hail, over Istria. Statistical and dynamical evaluation of the mesoscale numerical model in the simulation of the atmospheric conditions during the occurrence of early morning hail along with the evaluation of diagnostic tools in the simulation of hail and lightning. This directly contributes to the understanding of the conditions under which early morning hail occurs in Istria, which could lead to better forecasts of early morning convection.

Therefore, the main results obtained within the presented doctoral research can be summarized as:

- i. Current mesoscale models can reliably reproduce the atmospheric conditions present during the occurrence of hail in Croatia, but also in the wider Alpine-Adriatic region.
- ii. Diagnostic tools for the simulation of hail and lightning show promising results in simulating the observed characteristics of hail and lightning over Croatia, but also the wider Alpine-Adriatic region. The selected diagnostic tools are successful in simulating the spatial characteristics and intensity of observed lightning activity. Similarly, good performance was found in the simulation of the spatial characteristics

of hail measured by radar products from Switzerland and the network of hail gauges from Croatia. The variability of the results in the selection of the mesoscale model and settings within one model indicates the benefit of using a multimodel and/or multiphysics ensemble when simulating these events.

- iii. It was established that early morning hail over Istria mostly occurs in cyclonic weather types. In addition to synoptic conditions, mesoscale and local conditions also play an important role in the formation of convection and hail. Current models show good performance in simulating selected events.

The obtained results are promising and indicate that the analysed diagnostic tools could be a valuable contribution to the operational forecast of hail and lightning, but also to the climate assessment of the occurrence of hail and lightning in the current and future climate. This directly contributes to the improvement of hail and lightning forecasts for the public, but also for specific users (e.g. energy sector, transport, agriculture...). On the other hand, the obtained results open up the possibility to analyse the frequency and characteristics of hail in the future climate, which directly contributes to the creation of future climate change adaptation plans.

**Keywords:** hail, lightning, WRF, HAILCAST, LPI

# Sadržaj

Sažetak.....	i
Extended abstract.....	iii
Introduction.....	iii
Data and methods.....	v
Results and conclusion.....	vi
Sadržaj.....	ix
1. Uvod.....	1
1.1. Tuča.....	1
1.2. Tuča u Europi i Hrvatskoj.....	3
1.3. Munje.....	5
1.4. Simulacija tuče i munja.....	6
1.5. Motivacija i ciljevi istraživanja.....	9
2. Podaci i metode.....	11
2.1. Podaci.....	11
2.1.1. Prizemna mjerenja.....	11
2.1.2. Oborina.....	12
2.1.3. Munje.....	13
2.1.4. Tuča.....	14
2.2. Opis modela.....	16
2.2.1. Numerički modeli WRF i COSMO.....	16
2.2.2. LPI.....	17
2.2.3. HAILCAST.....	18
2.3. Metode evaluacije.....	19
2.3.1. Evaluacija prizemnih mjerenja.....	19

2.3.2. Evaluacija oborine .....	20
2.3.3. Evaluacija munja.....	20
2.3.4. Evaluacija tuče.....	22
2.4. Metoda dekompozicije skala.....	26
3. Rezultati.....	28
3.1. Testovi osjetljivosti rezultata na odabir shema parametrizacije.....	28
3.1.1. Odabrani slučajevi tuče.....	28
3.1.2. Postavke simulacija.....	29
3.1.3. Usporedba s prizemnim mjerenjima.....	32
3.1.4. Rezultati primjene LPI-a.....	34
3.1.5. Podešavanje HAILCAST-a .....	40
3.1.6. Rezultati primjene HAILCAST-a.....	41
3.1.7. Razlike između članova ansambla.....	49
3.1.8. Sažetak rezultata .....	53
3.2. Usporedba rezultata simulacija tuče modelima COSMO i WRF nad Alpsko-jadranskom regijom.....	55
3.2.1. Odabrani slučajevi tuče.....	55
3.2.2. Postavke simulacija .....	56
3.2.3. Rezultati oborine .....	59
3.2.4. Rezultati primjene LPI-a.....	63
3.2.5. HAILCAST rezultati.....	66
3.2.6. Razlike između modela i interna varijabilnost modela .....	73
3.2.7. Sažetak rezultata .....	81
3.3. Analiza ranojutarnje konvekcije nad Istrom .....	83
3.3.1. Odabrani slučajevi tuče.....	83
3.3.2. Postavke simulacija .....	86
3.3.3. Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja 31. svibnja 2010. ....	87
3.3.4. Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja 02. svibnja 2014. ....	95

3.3.5. Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja 13. kolovoza 2010. ....	104
3.3.6. Sažetak rezultata .....	112
4. Zaključak.....	115
Dodatak A .....	117
Dodatak B .....	118
Dodatak C .....	121
Dodatak D.....	123
Popis literature .....	124
Životopis .....	138
Lista publikacija.....	139
Izvorni znanstveni i pregledni radovi u CC časopisima .....	139
Sažetci sa skupova .....	140
Ocjenski radovi.....	142

# 1. Uvod

## 1.1. Tuča

Tuča je kruta oborina ledenih zrnaca sferičnog, stožastog ili nepravilnog oblika promjera većeg od 5 mm. Svake godine tuča uzrokuje znatnu štetu diljem svijeta na zgradama, poljoprivredi i vozilima rezultirajući znatnim ekonomskim gubicima, osobito kada se dogodi u gusto naseljenim područjima (Kunz i sur., 2018). Čak i pojedinačne epizode tuče mogu uzrokovati štetu na usjevima i imovini veću od 1 milijarde američkih dolara (Schuster i sur., 2005.; Changnon, 2009.; Brown i sur., 2015.; Kunz i sur., 2018.; Púčik i sur., 2019.).

Pojava tuče najčešće se veže uz organizirane konvektivne sustave kao što su familije kumulonimbusa (Cb), mezoskalni konvektivni sustavi i superćelije, no može se pojaviti i u jednoćelijskim kumulonimbusima. Unutar samih oblaka, brojni su sastojci potrebni da bi oluja stvorila tuču. Kao prvo je potrebna mala čestica (promjera <1 cm) koja će služiti kao jezgra za daljnji rast. Te su čestice zajednički poznate kao "embriji" i obično su u obliku solike ili smrznutih kapljica (npr. Carte i Kidder, 1966.; Heymsfield i Musil, 1982.; Federer i sur., 1982.). Nakon što se embrij formira, drugi sastojak potreban za stvaranje zrna tuče je obilje prehladne vode (engl. *super cooled liquid water*). Do rasta dolazi kada embrij skupi prehladnu vodu koja se skuplja i smrzava na površini embrija. Većina studija sugerira da se većina rasta tuče događa na temperaturama između -10 i -25 °C (npr. Knight i sur., 1975.; Nelson, 1983.; Ziegler i sur., 1983.). Konačno, treći sastojak za stvaranje velikih zrna tuče je određeno vremensko trajanje. Zamjetan rast je moguć samo ako čestice ostanu u okruženju pogodnom za rast dulje vrijeme. Neka istraživanja sugeriraju da velika zrna tuče provedu čak 10-15 minuta ili više u područjima rasta (npr. Nelson, 1983.). Uz prisutnost svih navedenih sastojaka u intenzivnim konvektivnim olujama mogu se formirati velika zrna tuče.

Dakle, ključ za formiranje velikih zrna tuče je maksimalno zadržavanje zrna u uzlaznom strujanju, odnosno, ravnoteža između brzine padanja zrna tuče i brzine

uzlaznog strujanja (npr. Morgan, 1972.; Heymsfield, 1983.; Musil i sur., 1986.). Ako je brzina uzlaznog strujanja veća od brzine pada, tada se čestica brzo izdiže iz područja rasta i daljnji rast prestaje. Ako je brzina pada čestice veća od brzine uzlaznog strujanja, tada čestica može ispasti iz područja rasta. Nasuprot tome, kada se brzina pada i brzina uzlaznog strujanja usklade, čestica može ostati lebdjeti na otprilike konstantnoj visini unutar područja rasta tuče, uz utjecaj samo horizontalnih komponenti brzine vjetera unutar uzlaznog strujanja. Prethodne studije su pokazale da velika zrna tuče stječu većinu svoje mase upravo u takvim uvjetima (npr. Nelson, 1983.). Budući da zrno tuče kontinuirano raste skupljanjem prehladne vode, ono mora biti usmjereno u područja jačeg uzlaznog strujanja kako bi se održala ova ravnoteža. To podrazumijeva horizontalne putanje koje rezultiraju da zrno tuče prolazi od periferije uzlaznog strujanja do njegove jezgre. Kada zrna tuče postanu prevelika i nadvladaju vertikalno smicanje/uzdizanje, počinju padati na zemlju.

Podaci o pojavi tuče na tlu izrazito su važni za cijeli spektar ljudskih djelatnosti, npr. sektore energetike, prometa, poljoprivrede, osiguranja. Iako važna, kvalitetna informacija o učestalosti i intenzitetu tuče nije uvijek dostupna korisnicima, prije svega zbog velike prostorne i vremenske varijabilnosti pojave tuče. Trenutno postoje dva načina na koja je moguće analizirati pojavu tuče na određenoj lokaciji – pomoću izravnih mjerenja (ili opažanja) tuče na tlu ili pomoću posrednih metoda. U izravne metode ubrajaju se službena opažanja motritelja na meteorološkim postajama institucija za praćenje vremena i klime kao npr. Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ) u Hrvatskoj te neslužbena opažanja putem medijskih zapisa ili dojava građana od kojih je u Europi najistaknutija ESWD baza podataka (npr. Punge i sur., 2014.). Iako se takve metode odlikuju dugim vremenskim nizovima podataka, prostorno su ograničene na područje meteorološke postaje ili pak gusto naseljena područja. S druge strane, tučomjer, jednostavni meteorološki mjerni uređaj koji se sastoji metalnog stalka i ploče od stiropora, predstavlja jednu od rijetkih metoda mjerenja zrna tuče izravno na tlu. Osim broja padajućih zrna tuče i njihovih promjera, tučomjeri također mogu detektirati intenzitet (tj. kinetičku energiju) tuče (Smith i Waldvogel, 1989.). U Europi mreže tučomjera postoje u nekoliko regija uključujući dijelove Španjolske, Francuske, Grčke, sjeverne Italije, istočne Austrije i dijelove Hrvatske (Svabik, 1989.; Dessens, 1998.; Gaiotti i sur., 2003.; Počakal i sur., 2009.; Sioutas i sur., 2009.; Berthet i sur., 2011.; Počakal, 2011.), a također su korišteni u nasumično odabranim eksperimentima suzbijanja tuče u Švicarskoj (Federer i sur., 1978.). Iako su tučomjeri jedan od rijetkih izvora izravnih informacija o pojavi tuče, oni pružaju prostorno diskretne informacije o pojavi tuče jer



bilježe tuču samo na mjestu gdje su postavljeni. Gusto postavljeni tučomjeri obično su ograničeni na određeno područje od povećanog interesa. Drugi izvor informacija o pojavi tuče vezan je uz posredne metode koje koriste radarska ili satelitska mjerenja. Ovakve metode mogu biti izvor vremenski i prostorno kontinuiranih podataka o pojavi tuče, ali zahtijevaju izravna mjerenja tuče za kalibraciju.

## 1.2. Tuča u Europi i Hrvatskoj

Do danas je većina europskih zemalja objavila klimatološka istraživanja tuče na nacionalnom i/ili regionalnom nivou koja uključuju prostorna i vremenska obilježja (Punge i Kunz, 2016.). Podaci pokazuju da je tuča prisutna u gotovo cijeloj Europi. Najsjevernija točka koja je zabilježila tuču nalazi se u Skandinaviji na 67.5 °N gdje je općenito sezona jake tuče (promjera većeg od 2 cm) zabilježena u razdoblju od 01.05. do 15.09. (Tuovineni sur., 2009.). Prema jugu, na cijelom području Sredozemlja, tuča se pojavljuje tijekom cijele godine (Berthet i sur., 2011.; Baldi i sur., 2014.; Punge i Kunz, 2016.). Ipak, glavina aktivnosti tuče u smislu učestalosti veže se za pojas od 39 °N do 50 °N (Punge i sur., 2014.). Unutar navedenog pojasa umjerenih širina, opažaju se područja s najvećom učestalošću tuče, a to su područja u blizini Alpa sa sjeverne i južne strane, Pirinejska regija, Središnji masiv u Francuskoj, Apenini u Italiji, Dinaridi u jugoistočnoj Europi te Karpati u Panonskom bazenu.

Osim utjecaja zemljopisnih širina, na obilježja tuče djeluje i udaljenost promatrane lokacije/postaje od mora. Kontinentalne postaje u pravilu bilježe glavnu aktivnost tuče u toplijem dijelu godine, tj. od svibnja do rujna dok se glavina aktivnosti tuče na priobalnim postajama bilježi tijekom proljetnih i zimskih mjeseci (Punge i Kunz, 2016.; Santos i Belo-Pereira, 2018.). Značajan utjecaj na razvoj tuče pokazuje i orografija (blizina planina), primjerice predalpska područja Švicarske, Austrije i Slovenije pokazuju povećanu učestalost tuče (do 4 dana s tučom godišnje). Pojava tuče također je povećana u jugoistočnoj Europi, također zbog utjecaja orografije (npr. južna Bugarska).

Najčešća pojava tuče događa se tijekom ljetnih mjeseci u većem dijelu Europe (oko 75 % teritorija) s maksimumom u lipnju sukladno konvektivnoj aktivnosti. Duž obala Sredozemnog mora taj se maksimum mijenja i opaža se češće u drugim godišnjim dobima, osobito u proljeće i jesen ovisno o lokaciji (Punge i Kunz, 2016.). Iznad Korzike javlja se u rujnu, nad Kretom i otocima južnog Jonskog mora u veljači, a nad južnom Grčkom, Turskom i Ciprom u svibnju (Púčík i sur., 2019.). Detaljnija analiza motrenja na postajama u južnoj i zapadnoj Grčkoj pokazala je vrlo visoku učestalost zimskog maksimuma

(Kotinis-Zambakas, 1989.). Tijekom dana jaka tuča obično se javlja poslijepodne između 14 i 18 sati po lokalnom vremenu, ali ipak ranije u istočnoj nego u zapadnoj Europi. Rezultati ovih istraživanja također ukazuju na velike razlike u godišnjim/dnevnim obilježjima pojave tuče ovisno o lokaciji i udaljenosti od mora.

U Hrvatskoj analiza konvektivne aktivnosti (Penzar i sur., 2001.; Mikuš i sur., 2012.) potvrđuje njezinu veliku prostornu i vremensku varijabilnost, a posljedično se isto uočava i u značajkama opažene tuče (Počakal i sur., 2009.; Počakal et al., 2018.; Jelić i sur., 2020.; Jelić, 2022.). Nedavno je po prvi puta napravljena sveobuhvatna klimatološka analiza podataka o tuči ukazujući na niz detaljnih vremenskih i prostornih obilježja na temelju motrenja tuče na meteorološkim postajama diljem Hrvatske (Jelić 2022; Blašković i sur., 2023.). Analiza je potvrdila veliku prostornu i vremensku varijabilnost pojave tuče. Na temelju godišnjeg hoda aktivnosti tuče prepoznata su tri različita profila s obzirom na najveću učestalost ('ljetni', 'zimski', 'prijelazni' tip) čime je Hrvatska podijeljena na tri različite regije:

- (i) Postaje 'ljetnog' tipa nalazimo pretežito u kontinentalnoj Hrvatskoj. Ove postaje bilježe maksimalnu aktivnost tuče od svibnja do srpnja, a odgovarajući dnevni ciklus pokazuje vrhunac od 13 do 17 sati slično kao u drugim zemljama srednje Europe (Punge i Kunz, 2016.).
- (ii) Postaje 'zimskog' tipa nalazimo na području srednjeg i južnog Jadrana, a pokazuju maksimum aktivnosti od studenog do svibnja, slično obalnim postajama u Portugalu (Santos i Belo-Pereira, 2019.) i Grčkoj (Kotinis-Zambakas, 1989.). Dnevni maksimum 'zimskog' tipa postaja često se javlja tijekom jutarnjih sati.
- (iii) Postaje 'prijelaznog' tipa nalazimo pretežito na sjevernom Jadranu i u unutrašnjosti Jadrana. Ove postaje upućuju na aktivnost tuče tijekom cijele godine s malom preferencijom prema proljeću i jeseni, dok dnevni maksimum pojave tuče pada oko podneva.

Dodatno je provedena analiza trenda tuče te je otkriven negativan i signifikantan trend tuče uzimajući u obzir sve postaje u dugim (1995.-2019.) i vrlo dugim (1900.-2020.) vremenskim razdobljima. Međutim, nedavno razdoblje (1995.-2019.) ukazuje na zaustavljanje negativnog trenda u unutrašnjosti Hrvatske i promjenu nagiba prema pozitivnim vrijednostima za područja gdje dominiraju postaje 'ljetnog' i 'zimskog' tipa, iako promjena nije signifikantna. Nadalje, detaljna analiza osjetljivosti trenda otkrila je da

je analiza trenda jedne postaje rijetko dovoljna da se dobiju signifikantne vrijednosti trenda te da lokalni trendovi mogu znatno odstupati od trenda šireg područja.

### 1.3. Munje

Slično kao i tuča, munje predstavljaju ozbiljnu prijetnju ljudskim životima (Curran i sur., 2000.; Holle i sur., 2005.), vjetroturbinama (Rachidi i sur., 2008.) i prijevozu (Kanata i sur., 2012.; Lee i Collins, 2017.; Thornton i sur., 2017.). Štoviše, udari munja glavni su prirodni uzroci šumskih požara (Latham i Williams, 2001.; Abatzoglou i Williams, 2016.; Dowdy i sur., 2017.).

Primarni izvor munja su kumulonimbusi, a podrazumijevaju prirodno elektrostatičko pražnjenje tijekom kojeg se dva električki nabijena područja u atmosferi i/ili na tlu privremeno izjednačuju, uzrokujući trenutno oslobađanje velike količine energije. Iako su uvjeti potrebni za stvaranje munja poznati već neko vrijeme, sam mehanizam pojave električnih polja unutar oblaka još uvijek nije u potpunosti istražen (Rakov, 2013.). Pojava munja unutar konvektivnog oblaka objašnjava se neinduktivnim mehanizmom koji podrazumijeva da je za razvoj munja ključna prisutnost hidrometeora (led, tuča, solika, prehladna voda) u uzlaznom strujanju konvektivnog oblaka (Saunders, 2008). Početni proces za stvaranje područja naboja u grmljavinskim olujama uključuje zrna solike koja rastu skupljajući prehladne kapljice vode. Kada se zrna solike sudaraju i odbijaju od manjih čestica leda, događa se proces indukcije naboja prilikom čega čestice solike bivaju negativno, a čestice leda bivaju pozitivno nabijene. Budući da se manje čestice leda dižu brže u uzlaznom strujanju od čestica solike, čestice leda završavaju u gornjim, a čestice solike u donjim slojevima oblaka. Time se unutar oblaka pojavljuju dvije suprotno nabijene regije. Zbog turbulencije unutar samog oblaka, dolazi do pomicanja pojedinih čestica i područja istoimenog naboja što uzrokuje promjene jakosti električnog polja. Kada vrijednost električnog polja prijeđe kritičnu vrijednost od  $1 \text{ MV m}^{-1}$ , zrak prestaje biti dostatan izolator i dolazi do izbijanja električnog naboja (munje) koje se može dogoditi u više smjerova; (i) unutar istog oblaka (kada su područja naboja slične jačine), (ii) prema drugom oblaku, (iii) prema okolnom zraku ili (iv) prema tlu (Uman, 1987.). Nedavna istraživanja pokazuju da je zona između izoterma  $0$  i  $-20$  °C, zona gdje je neinduktivni mehanizam (sudari leda i čestica solike u prisutnosti prehladne vode) najučinkovitiji (Saunders, 2008.; Mansell i sur., 2010.). Prema nedavnim studijama u kojima je prikazana korelacija između duboke konvekcije i pojava munje (van den Broeke

i sur., 2005.), neinduktivni mehanizam najefikasniji je u prisutnosti jakih vertikalnih brzina, kada solika postoji u jednakim omjerima u odnosu na čestice snijega, leda i vode.

#### **1.4. Simulacija tuče i munja**

Uzimajući u obzir velike ekonomske gubitke povezane s (jakim) olujama s tučom i učestalost pojave tuče nad našim područjem, vrlo je važno numeričkim modelima uspješno reprezentirati tuču, kako za kratkoročne numeričke prognoze vremena (NWP) i povezanih upozorenja na opasne vremenske pojave, tako i za planiranje dugoročne strategije prilagodbe klimatskim promjenama.

Iako se važnost uspješne prognoze tuče ne može prenasiti, kako za ublažavanje nastalih šteta, tako i za istraživanje svojstava tuče u budućoj klimi, tuča ostaje fenomen koji je teško modelirati. To je zbog nedovoljnog razumijevanja mikrofizičkih i dinamičkih procesa uključenih u formiranje tuče, a koje proizlaze iz ograničenih izravnih opažanja tuče i poteškoća povezanih s pokretanjem modela dovoljno velike razlučivosti za pružanje vrijednih informacija o tuči (Raupach i sur., 2021.). Većina metoda prognoziranja tuče trenutačno se temelji na vremenskoj ekstrapolaciji obilježja tuče opaženih metodama daljinskih mjerenja, uglavnom radara i podataka o munjama (Farnell i sur., 2017., 2018.).

Posljednjih godina razvijene su metode strojnog učenja za prognozu tuče (Marzban i Witt, 2001.; Manzato, 2013.; Gagne i sur., 2017.; Czernecki i sur., 2019.). Međutim, metode strojnog učenja trenirane na opažanjima tuče općenito mogu dati korisne prognoze samo do nekoliko sati unaprijed. Iako su prognoze za jedan ili više dana unaprijed moguće (ali rijetke), takvi modeli za potrebe treniranja zahtijevaju velike baze podataka opažanja tuče i rezultata modela za kratkoročnu prognozu (Gagne i sur., 2017.).

S druge strane, tijekom godina razvijene su metode prognoze tuče koje se temelje na kombinaciji aproksimacija konvektivnih uvjeta odgovornih za stvaranje oluja s tučom i lokalne klimatologije tuče (Johns i Doswell, 1992.). Većina postojećih metoda prognoze tuče koristi procjenu jačine uzlazne struje temeljenu na radiosondažnim mjerenjima za pružanje prognoza veličine zrna tuče na tlu (Fawbush i Miller, 1953.; Moore i Pino, 1990.; Brimelow i sur., 2002.). Ovaj pristup ima praktična ograničenja jer su radiosondažna mjerenja uglavnom dostupna samo dva puta dnevno na malom broju lokacija.

S povećanjem računalne snage, postalo je moguće izvoditi numeričke simulacije na skalama koje dopuštaju konvekciju (horizontalni mrežni korak < 4 km). Nekoliko je

studija izvijestilo o prednostima korištenja numeričkih modela na razlučivost od nekoliko kilometara za realističnije prikaze konvektivnih procesa (Leutwyler i sur., 2017.), srednjih dnevnih ciklusa oborine (Ban i sur., 2014.), prostornih uzoraka oborine i povezanih ekstremnih vrijednosti (Prein i sur., 2013.; Brisson i sur., 2016.; Pichelli i sur., 2021.), bolji prikaz konvektivnih oblaka (Keller i sur., 2016.; Brisson i sur., 2016.; Hentgen i sur., 2019.), te lokalnih tipova vjetra poput bure, juga i smorca nad kompleksnim terenom (npr. Horvath i sur., 2012.; Belušić i sur., 2018.). Budući da modeli, kada se pokreću s kilometarskom rezolucivnošću, mogu proizvesti realističniji prikaz konvektivnih procesa, Adams-Selin i Ziegler (2016.) integrirali su fizički poboljšan jednodimenzionalan (1D) model rasta zrna tuče – nazvan HAILCAST (Brimelow i sur., 2002.; Jewell i Brimelow, 2009.) s prognostičkim modelom WRF (engl. *Weather Research and Forecasting*). HAILCAST je razvijen kao jedan je od modela temeljenih na procjeni jačine uzlazne struje pomoću radiosondažnih mjerenja (Brimelow i sur., 2002.; Jewell i Brimelow, 2009.). Združujući HAILCAST s modelom WRF, (WRF-HAILCAST), radiosondažna mjerenja zamijenjena su prostorno kontinuiranim (tj. modeliranim) vertikalnim profilima atmosfere. Nadalje, HAILCAST je pokazao veću uspješnost u davanju pouzdanije prognoze veličine zrna tuče u usporedbi s drugim radiosondažnim metodama (Jewell i Brimelow, 2009.). Na temelju simuliranih profila hidrometeora, vertikalne brzine, temperature i tlaka, WRF-HAILCAST daje prognozu maksimalnog promjera zrna tuče na tlu. Adams-Selin i Ziegler (2016.) pokazali su da združeni modelski sustav WRF-HAILCAST može u 66 % slučajeva simulirati veličinu tuče koja je unutar 12 mm opažene. Štoviše, WRF-HAILCAST je korišten operativno u SAD-u u razdoblju od 2014. do 2016. godine prilikom čega je testiran i poboljšan (Jirak i sur., 2014.). Kao rezultat testiranja i poboljšanja, uspješnost HAILCAST-a usklađena je s dotadašnjim metodama najboljih performansi, kao što su zakrivljenost uzlazne struje (engl. *updraft helicity*) i integriran omjer miješanja solike u stupcu (engl. *column-integrated graupel*). Štoviše, za razliku od dotadašnjih metoda, HAILCAST je proizveo dosljedne rezultate čak i kada se koristio u različitim konfiguracijama modela i s različitom horizontalnom razlučivošću (Adams-Selin i sur., 2019.).

Nekoliko nedavnih studija koristilo je model HAILCAST implementiran u numeričke prognostičke modele velike razlučivosti, kao što su modeli WRF ili COSMO (engl. *CO*nsortium for *S*mall-scale *MO*deling) za proučavanje oluja s tučom koje se pojavljuju nad Sjedinjenim Američkim Državama i Europom. Studije su pokazale da modeli mogu reproducirati atmosferske uvjete i mehanizme okidanja koji su odgovorni za stvaranje tuče, što rezultira simulacijom tuče usporedive s opažanjima na složenom

terenu Sjedinjenih Država (Adams-Selin i Ziegler, 2016.; Adams-Selin i sur., 2019.), Švicarske (Trefalt i sur., 2018.; Raupach i sur., 2021.) i Italije (Manzato i sur., 2020.; Tiesi i sur., 2022.).

Uz konvektivne oluje vežemo još jednu štetnu vremensku nepogodu odgovornu za značajne ekonomske gubitke - munje. Iako je eksplicitno modeliranje električnih polja u atmosferi i udara munja unutar NWP modela moguće (Helsdon i sur., 1992.; MacGorman i sur., 2001.; Mansell, 2005.; Altaratz, 2005.; Barthe i Pinty, 2007.; Pinty i Barthe, 2008.; Tsenova i Mitzeva, 2009.; Mansell i sur., 2010.; Barthe i sur., 2012.; Fierro i sur., 2013.), zahtijeva dosta vremena i računalnih resursa. Stoga se često primjenjuju neizravne metode za modeliranje pojave munja u atmosferi. Ove se metode temelje na odnosu između udara munje i raznih neelektričnih parametara/varijabli koje karakteriziraju konvektivnu aktivnost, kao što su konvektivna raspoloživa potencijalna energija (CAPE) i oborina (Romps i sur., 2014.), visina vrhova konvektivnih oblaka, oborina i konvektivni uzlazni tok mase (Allen i Pickering, 2002.) te uzlazni tok leda u oblaku (engl. *upward cloud ice flux*) na izobarnoj plohi od 440 hPa (Finney i sur., 2014.). Nedavno su Lopez (2016.) i Lopez (2018.) razvili novu parametrizaciju udara munja za globalni model ECMWF IFS<sup>1</sup> koji parametrizira konvekciju. Ova parametrizacija uzima u obzir CAPE i dijagnosticirane vertikalne profile hidrometeora iz sheme parametrizacije konvekcije. Pokazano je da postoji dobro slaganje između rezultata simuliranih i izmjerenih udara munja u determinističkim prognozama na vremenskim i prostornim skalama iznad 6 h i 50 km. Međutim, budući da ova parametrizacija uzima u obzir CAPE, izazovno ju je koristiti u modelima koji dopuštaju konvekciju zbog uklanjanja CAPE-a eksplicitnom konvekcijom (engl. *CAPE removal by explicit convection*).

Uz bolji prikaz konvektivnih procesa u simulacijama koje dopuštaju konvekciju, javlja se mogućnost korištenja shema parametrizacija munja koje opisuju neinduktivni proces koji se odvija unutar grmljavinskog oblaka. Jedna od takvih parametrizacija ujedno je i indeks potencijalnog razvoja munja (engl. *Lightning Potential Index*, LPI) (Yair i sur., 2010.; Brisson i sur., 2021.). LPI ukazuje na potencijal za stvaranje i odvajanje naboja unutar grmljavinskog oblaka i pojavu grmljavinske aktivnosti. Odnosno, LPI ( $\text{Jkg}^{-1}$ ) se definira kao uzlazna kinetička energija skalirana potencijalom za razdvajanje naboja, a koja se temelji na omjeru između sadržaja vodenih i ledenih hidrometeora u glavnoj zoni razdvajanja naboja grmljavinskog oblaka. Iako LPI nije izravno povezan s opaženim

---

<sup>1</sup> engl. *European Centre for Medium Range Forecast Integrated Forecasting System* (ECMWF IFS)

brojem udara munja, nekoliko je studija pokazalo da bi LPI mogao biti vrijedan alat za implicitnu prognozu munja u modelima COSMO (Sokol i Minářová, 2020.) i WRF (Yair i sur., 2010.; Lagasio i sur., 2017.). Dodatno, LPI je nedavno korišten u klimatološkoj procjeni aktivnosti munja iznad Njemačke (Brisson i sur., 2021.) i pokazao se boljim pokazateljem pojave munje od uobičajeno korištenog pristupa koji se zasniva na umnošku konvektivne raspoložive potencijalne energije množene s oborinom (CAPE x PREC) (Romps i sur., 2014.).

## 1.5. Motivacija i ciljevi istraživanja

Testiranje prognoze tuče i munja pridonosi poboljšanju pravovremenih prognoza i sustava upozorenja kako za javnost tako i za određene korisnike (npr. energetske sektor, poljoprivreda te promet) i može dodatno smanjiti ekonomske gubitke. S obzirom na potencijalno velike (gospodarske) štete koje su moguće pojavom tuče i munje, cilj ovog istraživanja je istražiti uspješnost združenog WRF-HAILCAST modela i LPI algoritma za simulaciju tuče i munja u različitim atmosferskim uvjetima. Pritom je fokus na proučavanju obilježja tuče te munja tijekom oluja nad Alpsko-jadranskim područjem s posebnim naglaskom na područje Hrvatske. Nadalje, pomoću modela WRF-HAILCAST i dijagnostike LPI provest će se analiza (rano)jutarnje tuče na području Istre. Postavljene hipoteze i očekivani ciljevi ovog rada mogu se sažeti kao:

Ciljevi:

1. Evaluacija rezultata modela WRF-HAILCAST i algoritma LPI u reprodukciji opaženih karakteristika tuče i munja tijekom više odabranih slučajeva tuče iznad Hrvatske. Ispitivanje osjetljivosti rezultata o odabiru shema parametrizacija atmosferskog graničnog sloja (engl. *Planetary boundary layer*, PBL) i mikrofizike.
2. Usporedba rezultata simulacija više realnih slučajeva tuče nad Alpsko-jadranskim područjem dobivenih različitim modelskim prognostičkim sustavima WRF-HAILCAST i COSMO-HAILCAST.
3. Analiza (rano)jutarnje tuče na području Istre.

Hipoteze:

1. Koncepti HAILCAST i LPI uspješni su u reprodukciji opaženih karakteristika tuče i munja tijekom odabranih slučajeva tuče iznad Hrvatske.

HAILCAST i LPI ne pokazuju veliku osjetljivost o odabiru shema parametrizacija PBL-a i mikrofizike.

2. HAILCAST i LPI pokazuju konzistentne rezultate te su dovoljno robusni čak i kad se koriste u različitim numeričkim modelskim sustavima i geografskim područjima te različitim atmosferskim uvjetima.
3. Lokalni režim strujanja uvjetovan okolnom orografijom i/ili oblikom obalne linije doprinosi stvaranju lokalne zone konvergencije i pojavi (rano)jutarnje tuče.



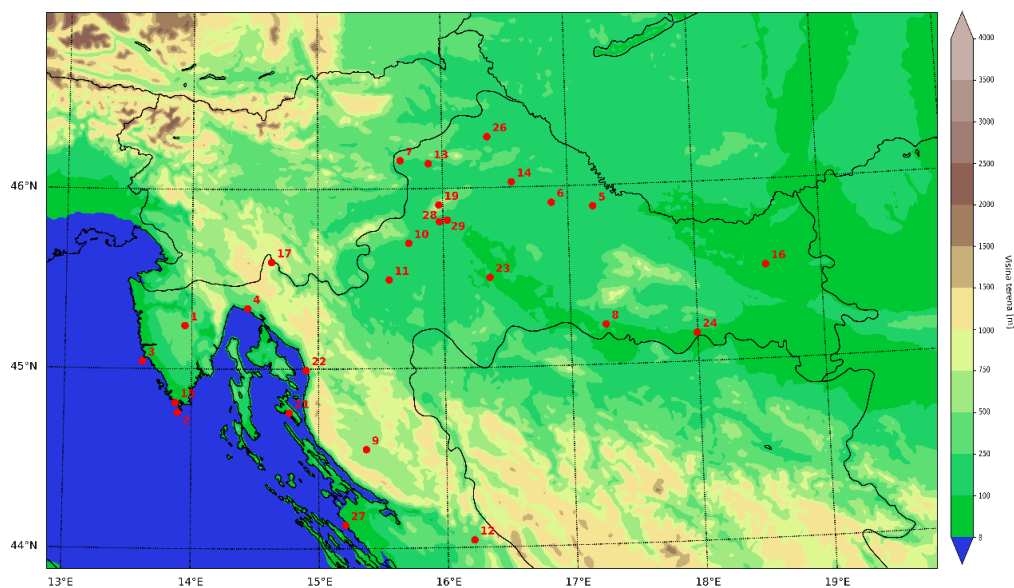
## 2. Podaci i metode

### 2.1. Podaci

Nekoliko izvora podatka korišteno je za evaluaciju modeliranih rezultata čiji kratki pregled i osnovne informacije slijede u narednim poglavljima.

#### 2.1.1. Prizemna mjerenja

Jedan od inicijalnih koraka evaluacije modela bila je procjena sposobnosti modela da reproducira prizemna mjerenja s automatskih meteoroloških postaja koje održava Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ). Pritom su korištene satne vrijednosti temperature i relativne vlažnosti s 2 m visine te satni maksimumi brzine vjeta s 10 m iznad tla s postaja diljem Hrvatske (Slika 2.1 i Tablica 2.1) . Štoviše, uzimajući u obzir važnost ekvivalentne potencijalne temperature ( $\theta_e$ ) za pseudoadijabatske procese dizanja i formiranje oluje, također su evaluirane i modelirane prizemne vrijednosti  $\theta_e$ .



**Slika 2.1** Položaji automatskih meteoroloških postaja korištenih u analizi. Brojevi postaja povezani su s nazivima postaja u Tablici 2.1.

**Tablica 2.1** Popis automatskih meteoroloških postaja korištenih u analizi. Naznačen je naziv postaje, geografska širina i dužina dok je položaj postaja prikazan na Slici 2.1.

Broj	Postaja	Geog. Dužina	Geog. širina
1	Pazin	45.241	13.945
2	Porcer	44.758	13.891
3	Sv. Ivan na Pučini	45.043	13.612
4	Rijeka	45.337	14.441
5	GMP Bilogora	45.884	17.2
6	GMP Bjelovar	45.91	16.869
7	Desinić	46.157	15.663
8	Gorice	45.224	17.278
9	GMP Gospić	44.551	15.373
10	Goli Vrh	45.698	15.724
11	GMP Karlovac	45.494	15.565
12	GMP Knin	44.041	16.207
13	GMP Krapina	46.138	15.888
14	GMP Križevci	46.029	16.554
15	Monte Kope	44.812	13.873
16	GMP Osijek - Čepin	45.523	18.56
17	GMP Parg	45.594	14.631
19	GMP Puntarijarka	45.907	15.968
21	GMP Rab	44.756	14.769
22	GMP Senj	44.993	14.903
23	GMP Sisak	45.5	16.367
24	GMP Slavonski Brod	45.159	17.995
26	GMP Varaždin	46.283	16.364
27	Zadar	44.13	15.206
28	GMP Zagreb-Grič	45.814	15.972
29	Zagreb Maksimir	45.822	16.034

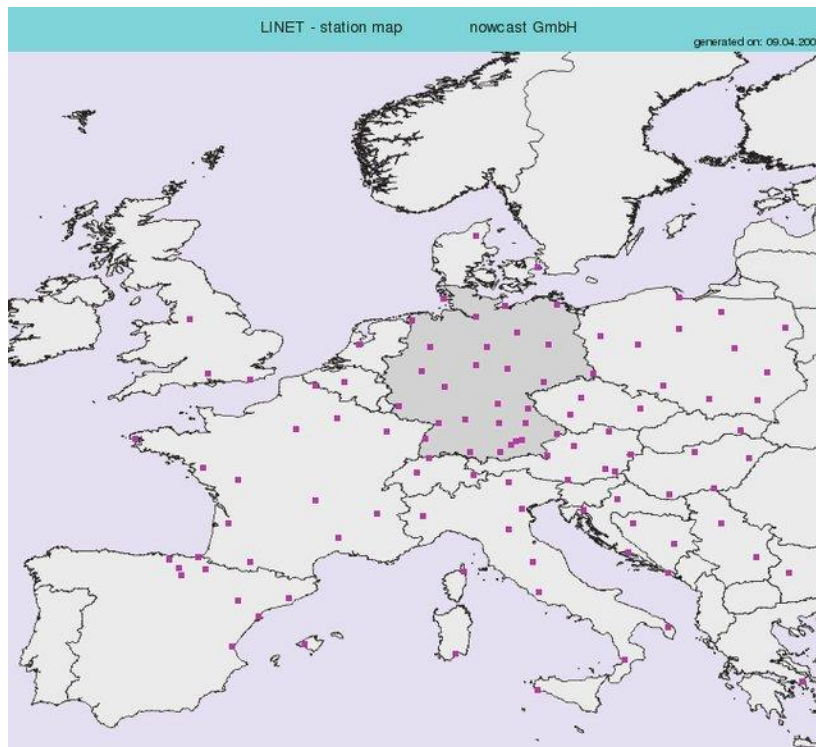
### 2.1.2. Oborina

Za evaluaciju simulirane oborine u Alpsko-jadranskoj regiji koristi se skup podataka dobiven satelitskim mjerenjima tijekom NASA-ine misije (engl. *Final Run of Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG)*) (Huffman i sur., 2019.). IMERG je globalni set podataka o oborini koji procjenjuje količinu oborine s prostornom rezolucijom od 0.1° i vremenskom rezolucijom od 30 minuta. IMERG uključuje satelitsku mikrovalnu procjenu oborine i mjerenja s kišomjernih postaja diljem

svijeta. Kombinirajući daljinska i prizemna mjerenja, IMERG daje prostorno i vremenski kontinuirane i homogene procjene oborine za cijelu Alpsko-jadransku regiju.

### 2.1.3. Munje

Nadalje, za procjenu sposobnosti LPI-ja da reproducira opaženu aktivnost munja, koriste se podaci o munjama iz Mreže za otkrivanje munja (engl. *Lightning Detection Network*, LINET) (Betz i sur., 2009.). Sa 190 senzora u 31 zemlji koji su udaljeni do 250 km, mreža LINET uspješno detektira munje oblak-zemlja kao i munje unutar oblaka te razlikuje pozitivna i negativna pražnjenja diljem Europe. Štoviše, mreža LINET (Slika 2.2) može detektirati slabije signale udara s amplitudom struje manjom od 1 kA. Uz stalna poboljšanja mreže, srednje vrijednosti detektiranih amplituda struje smanjile su se za polovicu u odnosu na 2009. godinu (Franc i sur., 2016.), pokazujući značajno poboljšanje u osjetljivosti detekcije prema manjim amplitudama struje. Za veći dio europske regije (Franc i sur., 2016.; Jelić i sur., 2021.), prosječni minimalni signal koji se može detektirati je 0.7 kA, a srednja pogreška točnosti lokacije je  $\pm 84$  m. Unutar ovog rada, u obzir uzimamo ukupnu informaciju o munjama (engl. *total lightning*), tj. ne razlikujemo između vrste ili polariteta udara munje budući da LPI predstavlja ukupni potencijal za aktivnost munja bez preferencije prema vrsti ili polaritetu pražnjenja. Ukupna aktivnost munja za ispitane slučajeve preuzeta je iz 2D baze podataka o pojavi munja pri horizontalnoj rezoluciji od 3 km x 3 km i vremenskoj rezoluciji od 2 minute (koju su razvili Jelić i sur. (2021.)) te je dostupna u domeni prikazanoj na Slici 2.3a.



**Slika 2.2** Položaji senzora za detekciju munja LINET mreže. Preuzeto iz Javor i sur., (2018.).

#### 2.1.4. Tuča

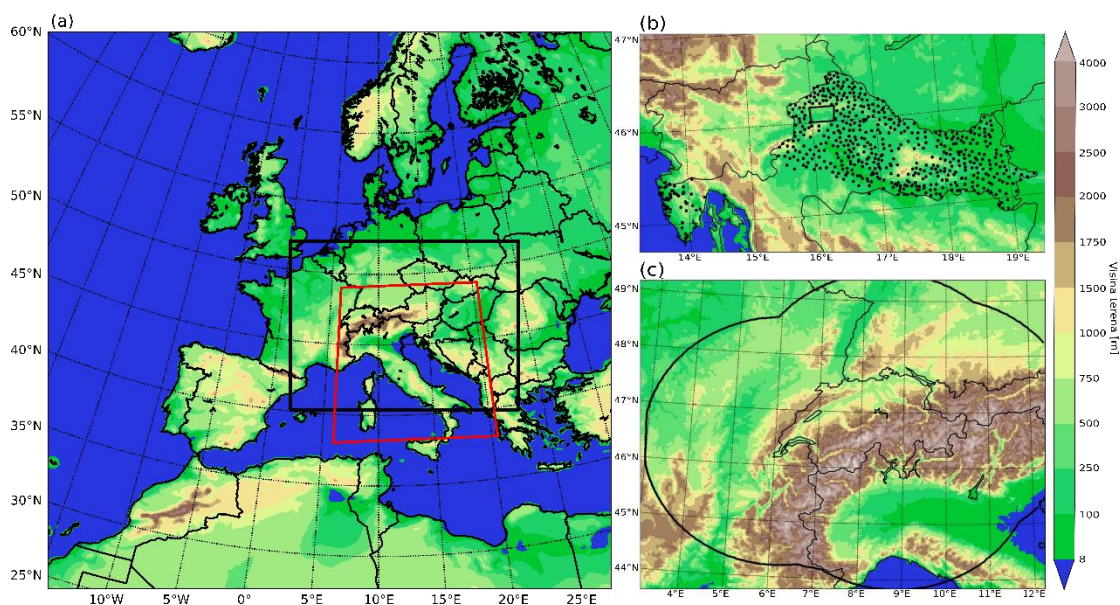
Za evaluaciju rezultata združenog sustava WRF-HAILCAST korištena su tri skupa podataka. Prvi uključuje mjerenja tuče s mreže tučomjera u Hrvatskoj. Mreža tučomjera u Hrvatskoj sastoji se od (i) lansirnih postaja za obranu od tuče u kontinentalnom dijelu Hrvatske, (ii) posebno dizajniranog poligona za mjerenje tuče u sjeverozapadnoj Hrvatskoj i (iii) tučomjera postavljenih u Istri u vinogradima i meteorološkim postajama. (Slika 2.3b). Sveukupno, DHMZ je postavio i održava 590 tučomjera na lansirnim postajama i 150 tučomjera na poligonu u sjeverozapadnoj Hrvatskoj s prosječnim razmakom između tučomjera od ~ 5.5 km, odnosno ~ 2 km (Počakal i sur., 2009.; Počakal, 2011.). Dodatno, tijekom projekta VITCLIC<sup>2</sup> dodatnih 65 tučomjera postavljeno je na istarskom području u vinogradima i meteorološkim postajama. Važno je napomenuti da istarska regija nije dio mreže za obranu od tuče; prema tome, opažanja tuče s ovog

---

<sup>2</sup> <https://www.pmf.unizg.hr/geof/en/research/climatology/vitcllic>

područja nisu pod potencijalnim utjecajem aktivnosti obrane od tuče. Položaji tučomjera naznačeni su na Slici 2.3b.

Drugi set podatka uključuje procjenu tuče na tlu pomoću radarskih produkata iz švicarske radarske mreže (Germann i sur., 2015.; Willemse i Furger, 2016.) kojom upravlja *MeteoSwiss*. Naime, korišten je operativno izračunati produkt koji ukazuje na vjerojatnost tuče (engl. *Probability of Hail*, POH) na tlu. Područje u kojem je ovaj produkt dostupan prikazano je na Slici 2.3c. Izračunava se prema Waldvogel i sur. (1979.) i Foote i sur. (2005.) kao razlika u visini između najvišeg nivoa s radarskim odzivom od 45 dBZ i nivoa smrzavanja dobivenog iz prognoze operativnog NWP COSMO modela. Produkt POH evaluiran je korištenjem podataka o pojavi tuče iz osiguravajućih kuća (Morel, 2014.; Nisi i sur., 2016.) te je utvrđeno dobro slaganje između pojave tuče na tlu i  $POH \geq 80 \%$ .



**Slika 2.3** Šire europsko područje s označenim područjem Alpsko-jadranske regije od interesa na kojem su analizirana IMERG mjerenja (crni pravokutnik) te domena u kojoj su dostupna mjerenja iz mreže LINET/UBIMET (crveni trapez). (b) Položaji tučomjera u Hrvatskoj (crne točke). Područje poligona s tučomjerima u sjeverozapadnoj Hrvatskoj označeno je pravokutnikom. (c) Prostorna pokrivenost švicarskog radara (crna linija).

Treći set podataka uključuje motrenja tuče prikupljena u dnevnicima motrenja s meteoroloških postaja na cijelom teritoriju Hrvatske. Baza podataka dobivena digitalizacijom dnevnika motrenja u razdoblju 1961.-2020. sadrži motrenja sa 199 meteoroloških postaja diljem Hrvatske, od koji je 40 glavnih, 99 klimatoloških i 60 kišomjernih meteoroloških postaja. Detaljan opis ovog seta podataka dan je u (Jelić i sur.,

2020.; Blašković i sur., 2023.). Ovaj set podataka iskorišten je za evaluaciju modelskog sustava WRF-HAILCAST pri simulaciji ranojutarnje konvekcije iznad Istre, a uključuje sve meteorološke postaje koje su obuhvaćene domenom modela (više u Poglavlju 3; Slika 3.32).

## 2.2. Opis modela

### 2.2.1. Numerički modeli WRF i COSMO

Model WRF<sup>3</sup> je mezoskalni numerički model koji se koristi kao alat za prognozu vremena, ali i kao alat za istraživanje atmosfere (verzija WRF-ARW; engl. *Advanced Research WRF*). Verziju WRF-ARW razvija i održava odjel za mezoskalnu i mikroskalnu meteorologiju američkog nacionalnog centra za istraživanje atmosfere (engl. *National Center for Atmospheric Research, NCAR*). Više o modelu može se naći u Skamarock i sur. (2008.) i Skamarock i sur. (2019.). U ovom radu korištene su dvije verzije modela WRF-ARW 3.8.1 i 4.1.5, a same postavke simulacija dane su u Poglavljima 3.1.2, 3.2.2 i 3.3.2.

Osim modela WRF, korištena je i klimatska verzija modela COSMO<sup>4</sup> (COSMO-crCLIM, engl. *Consortium for Small Scale Modelling*; Baldauf i sur., 2011.; Leutwyler i sur., 2017.; Schär i sur., 2020.) temeljena na verziji COSMO 5.0. Dodatno su korišteni i rezultati najnovije verzije COSMO 6.0 modela. Model COSMO je nehidrostatički model za prognozu atmosfere ograničenog područja. Dizajniran je za korištenje u prognostičkoj (tzv. NWP) i klimatskoj verziji. Ovaj model temelji se na primitivnim termohidrodinamičkim jednadžbama koje opisuju strujanje stlačivog zraka u vlažnoj atmosferi. Detalji postavka simulacije dani su u Poglavlju 3.2.2.

Uz numeričke modele WRF i COSMO, korišteni su dijagnostički alati za simulaciju munja i tuče, LPI i HAILCAST. Kratki pregled ovih alata dan je u sljedećim poglavljima.

---

<sup>3</sup> <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>

<sup>4</sup> <https://www.cosmo-model.org/>

### 2.2.2. LPI

Mjera potencijala za stvaranje i odvajanje naboja unutar grmljavinskog oblaka koji dovodi do pojave munja naziva se indeks potencijalnog razvoja munje (LPI) (Lynn i Yair, 2008.; Yair i sur., 2010.). LPI se dobiva korištenjem volumnog integrala ukupnog masenog toka leda i tekuće vode unutar zone između 0 °C i -20 °C izoteme. Ova je zona područje u kojem je neinduktivni mehanizam najučinkovitiji, zbog prisutnosti prehladne tekuće vode (engl. *supercooled liquid water*) i čestica leda i solike (Saunders, 2008.).

LPI [ $\text{J kg}^{-1}$ ] se definira kao:

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

gdje je  $V [\text{m}^3]$  jedinični volumen modela,  $dx$ ,  $dy$ , i  $dz$  [m] koraci mreže,  $w [\text{m s}^{-1}]$  vertikalna brzina, a  $\varepsilon [\text{kg kg}^{-1}]$  bezdimenzionalni broj ovisan o omjerima miješanja solike, snijega, leda i tekuće vode. Parametar  $\varepsilon$  je definiran kao:

$$\varepsilon = 2 (Q_I Q_L)^{0.5} / (Q_I + Q_L) \quad (2.2)$$

gdje je  $Q_L [\text{kg kg}^{-1}]$  ukupni omjer miješanja tekuće vode dan sumom omjera miješanja vode u oblaku (engl. *cloud water*) ( $q_c$ ) i omjerom miješanja kiše ( $q_r$ ) [ $\text{kg kg}^{-1}$ ]. Slično,  $Q_I$  je frakcijski omjer miješanja ledenih hidrometeora:

$$Q_I = q_g \left[ \left( \frac{(q_s q_g)^{0.5}}{(q_s + q_g)} \right) + \left( \frac{(q_i q_g)^{0.5}}{(q_i + q_g)} \right) \right] \quad (2.3)$$

gdje su  $q_g$ ,  $q_i$ ,  $q_s$  [ $\text{kg kg}^{-1}$ ] omjeri miješanja solike, leda i snijega unutar oblaka.

Parametar  $\varepsilon$  je skalirajući faktor uzlazne struje i poprima vrijednosti između 0 i 1, a maksimalna vrijednost 1 postiže se kada su omjeri miješanja  $Q_I$  i  $Q_L$  jednaki. Ovo ističe činjenicu da su sve vrste hidrometeora potrebne u procesu razdvajanja naboja unutar olujnog oblaka. Više detalja o LPI-u može se naći u Lynn i Yair (2008.) te Yair i sur. (2010.).

U formulaciji LPI dijagnostike korištene u ovom radu postoji nekoliko zahtjeva koji moraju biti ispunjeni kako bi LPI za određenu točku mreže bio različit od nule. (i)

Vertikalna brzina u određenoj točki mreže mora biti veća od  $1.1 \text{ m s}^{-1}$ . (ii) Vertikalna brzina u susjednim točkama mreže (unutar radijusa od pet točaka mreže) mora biti veća od  $1.1 \text{ m s}^{-1}$ . I konačno (iii) ta određena točka mreže i njezine susjedne točke mreže moraju biti u nestabilnom okruženju. Nestabilno okruženje definira se ispitivanjem parametra sličnog CAPE-u miješanog sloja (engl. *Mixed layer CAPE*) dobivenog integracijom sloja debljine od 500 hPa počevši od 50 hPa iznad površine. Detaljan opis ovih zahtjeva može se naći u Brisson i sur. (2021.).

### 2.2.3. HAILCAST

WRF-HAILCAST je vremenski ovisan model rasta zrna tuče koji je integriran u naprednu istraživačku verziju modela WRF (WRF-ARW). Izvorni HAILCAST razvio je Poolman (1992.) te su ga dodatno razvili Brimelow i sur., (2002.), a sastojao se od modela stacionarnog oblaka spojenog s vremenski ovisnim modelom rasta zrna tuče. Model WRF kada se koristi s horizontalnim korakom mreže od 4 km i manje, može uspješno reproducirati forsiranje s veće skale, ali i mikrofizičke i konvektivne procese male skale, odnosno hidrometeore (Weisman i sur., 1997.; Kain i sur., 2006.). Štoviše, WRF može simulirati više mikrofizički vrijednih informacija u vezi s okruženjem unutar oblaka od jednodimenzionalnog modela oblaka. Stoga je korisno spojiti HAILCAST s WRF-om kako je opisano u Adams-Selin i Ziegler (2016.). Nova fizički poboljšana verzija HAILCAST-a koju su razvili Adams-Selin i Ziegler (2016.) je integrirana u model WRF, a koristi simulirane profile vertikalne brzine, omjere miješanja hidrometeora te temperature iz zadanog vremenskog koraka i stupca mreže u modelu WRF, za prognozu najvećeg očekivanog promjera zrna tuče na tlu.

Sama integracija modelskog sustava WRF-HAILCAST izgleda ovako. Ako bilo koji stupac mreže ima vertikalnu brzinu koja prelazi  $10 \text{ m s}^{-1}$  i takve vertikalne brzine traju najmanje 15 min, profili vertikalne brzine, temperature, omjeri miješanja vode, leda i snijega iz tog stupca mreže bivaju proslijeđeni HAILCAST-u. Zatim HAILCAST umetne dva embrija veličine 5 i 7.5 mm na razini  $-8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , i tri embrija veličine 5, 7.5 i 10 mm na razini  $-13 \text{ }^{\circ}\text{C}$  unutar oblaka. Ti se embriji prate u vremenski promjenjivom uzlaznom strujanju sve dok maksimalna vertikalna brzina ne padne ispod  $10 \text{ m s}^{-1}$  ili dok trajanje uzlaznog strujanja ne prijeđe 2000 s. U tom trenutku se pretpostavlja da su zrna tuče izašla iz oblaka, a informacije o maksimalnom promjeru zrna tuče šalju se natrag u model WRF, koji ih pohranjuje i nastavlja na sljedeći vremenski korak.



## 2.3. Metode evaluacije

### 2.3.1. Evaluacija prizemnih mjerenja

Satne vrijednosti temperature, relativne vlažnosti, ekvivalente potencijalne temperature i satni maksimumi brzine vjetera mjereni na automatskim meteorološkim postajama korišteni su za procjenu sposobnosti modela da simulira prizemne atmosferske uvjete na odabrane dane s tučom. Simulirane i izmjerene vrijednosti uspoređene su za sve promatrane postaje te je izvršena dekompozicija srednje kvadratne pogreške (engl. *root mean square error*, RMSE) (Murphy, 1988.; Takacs, 1985.; Taylor, 2001.). Korištena je dekompozicija RMSE u svrhu izolacije utjecaja pogreške disperzije na pristranost srednje vrijednosti i standardne devijacije čime se posljedično izolira utjecaj prostornih i vremenskih nesigurnosti između simuliranih i promatranih polja. Praktična primjena metode korištenjem numeričkih simulacija koje dopuštaju konvekciju s modelom WRF dana je u Horvath i sur. (2012.). Veličina RMSE se određuje i rastavlja na tri komponente prema Takacs (1985.) i Murphy (1988.): (i) pristranost srednje vrijednosti (MBIAS), (ii) pristranost standardne devijacije (SBIAS) i (iii) disperzija ili fazna pogreška (DISP) u skladu sa sljedećim odnosom:

$$\begin{aligned} \frac{1}{MN} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N (x_{i,k} - y_{i,k})^2 \\ = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (\bar{x}_k - \bar{y}_k)^2 + [\sigma_k(x) - \sigma_k(y)]^2 \\ + 2\sigma_k(x)\sigma_k(y)[1 - r_k(x, y)] \end{aligned} \quad (2.4)$$

gdje su  $x$  i  $y$  modelirani i izmjereni podaci; simboli  $k$  i  $i$  su indeksi u prostoru odnosno vremenu;  $M$  je broj postaja;  $N$  je broj vremenskih koraka;  $\sigma$  je standardna devijacija;  $r$  je koeficijent korelacije između modeliranih i izmjerenih podataka; a crtica označava vremensko usrednjavanje. Lijeva strana predstavlja kvadrat RMSE (srednja kvadratna pogreška), dok su tri člana na desnoj strani jednadžbe (2.4) kvadrati MBIAS, SBIAS i DISP.

### 2.3.2. Evaluacija oborine

Za evaluaciju uspješnosti modela pri simulaciji konvekcije, uspoređena je simulirana oborina s oborinom iz produkta IMEG. S obzirom da može postojati vremenski pomak između simulirane i opažene oborine, za evaluaciju su iskorištena dnevna akumulirana polja. Evaluacija se provodi određivanjem standardnih devijacija, koeficijenta korelacije i korijena srednjih kvadratnih pogrešaka između promatranih i modeliranih polja. Rezultati su sažeti pomoću Taylorovih dijagrama (Taylor, 2001.).

### 2.3.3. Evaluacija munja

Rezultati LPI-ja evaluirani su pomoću mjerenja udara munja iz mreže LINET. Ovdje treba uzeti u obzir da je teško precizno uskladiti simulacije modela kilometarske razlučivosti s mjerenjima u prostoru i/ili vremenu. Međutim, čak i simulacije koje ne odgovaraju točno mjerenjima u prostoru, vremenu ili čak intenzitetu, još uvijek mogu biti korisne (Ebert, 2008.). Iz tog razloga, u našem pristupu evaluacije koristimo metodu susjedstva s minimalnom pokrivenošću (engl. *minimum coverage neighbourhood method*). Stoga je korisna prognoza definirana kao ona u kojoj je simulirana munja bilo gdje u blizini točke u kojoj je opažena. Na temelju ove metode izrađuje se tablica kontigencije (Tablica 2.2).

**Tablica 2.2** Tablica kontigencije koja prikazuje frekvencije (a-d) parova prognoza-opažanja u kojima su događaj i ne-događaj prognozirani i opaženi.

	<b>Događaj je opažen</b>	<b>Događaj nije opažen</b>
<b>Događaj je prognoziran</b>	a	b
<b>Događaj nije prognoziran</b>	c	d

Pomoću tablice kontigencije definirana je vjerojatnost otkrivanja (engl. *Probability of Detection*, POD):

$$POD = \frac{a}{a + c} \quad (2.5)$$

i omjer lažnih alarma (engl. *False Alarm Ratio*, FAR):

$$FAR = \frac{b}{b + d} \quad (2.6)$$

Koristeći definicije stope pogodaka i stope lažnih alarma određuje se indeks simetrične ekstremne ovisnosti (engl. *Symmetric Extremal Dependence Index*, SEDI) (Ferro i Stephenson, 2011).

$$SEDI = \frac{\log FAR - \log POD - \log(1 - FAR) + \log(1 - POD)}{\log FAR + \log POD + \log(1 - FAR) + \log(1 - POD)} \quad (2.7)$$

Ovaj indeks poprima vrijednosti između -1 i 1 gdje vrijednost 1 označava savršenu prognozu. Također, prilikom evaluacije mijenjamo veličine verifikacijskih prozora kao i pragove za broj udara munja kako bismo ispitali kombinaciju razmjera i intenziteta pri kojoj je simulacija kilometarske razlučivosti korisna.

Nadalje, za evaluaciju LPI rezultata koristi se i metoda SAL (struktura-amplituda-lokacija; Wernli i sur., 2008.). Ovdje se koristi formulacija SAL metode iz R-ovog paketa *SpatialVx*<sup>5</sup>. Iako je primarno osmišljena za evaluaciju simulirane oborine, SAL metoda temeljena na identifikaciji objekata (engl. *object-based method*) koristi se po prvi put za procjenu sposobnosti LPI-a da reproducira glavne karakteristike opažene aktivnosti munje tijekom analiziranih događaja tuče.

---

<sup>5</sup> <https://rdr.io/cran/SpatialVx/man/SpatialVx-package.html>

Metoda SAL sastoji se od tri neovisne komponente: amplitude (A), lokacije (L) i strukture (S). Ove komponente dobivaju se uzimajući u obzir simulirana i promatrana polja u cijeloj domeni. Komponenta amplitude A jedina je komponenta koja ne zahtijeva identifikaciju objekata i uzima u obzir normaliziranu razliku između simuliranog i promatranog prosječnog broja munja u domeni. Vrijednosti A su između -2 i 2, dok 0 označava savršenu prognozu amplitude. Pozitivne vrijednosti pokazuju da simulirana polja precjenjuju izmjereni broj munja i obrnuto.

Lokacija, L, i struktura, S, komponente su koje zahtijevaju identifikaciju, ali ne i združivanje (engl. *matching*), objekata u simuliranim i opaženim poljima. Ovdje se objekti identificiraju nakon izgladivanja polja konvolucijom s jezgrom diska radijusa jednakog 4 točke mreže kao što su predložili Davis i sur. (2006.). Komponenta L uspoređuje lokaciju objekata u simuliranom i opaženom polju te može doseći vrijednosti između 0 i 2, a 0 označava savršenu prognozu u kojoj se centri masa simuliranih i opaženih objekata poklapaju.

Posljednja komponenta S definirana je tako da uspoređuje veličinu i oblik identificiranih objekata. S komponenta može poprimiti vrijednosti između -2 i 2. S poprima vrijednost 2 ako model simulira oborinu koja obuhvaća cijelu domeni u slučaju kada je opažena lokalizirana konvekcija. S druge strane S poprima vrijednost -2 u slučaju kada model simulira premale ili preintenzivne objekte.

#### 2.3.4. Evaluacija tuče

Na kraju, rezultati HAILCAST-a evaluirani su pomoću dva intrinzično različita skupa podataka – mjerenja tuče s hrvatske mreže tučomjera i radarskih produkata švicarske radarske mreže.

Za evaluaciju rezultata HAILCAST s radarskim produktima koristi se metoda susjedstva s minimalnom pokrivenošću s različitim veličinama verifikacijskih prozora i kategoričkim verifikacijskim metrikama kao što je vjerojatnost otkrivanja (engl. *Probability of Detection*, POD), omjer lažnih alarma (engl. *False Alarm Ratio*, FAR) i indeks ekstremne ovisnosti (engl. *Extremal Dependence Index*, EDI) (Ferro i Stephenson, 2011.). Indeks EDI dan je relacijom:

(2.8)

$$EDI = \frac{\log FAR - \log POD}{\log FAR + \log POD}$$

gdje su POD i FAR definirani relacijama (2.5) i (2.6). Metrike SEDI i EDI definirane su kao prikladne metrike za evaluaciju rijetkih ekstremnih događaja kao što je pojava tuče i munja.

Za razliku od HAILCAST-a, mreža tučomjera nam pruža prostorno ograničene informacije o pojavi tuče budući da tučomjeri mogu zabilježiti tuču samo na mjestu gdje su postavljeni. Potencijalno, tuča bi se mogla pojaviti u blizini tučomjera ili bilo gdje između dva tučomjera i ostati nezabilježena. Kako je Hrvatska tek od 2022. godine u potpunosti pokrivena dvojno-polarizacijskim radarima<sup>6</sup> prostorno kontinuirane informacije o pojavi tuče dobivene daljinskim mjerenjima, poput radara, nisu bile dostupne. Štoviše, interpolacija mjerenja tuče s mreže tučomjera nije provedena, budući da bi optimalna udaljenost između susjednih tučomjera za dobro dijagnosticirana interpolirana polja trebala biti u rasponu od 3-3.5 km (Dalezios i sur., 2002.), a prosječna udaljenost između mjerenih podataka tuče u Hrvatskoj je ~ 5.5 km. Stoga, pri evaluaciji rezultata HAILCAST-a u odnosu na mjerenja tuče, potrebno je evaluirati prostorno kontinuirana polja u odnosu na točkasta opažanja. Također smo morali uzeti u obzir da je tuča pojava lokalnog karaktera i da modeli s mrežnim korakom od 1 km na više imaju poteškoće s preciznim usklađivanjem, u prostoru, vremenu ili intenzitetu, promatranih obilježja lokalnih fenomena. Međutim, čak i prognoze koje se ne poklapaju točno s opažanjima u prostoru, vremenu ili čak intenzitetu, mogu biti korisne. Posljedično, u našem pristupu evaluacije, korisnom prognozom definiramo onu u kojoj je tuča simulirana unutar dopuštenog radijusa pomaka od točke u kojoj je opažena. Na taj način ne zahtijevamo da se prognoza točno podudara s opažanjima, nego uspješnima ocjenjujemo i prostorno bliske prognoze.

Za prevladavanje izazova povezanih s ograničenim prostornim informacijama iz točkastih mjerenja i izbjegavanje učinka dvostruke kazne koja se javlja kada se verificiraju malo pomaknute prognoze modela velike razlučivosti iznimno rijetkih događaja (Ebert, 2008.), predložena metodologija za evaluaciju prostorno kontinuiranih prognoza tuče u odnosu na točkasta mjerenja ovog ekstremnog binarnog događaja koristi skaliranu metodu susjedstva (engl. *upscaled neighbourhood method*). Za razliku od metode evaluacije točka na točku (engl. *point to point method*), metode susjedstva ne zahtijevaju

---

<sup>6</sup> [https://meteo.hr/istrazivanje.php?section=projekti&param=projekti\\_u\\_tijeku&el=metmonic](https://meteo.hr/istrazivanje.php?section=projekti&param=projekti_u_tijeku&el=metmonic)

da se prognoza precizno podudara s opažanjima dopuštajući manja odstupanja. Drugim riječima, metode susjedstva zahtijevaju da su prognoze približne mjerenjima u prostoru, vremenu, intenzitetu ili drugim važnim aspektima (Ebert, 2008.).

Uvažavajući različite prednosti i ograničenja gore navedenih pristupa ovdje predložena metodologija verifikacije temelji se na već postojećim metodama verifikacije kao što su metoda točke na točku (engl., *point to point method*), metoda skaliranja (engl. *upscaled neighbourhood method*) i metoda verifikacije minimalne pokrivenosti (engl. *minimum coverage neighbourhood method*) kako je opisano u Ebert (2008.). Iako se koriste već postojeće i dobro testirane metode, prema saznanju autora, ovo je prvi put da se navedene metode koriste zbirno te su primijenjene na (binarne) događaje kao što je tuča. Predložena metoda evaluacije shematski je ilustrirana na Slici 2.3 i može se opisati kako slijedi.

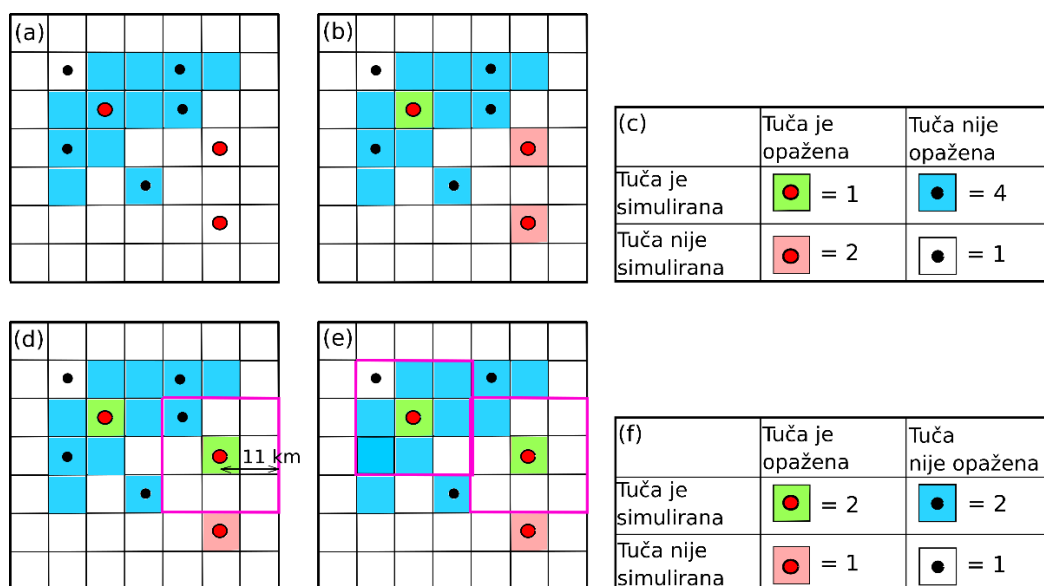
Slika 2.3a ilustrira početnu točku procesa evaluacije – imamo prostorno kontinuiranu prognozu tuče i neravnomjerno raspoređene pogođene i nepogođene tučomjere. Prvi korak je korištenje metode točka na točku za usklađivanje promatranja točke s prognozom iz najbliže točke mreže modela (Slika 2.3b). To nam ostavlja tablicu kontigencije prikazanu na Slici 2.3c. Treba uzeti u obzir da se tablica kontigencije dobiva sumiranjem broja tučomjera koji se smatraju pogocima (tučomjer je pogođen i tuča je simulirana na najbližoj točki mreže modela), lažnih alarma (tučomjer nije pogođen, ali tuča je simulirana), promašaja (tučomjer je pogođen, ali tuča nije simulirana) i ispravnih negativnih ishoda (tučomjer nije pogođen i tuča nije simulirana). Točke mreže koje nisu pokrivene tučomjerima nisu dio tablice kontigencije jer im nedostaje informacija o pojavi tuče.

Time prelazimo na drugi korak evaluacije (Slika 2.3d), gdje se vrši korekcija točka na točku metode korištenjem metode susjedstva s dopuštenim radijusom pomaka od 11 km (u ovom shematskom prikazu i kasnije u Poglavlju 3.1.6). Ovdje ispituje samo pogođene tučomjere i provjeravamo je li tuča simulirana unutar dopuštenog radijusa pomaka. Ako jest, taj tučomjer smatramo pogotkom, a ako nije, smatramo ga promašajem. Time smanjujemo broj promašaja i povećavamo broj pogodaka u usporedbi s rezultatima metode 'točke na točku' korištene u prethodnom koraku. Ovdje skeniramo područje samo pogođenih tučomjera jer ne možemo biti sigurni je li tuča pala u blizini nepogođenog tučomjera. Na ovaj način dopuštamo modelu malu prostornu pogrešku u simulaciji tuče, ali to ne činimo kažnjavajući ga za simuliranje tuče u blizini nepogođenog tučomjera jer ne možemo biti sigurni da se tuča doista nije dogodila negdje u blizini nepogođenog

tučomjera. Treba uzeti u obzir da Slika 2.3d prikazuje kvadratni verifikacijski prozor umjesto kružnog verifikacijskog prozora koji se koristi u našem pristupu evaluacije, jer je lakše formulirati shematski pregled verifikacije na pravokutnoj mreži.

Sljedeći korak (Slika 2.3e) razmatra filtriranje lažnih alarma u području unutar 11 km od polja s pogođenim tučomjerom. Svaka postaja na kojoj je tuča simulirana, a nije izmjerena i nalazi se unutar 11 km od postaje koja je izmjerila tuču, zanemarena je u tablici kontigencije. Stoga u ovom koraku smanjujemo broj lažnih alarma oko područja koje je prijavilo tuču. Dakle, dovršavanjem ovog koraka ne kažnjavamo model za simulaciju tuče tamo gdje nije primijećena, sve dok su susjedne točke registrirale tuču. Stoga dopuštamo modelu da simulira tuču bilo gdje blizu (do 11 km) pogođenog tučomjera te time predstavljamo nesigurnost u mjerenjima i uzimamo u obzir nemogućnost modela velike razlučivosti da točno reproducira fenomene lokalnih razmjera.

Konačno, posljednji korak (Slika 2.3f) uključuje izradu tablice kontigencije i račun kategoričkih verifikacijskih metrika (engl. *categorical skill scores*), kao što su POD, FAR i EDI.



**Slika 2.3.** Shematski opis metodologije evaluacije. (a) Početna točka procesa evaluacije. Plavo sjenčanje označava ćelije u kojima je simulirana tuča. Nepogođeni tučomjeri prikazani su crnim točkama, a pogođeni crvenim točkama. (b) Metoda evaluacije točka na točku. Pogoci su osjenčani zelenom bojom, a promašaji crvenom bojom. (c) Tablica kontigencije kao rezultat metode evaluacije točka na točku. (d) Metoda minimalne pokrivenosti. Verifikacijski prozor označen je rozim kvadratom. (e) Skaliranje opažanja tuče. Verifikacijski prozori označeni su rozim kvadratima. (f) Konačna tablica kontigencije.

## 2.4. Metoda dekompozicije skala

Radi postizanja boljih zaključaka vezano za treći cilj istraživanja i postavljenu hipotezu namjera je u radnji napraviti dekompoziciju skala strujanja. U svrhu odvajanja doprinosa makro-, mezo- i mikroskale ukupnom strujanju, korištena je metoda dekompozicije skala temeljena na Barnesovom filtru sukladno s metodologijom prikazanom u Xu i sur. (2017.).

Općenito, Barnesov filter konstruiran je na temelju Barnesove metode objektivne analize (Barnes, 1973.) koja generira polje  $A(x, y)$  na definiranoj mreži pomoću mjerenja  $A_k$  gdje je  $k = 1, 2, \dots, N$ . Prvo je predstavljena općenita formulacija Barnesove metode, a kasnije je opisana primjena na simulacije ranojutarnje tuče nad Istrom. Prvi korak Barnesove analize podrazumijeva pridruživanje prvotne vrijednosti svakoj točki mreže:

$$A_G(i, j) = \frac{\sum_{k=1}^N w_k A_k}{\sum_{k=1}^N w_k} \quad (2.9)$$

gdje je  $w_k = \exp\left(-\frac{r_k^2}{4c}\right)$  težinska funkcija,  $r_k$  je udaljenost  $k$ -te postaje od  $(i, j)$  točke mreže, a  $c$  je unaprijed određena konstanta. Drugi korak podrazumijeva korekciju prvotne vrijednosti na način:

$$A(i, j) = A_G(i, j) + \frac{\sum_{k=1}^N w'_k E_k}{\sum_{k=1}^N w'_k} \quad (2.10)$$

gdje je  $E_k = A_k - A_{Gk}$  razlika (ili pogreška) između mjerenja i prvotne vrijednosti na  $k$ -toj postaji i  $w'_k = \exp\left(-\frac{r_k^2}{4c\lambda}\right)$  uz  $0 < \lambda < 1$ .  $A_{Gk}$  predstavlja prvotnu vrijednost dobivenu jednadžbom (2.9) za  $k$ -tu postaju. Ako su zadane konstante  $\lambda$  i  $c$ , funkcija odziva za valnu duljinu  $L$  prema Barnes (1973.) je:

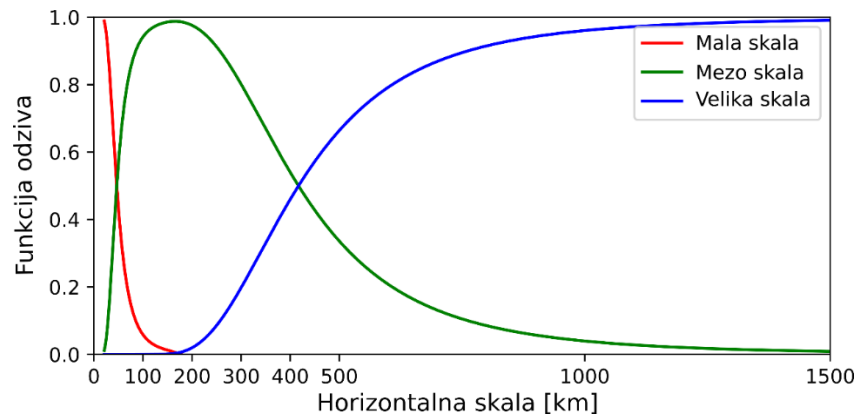
$$R(L) = R_0(1 + R_0^{\lambda-1} - R_0^\lambda) \quad (2.11)$$

gdje je  $R_0 = \exp\left(-\frac{4c\pi^2}{L^2}\right)$  funkcija odziva relacije (2.9). Funkcija odziva dana jednadžbom (2.11) predstavlja postotak valne amplitude na horizontalnoj skali  $L$  koja je zadržana prilikom primjene Barnesovog filtra.

Funkcija odziva korištena u ovoj analizi prikazana je na Slici 2.3. Filter je primijenjen na komponente simulirane horizontalne brzine  $u$  i  $v$ . Prvo je iz cjelokupnog polja filtrirana brzina koja odgovara maloj skali ( $u_s, v_s$ ) uzimajući  $c = 100$  i  $\lambda = 0.8$ . Pripadna funkcija odziva prikazana je kao crvena linija na Slici 2.3. Zatim je iz ukupnog



polja filtrirana brzina koja odgovara velikoj skali ( $u_l, v_l$ ) uzimajući  $c = 4500$  i  $\lambda = 0.3$ . Vrijednosti parametara  $c$  i  $\lambda$  odabrane su prema Xu i sur. (2017.) uzimajući u obzir veličinu razmatrane domene. Na kraju, brzina koja odgovara mezoskali dobivena kao  $u_m = u - u_l - u_s, v_m = v - v_l - v_s$ .



**Slika 2.3** Funkcija odziva za filtriranje strujanja makroskale (plavo), mikroskale (crveno) i mezoskale (zeleno).

## 3. Rezultati

### 3.1. Testovi osjetljivosti rezultata na odabir shema parametrizacije

#### 3.1.1. Odabrani slučajevi tuče

Za simulacije su odabrana tri slučaja tuče iznad Hrvatske prema njihovom intenzitetu i dostupnosti podataka (Tablica 3.1). Prvi odabrani slučaj (S1) dogodio se 25. lipnja 2017., predstavljajući jednu od najintenzivnijih oluja s tučom u našoj bazi podataka. Središnja je Europa tog dana bila pod utjecajem visinske doline. Kako se visinska dolina premještala prema istoku, u sjevernom Jadranu se razvila plitka ciklona. Tijekom ovog događaja nad Hrvatskom se formiralo nekoliko mezoskalnih konvektivnih sustava, što je rezultiralo pojavom tuče nad velikim dijelom Hrvatske. Tog dana 72 tučomjera zabilježila su tuču, s najvećim izmjerenim promjerom zrna tuče od 31.4 mm. Ova epizoda tuče bila je popraćena jugozapadnim visinskim strujanjem, što je najčešći tip visinskog strujanja povezan s pojavama tuče/munja u Hrvatskoj (Mikuš i sur., 2012.; Jelić i sur., 2020.). Štoviše, tijekom ovog događaja na postaji Zagreb Maksimir zabilježena je maksimalna ukupna dnevna količina oborine od 34.9 mm uz maksimalni intenzitet oborine od 1.8 mm/min.

Drugi slučaj (S2) dogodio se 24. srpnja 2017., kada je središnja Europa bila pod utjecajem ciklone što je rezultiralo jugozapadnim strujanjem nad Hrvatskom. Premještanjem ciklone prema jugu, preko Hrvatske je prošla hladna fronta čime se stvorilo nevrijeme s tučom. Tuču je detektiralo devet tučomjera, a najveći izmjereni promjer zrna tuče bio je 54.2 mm. Tijekom ovog događaja na postaji Križevci zabilježena je maksimalna ukupna dnevna količina oborine od 34.8 mm uz maksimalni intenzitet oborine od 1.4 mm/min.

Slična situacija dogodila se i tijekom trećeg slučaja (S3), 16. rujna 2017. Tada se nad Europom razvila intenzivna visinska dolina sa središtem u južnoj Europi. Dok je visinska dolina prolazila Alpe, iznad Genove se razvila plitka ciklona. Ova se ciklona kretala prema istoku preko talijanskog poluotoka i duž jadranske obale. Ovaj događaj s tučom također je bio popraćen visinskim jugozapadnim strujanjem. Tuča je zabilježena u večernjim i

noćnim satima, od 17 do 00 UTC, diljem središnje Hrvatske. Tijekom ovog događaja 22 tučomjera detektirala su tuču, a najveći izmjereni promjer zrna tuče bio je 23.1 mm dok je najveća zabilježena dnevna količina oborine iznosila 77.7 mm na postaji Puntijarka uz maksimalni intenzitet oborine 11.5 mm/min.

Prizemne i visinske karte koje odgovaraju navedenim slučajevima dane su u Dodatku A, Slika A1. Prostorna raspodjela pogođenih tučomjera prikazana je na Slici 3.7 i Slici 3.9.

**Tablica 3.1** Prikaz odabranih slučaja tuče za simulacije. Navedene su ključne meteorološke karakteristike koje su dovele do pojave tuče, broj pogođenih tučomjera, maksimalna dnevna količina oborine kao i maksimalni intenzitet oborine.

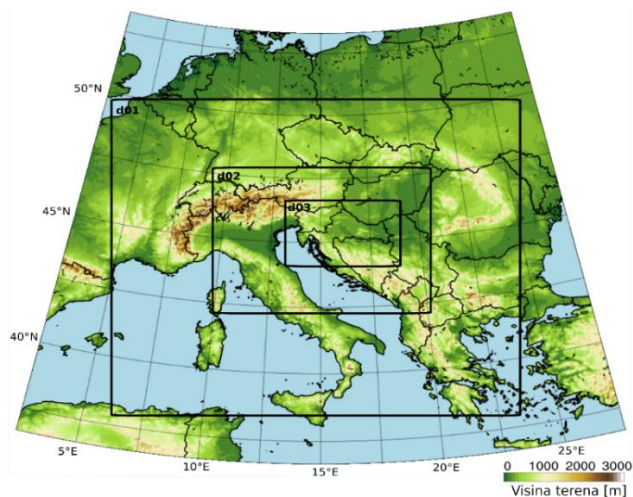
Slučaj	Datum	Opis događaja	Broj pogođenih tučomjera	Max promjer zrna tuče [mm]	Max dnevna količina oborine [mm]	Max intenzitet oborine [mm/min]
<b>S1</b>	25.06.2017.	Visinska dolina nad središnjom Europom, ciklona nad sjevernim Jadranom	72	31.4	34.9	1.8
<b>S2</b>	24.07.2017.	Ciklona nad središnjom Europom, hladna fronta nad Hrvatskom	9	54.2	34.8	1.4
<b>S3</b>	16.09.2017.	Intenzivna visinska dolina nad Europom, ciklona nad talijanskim poluotokom	22	23.1	77.7	11.5

### 3.1.2. Postavke simulacija

Odabrani događaji s tučom simulirani su pomoću modela WRF (verzija 3.8.1) (Skamarock i sur., 2008.) uz dijagnostike HAILCAST i LPI. Postavke modela podrazumijevale su tri jednosmjerno ugniježdene domene s horizontalnim koracima mreže od 9 km (204 × 180 točaka mreže), 3 km (328 × 232 točke mreže) i 1 km (535 × 334 točke mreže) (Sl. 3.1). Uzimajući u obzir kompleksnost terena, položaj domena predstavlja kompromis između

nekoliko čimbenika: (i) obuhvaćanje osnovnih pokretačkih sila koje utječu na pojavu konvektivne aktivnosti, (ii) dominantno strujanje (JZ sinoptičko strujanje), (iii) orografija, (iv) područje od interesa (tj. sjeveroistočni Jadran i zaleđe Dinarida) i (v) dovoljno udaljena manja domena od zone relaksacije veće domene. Slične postavke domena već su analizirane i testirane u prethodnim studijama s fokusom na konvekciju u Hrvatskoj (Šepić i sur., 2009.; Orlić i sur., 2010.; Kehler-Poljak i sur., 2017.; Renko i sur., 2018.; Horvath i sur., 2019.). Uzimajući u obzir važnost gusto položenih vertikalnih nivoa (npr. Fiori et al., 2014.) i osjetljivost indeksa dobivenih radiosondažnim mjerenjima na vertikalno uzorkovanje (npr. Manzato, 2008.), postavke modela uključivale su 97 vertikalnih nivoa od kojih je 61 nivo bio u prvih 10 km atmosfere. Vremenski korak modela iznosio je 40 s u domeni 1, u domeni 2 13.33 s, a u domeni 3 4.44 s. Koraci mreže od 3 i 1 km omogućili su da model eksplicitno tretira mnoge konvektivne procese (Kain i sur., 2006., 2008.), pa stoga na tim domenama nije korištena parametrizacija konvekcije. U najgrubljoj domeni (d01), konvekcija je parametrizirana upotrebom Kain-Fritschove sheme (Kain i Kain, 2004.). Ostale korištene parametrizacije uključivale su RRTM shemu (Mlawer i sur., 1997.) za dugovalno zračenje i Dudhia shemu (Dudhia, 1989.) za kratkovalno zračenje. Što se tiče parametrizacija PBL-a i mikrofizike (MP), upotrijebili smo pristup multifizičkog ansambla. Kombinacije s tri različite parametrizacijske sheme za PBL i četiri različite sheme parametrizacije za MP dale su ukupno 12 različitih modelskih postavki (Tablica 3.2).

Odabrane MP sheme bile su Pardue Lin (Lin i sur., 1983.; Chen i Sun, 2002.) shema (LIN), WRF jednomomentna shema sa šest klasa hidrometeora (WSM6) (Hong i Lim, 2006.), dvomomentna Morrisonova shema (MORR) (Morrison i sur., 2009.) i dvomomentna shema nacionalnog laboratorija za olujno vrijeme (engl. *National Severe Storms Laboratory Two Moment Scheme*, NSSL2) (Mansell i sur., 2010.). Navedene postavke sažete su u Tablici 3.2. Odabrane su jednomomentne (NSSL2 i WSM6) i dvomomentne (LIN i MORR) sheme s ciljem smanjenja nesigurnosti u simulaciji ključnih mikrofizičkih procesa odgovornih za nastanak tuče i munja. Nadalje, korištene su tri različite PBL sheme: shema PBL Sveučilišta Yonsei (YSU) (Hong i sur., 2006.) shema nelokalnog tipa, odnosno shema Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN) (Nakanishi i Niino, 2006.) i Bougeault-Lacarrere (BouLac) (Bougeault i Lacarrere, 1989.) lokalnog tipa zatvaranja turbulencije.



**Slika 3.1.** Položaj jednosmjerno ugniježđenih domena s horizontalnim koracima mreže od 9, 3 i 1 km (pravokutnici) na domenama d01, d02 i d03 korištenih za simulacije modelom WRF. Različite boje označava visinu terena.

**Tablica 3.2** Pregled članova multifizičkog ansambla s navedenim shemama parametrizacije mikrofizike, graničnog sloja (PBL), konvekcije, dugovalnog i kratkovalnog zračenja.

Član ansambla	Mikro-fizika	PBL	Konvekcija na domeni d01	Dugovalno zračenje	Kratkovalno zračenje
<b>LIN-MYNN</b>	LIN	MYNN	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia
<b>WSM6-MYNN</b>	WSM6	MYNN	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia
<b>MORR-MYNN</b>	MORR	MYNN	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia
<b>NSSL2-MYNN</b>	NSSL2	MYNN	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia
<b>LIN-YSU</b>	LIN	YSU	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia
<b>WSM6-YSU</b>	WSM6	YSU	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia
<b>MORR-YSU</b>	MORR	YSU	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia
<b>NSSL2-YSU</b>	NSSL2	YSU	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia
<b>LIN-BouLac</b>	LIN	Bougeault-Lacarrere	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia
<b>WSM6-BouLac</b>	WSM6	Bougeault-Lacarrere	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia
<b>MORR-BouLac</b>	MORR	Bougeault-Lacarrere	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia
<b>NSSL2-BouLac</b>	NSSL2	Bougeault-Lacarrere	Kain-Fritsch	RRTM	Dudhia

Početni i rubni uvjeti preuzeti su iz operativne analize ECMWF IFS modela s prostornom rezolucijom od  $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ . Sve su simulacije inicijalizirane u 12 UTC dan prije pojave tuče, osiguravajući potrebno vrijeme prilagodbe (engl. *spinup time*) do 12 sati (Skamarock i sur., 2008.), dok su rubni uvjeti ažurirani svakih 6 sati. Dodatno, prognoza tuče i munja dobivena je korištenjem dijagnostike algoritama HAILCAST i LPI na domeni od 1 km.

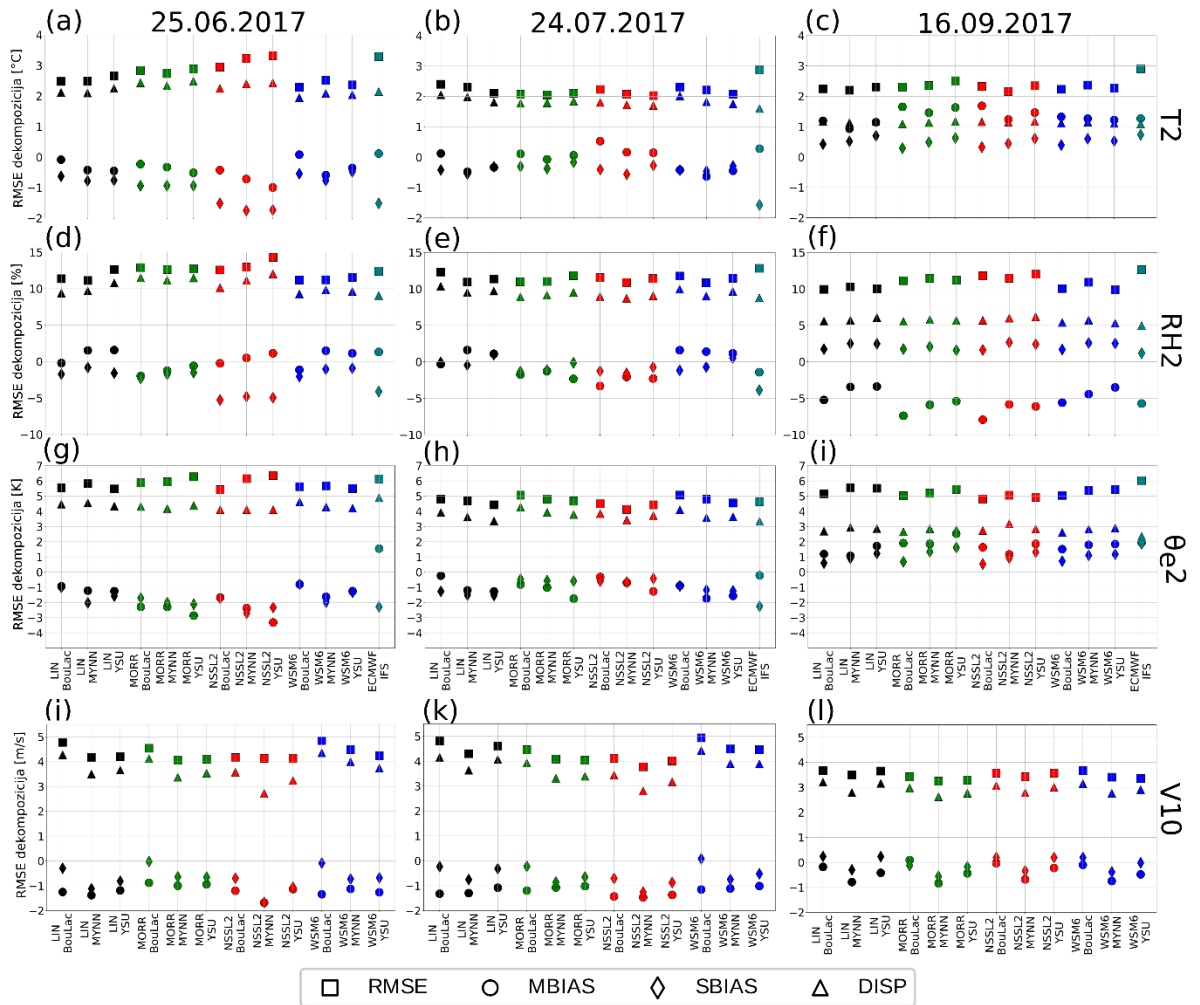
### 3.1.3. Usporedba s prizemnim mjerenjima

Prva faza evaluacije rezultata podrazumijeva usporedbu između simuliranih i izmjerenih satnih vrijednosti 2-m temperature (T2), 2-m relativne vlage (RH2), 2-m ekvivalentne potencijalne temperature ( $\Theta_e2$ ) i satnih maksimuma 10-m brzine vjetera (V10) na automatskim meteorološkim postajama diljem Hrvatske. Usporedba je napravljena za razdoblje između 00 UTC i 24 UTC na dan kad je opažena tuča i za točku mreže najbližu položaju meteorološke postaje, Slika 3.2. RMSE komponente u prosjeku za sve postaje pokazuju slične rezultate za sve članove ansambla i sve razmatrane slučajeve. RMSE ne prelazi  $3.3\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $14.3\%$ ,  $4.9\text{ m s}^{-1}$  i  $6.4\text{ K}$  za T2, RH2, V10, odnosno  $\Theta_e2$ . Štoviše, za 25. lipnja 2017. i 24. srpnja 2017. najveći doprinos RMSE-u daju pogreške u fazi, što ukazuje na to da su prisutni vremenski i/ili prostorni pomaci između simuliranih i promatranih polja. Iako je RMSE općenito manji za slučaj od 16. rujna 2017., postoji veći doprinos pristranosti srednje vrijednosti RMSE-u u usporedbi s drugim slučajevima. Pozitivan MBIAS za T2 i negativan MBIAS za RH2 sugeriraju da je model općenito precijenio opaženu temperaturu i, posljedično, podcijenio opaženu relativnu vlažnost. Veličina MBIAS za  $\Theta_e2$  pokazuje da je ekvivalentna potencijalna temperatura podcijenjena u slučajevima 25. lipnja 2017. i 24. srpnja 2017., ali precijenjena u slučaju 16. rujna 2017.

Nadalje, rezultati WRF-a u simulaciji T2, RH2 i  $\Theta_e2$  uspoređeni su s rezultatima Integriranog prognostičkog sustava Europskog centra za srednjoročnu prognozu vremena ECMWF IFS (Slika 3.2). Model WRF je uspješniji u usporedbi s ECMWF IFS-om u smislu simulacije T2 u sva tri promatrana slučaja (osim članova NSSL2 za slučaj 25. lipnja 2017.), ali pokazuje slične rezultate u simulaciji opaženih vrijednosti RH2 za 25. lipnja 2017. i 24. srpnja 2017. ili nešto bolje za slučaj 16. rujna 2017. Općenito, oba modela pokazuju slične rezultate u simulaciji promatranih vrijednosti  $\Theta_e2$  iako ECMWF IFS pokazuje pozitivan MBIAS za slučaj od 25. lipnja 2017. za razliku od negativnog MBIAS-a koji su proizveli svi članovi WRF ansambla. Štoviše, treba uzeti u obzir da se uspješnost WRF-a procjenjuje korištenjem 1-satnih polja, dok se uspješnost ECMWF IFS-a

procjenjuje pomoću 3-satnih polja jer 1-satni izlazi nisu dostupni za ECMWF IFS model. Međutim, rezultati su slični prikazanima ako uspoređujemo 3-satna polja iz WRF-a i 3-satna polja iz ECMWF IFS (nije prikazano).

Općenito, svi članovi ansambla za sve slučajeve dobro reprezentiraju prizemne atmosfere uvjete, a pripadne pogreške u rangu su pogrešaka dobivenih u drugim numeričkim studijama i sličnim područjem od interesa (npr. Poljak i sur., 2014.; Milovac i sur., 2016.; Kehler-Poljak i sur., 2017.). Različite kombinacije shema parametrizacije nisu pokazale sustavnu tendenciju precjenjivanja ili podcjenjivanja prizemnih mjerenja (ako analiziramo sve slučajeve zajedno), što se djelomično može pripisati usrednjavanju pogrešaka unutar domene. Lokalno, odstupanja na pojedinoj postaji mogu biti veća. Uzimajući u obzir važnost evaluacije prizemnih mjerenja na pojedinim postajama pogođenim olujnim vremenom za razliku od usrednjavanja rezultata u cijeloj domeni, odabiru se dvije reprezentativne postaje za svaki analizirani događaj tuče, te se za te postaje pregledavaju izmjereni i simulirani vremenski nizovi prizemnih mjerenja. Rezultati su prikazani u Dodatku B (Slike B1-B3). Sve u svemu, većina članova ansambla dobro je reproducirala vremenski razvoj promatranih prizemnih vrijednosti, iako precjenjivanja i podcjenjivanja još uvijek postoje, ovisno o analiziranom slučaju. Najlošiji rezultati dobiveni su za maksimalne brzine vjetra vjerojatno zbog tendencije modela da pomakne promatrane maksimume u vremenu (i moguće u prostoru).



**Slika 3.2.** Statistički parametri RMSE dekompozicije za sve članove ansambla. Svaki član ansambla je označen na  $x$  osi akronimom koji označava kombinaciju mikrofizike i PBL sheme parametrizacije (iz Tablice 3.2). RMSE označava ukupni RMSE, MBIAS pristranost (bias) srednje vrijednosti, SBIAS pristranost (bias) standardne devijacije i DISP disperziju ili faznu pogrešku. Dani su rezultati za temperaturu na 2 m (a), (b) i (c); 2-m relativnu vlažnost (d), (e) i (f); 2-m ekvivalentnu potencijalnu temperaturu (g), (h) i (i); 10-m brzinu vjetra (j), (k) i (l); za tri analizirana događaja tuče (kolone). Svaki simbol predstavlja srednje vrijednosti RMSE, MBIAS, SBIAS i DISP za sve razmatrane postaje. Boje predstavljaju članove s istom mikrofizičkom shemom. Tirkizni markeri predstavljaju vrijednosti povezane s ECMWF IFS modelom.

### 3.1.4. Rezultati primjene LPI-a

Indeks potencijala za razvoj munje, LPI [ $\text{J kg}^{-1}$ ] ukazuje na područja gdje postoji potencijal za električnu aktivnost i kao takav nije izravno povezan s opaženim brojem udara munja. Stoga, da bi se kvantitativno usporedila ova dva polja, potrebno je izvršiti konverziju LPI u broj udara munja. Ovdje je izvršena konverzija LPI-a u broj udara munja, slično Brissonu i sur. (2021.), prvo definirajući minimalnu vrijednost LPI,  $t$ , za koju je proizveden udar



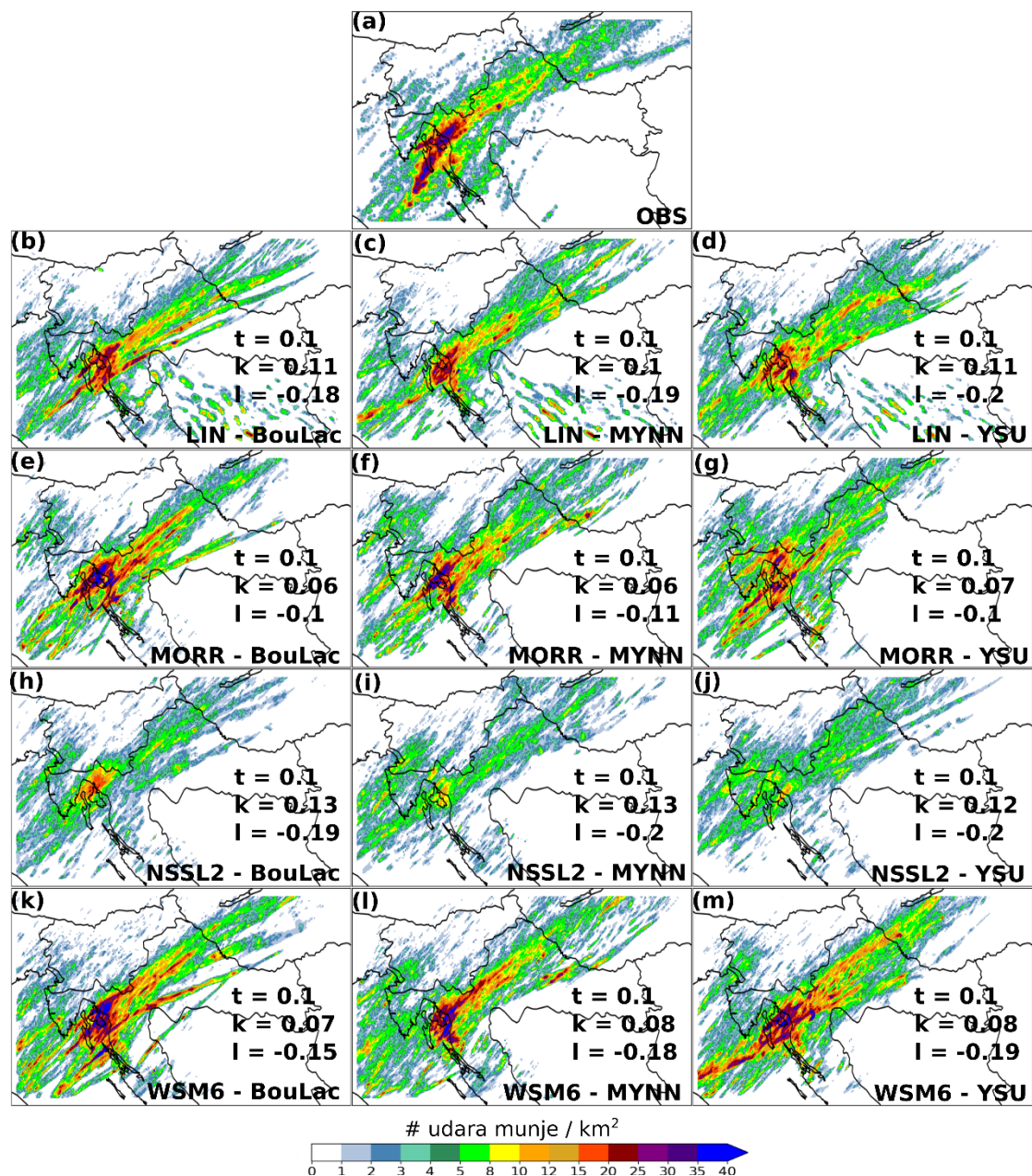
munje. Drugo, pretpostavljamo linearni odnos između LPI-a i broja udara munja, tako da vrijedi:

$$LPI_{adj} = \begin{cases} 0, & LPI \leq t \\ k \cdot LPI + l, & LPI > t \end{cases} \quad (3.1)$$

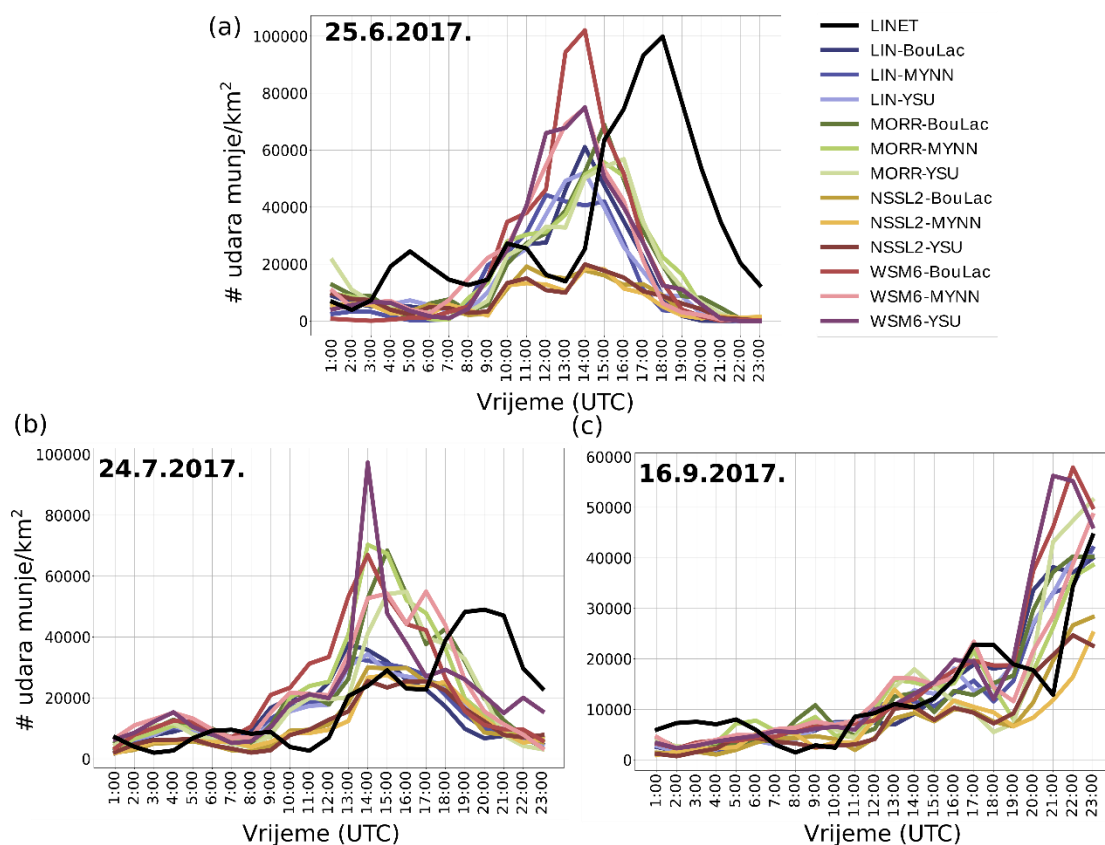
gdje  $LPI_{adj}$  [ $\text{km}^{-2} \text{h}^{-1}$ ] označava prilagođeni LPI, tj. LPI pretvoren u broj udara munja. Nadalje, parametri  $t$ ,  $k$  i  $l$  uzorkovani su kroz intervale  $[0,001, 10]$ ,  $[0, 5]$ ,  $[-20,20]$  s korakom od 0.01, respektivno, i za svaku kombinaciju ovih parametara te svaku točku mreže izračunavaju se satne srednje vrijednosti  $LPI_{adj}$ . Zatim se funkcija distribucije povezana sa satnom srednjom vrijednosti  $LPI_{adj}$  uspoređuje s funkcijom distribucije povezanom s opaženim satnim srednjacima broja udara munja. Optimalne vrijednosti parametara  $k$ ,  $l$  i  $t$  su one za koje je RMSE između dviju razmatranih funkcija distribucije minimalna. Za svaku od dvanaest konfiguracija modela i svaki od tri promatrana slučaja tuče, jedinstveni skup parametara,  $k$ ,  $l$  i  $t$ , minimiziraju RMSE, što dovodi do skupa od 36 vrijednosti za svaki parametar. Dalje su odabrane srednje vrijednosti dobivenih skupova parametara kako bismo istražili potencijalna odstupanja u različitim konfiguracijama modela i različitim slučajevima tuče. Medijani i pripadne standardne devijacije su  $t = 0.1 \pm 0.09$ ,  $k = 0.11 \pm 0.04$  i  $l = -0.3 \pm 0.35$ .

Slika 3.3 prikazuje dnevne sume  $LPI_{adj}$  i opaženog broja udara munja iz mreže LINET interpoliranog na mrežu modela za jedan od analiziranih slučajeva tuče (16. rujna 2017.). Sve u svemu, svi članovi ansambla dobro reproduciraju osnovne prostorne karakteristike opažene aktivnosti munja, iako postoje lokalne razlike između simulirane i opažene aktivnosti munja. Međutim, članovi ansambla s mikrofizičkom shemom NSSL2 podcjenjuju intenzitet izmjerene aktivnosti munja. S druge strane, najintenzivniju aktivnost munja proizvode članovi s mikrofizičkom shemom WSM6 i MORR. Uz to, Slika 3.3b–m prikazuje vrijednosti  $t$ ,  $k$  i  $l$  koje optimiziraju svaki član skupa zasebno, iako su prikazana polja dobivena uzimanjem u obzir srednjih vrijednosti  $t$ ,  $k$  i  $l$ . Parametri  $t$ ,  $k$  i  $l$  koji optimiziraju svaki član ansambla posebno ne mijenjaju se značajno između članova (to također vrijedi za dva slučaja koji nisu prikazani) što ukazuje da standardne devijacije povezane s ovim parametrima dolaze iz razlika između slučajeva, a ne razlike između članova ansambla. Ovo naglašava činjenicu da bi bilo potrebno više slučajeva za dobivanje skupa parametara koji su optimalni u većini okruženja grmljavinskih oluja. Također, vrijednosti koje optimiziraju članove s NSSL2 shemom parametrizacije u rangsu su vrijednosti koje pripadaju ostalim članovima ukazujući da tendencija NSSL2 članova za simulacijom manje intenzivne aktivnosti munja proizlazi iz karakteristika modelskih postavaka, a ne odabira parametara za prilagodbu.

Gledajući vremensku evoluciju aktivnosti munja, možemo naći slične zaključke (Slika 3.4). Slika 3.4 prikazuje satne sume simuliranog i izmjenog broja udara munja u cijeloj 1-km domeni prikazanoj na Slici 3.1. Jasno je da članovi s mikrofizičkom shemom NSSL2 sustavno podcjenjuju opaženu aktivnost munja, dok članovi s najintenzivnijom aktivnošću munja uglavnom imaju mikrofizičku shemu WSM6.



**Slika 3.3.** Usporedba izmjerene i simulirane akumulacije udara munja u vremenskom intervalu od 00 UTC do 24 UTC 16. rujna 2017. za (a) mjerenja iz mreže LINET/UBIMET, (b) LIN-BouLac, (c) LIN-MYNN, (d) LIN-YSU, (e) MORR-BouLac, (f) MORR-MYNN, (g) MORR-YSU, (h) NSSL2-BouLac, (i) NSSL2-MYNN, (j) NSSL2-YSU, (k) WSM6 -BouLac, (l) WSM6-MYNN, i (m) WSM6-YSU. Kao referenca, vrijednosti  $t$ ,  $k$ ,  $l$  koje optimiziraju pojedine članove ansambla navedene su iznad akronima člana ansambla. Međutim, prikazana polja dobivena pomoću medijana  $t$ ,  $k$ ,  $l$  vrijednosti za sve članove ansambla i sve razmatrane slučajeve.



**Slika 3.4.** Satne sume broja udara munja u cijeloj domeni (d03 sa Slike 3.1) za tri analizirana slučaja tuče: (a) 25. lipnja 2017., (b) 24. srpnja 2017. i (c) 16. rujna 2017. Prikazana je i mjerena (crno) i simulirana aktivnost munja za svakog člana ansambla (boje u legendi).

Nadalje, opažena aktivnost munja 25. lipnja 2017. podcijenjena je u svim članovima ansambla osim u kombinaciji WSM6-BouLac. Dana 24. srpnja 2017. opaženi broj udara munja je precijenjen u članovima s WSM6, kao i MORR MP shema. Zanimljivo je da postoji vremenski pomak do 6 sati, ovisno o promatranoj parametrizaciji, između početka maksimalne opažene i simulirane aktivnosti munja u simulacijama za 25. lipnja 2017. i 24. srpnja 2017. Do preranog simuliranja konvekcije može doći zbog raznih razloga uključujući nedostatak asimilacije podataka, ali i prejake veze s dnevnim ciklusom konvekcije i povezanim prizemnim tokovima. Iako je ovo pitanje uobičajeno svojstvo modela s parametriziranom konvekcijom (npr. Ban i sur., 2015.; Manzato i sur., 2018.), značajna nesigurnost reprezentacije vremenskih obilježja konvekcije postoji i u simulacijama modela koji dopuštaju konvekciju (npr. Bechtold i sur., 2014.; Clark i sur., 2016.).

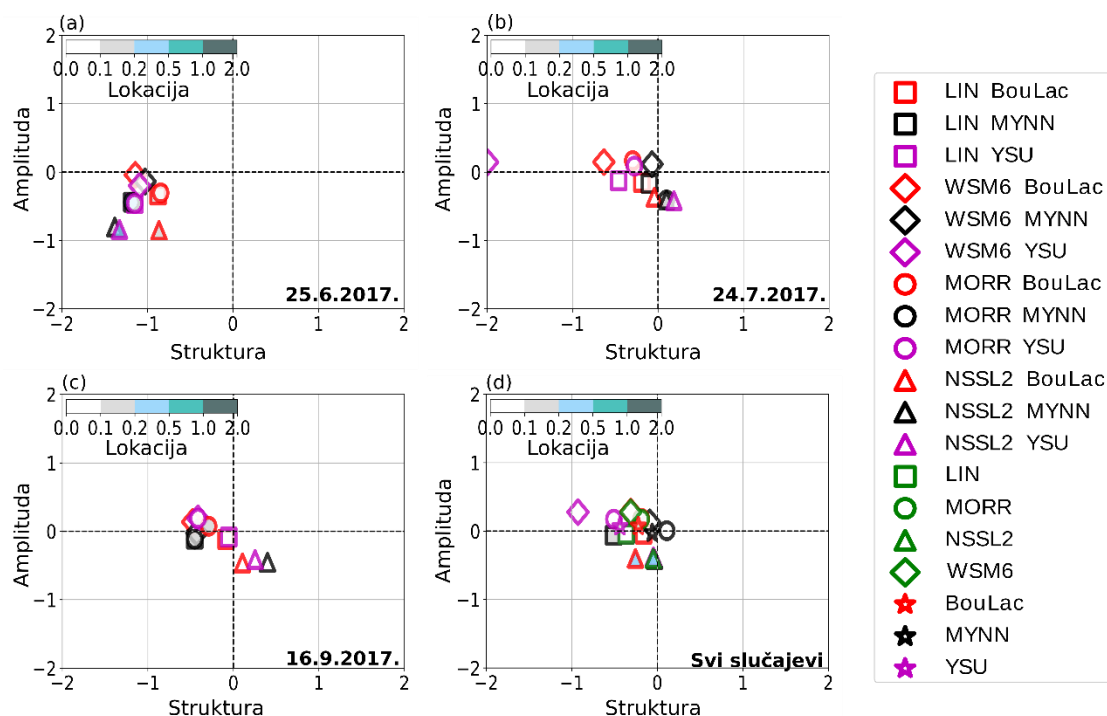
Najbolje podudaranje između simuliranog i promatranog početka aktivnosti munja i broja udara munja dobiven je za noćnu konvekciju, odnosno oluju s tučom 16.

rujna 2017. Ipak, i u ovom slučaju prisutna je razlika između broja munja simuliranih mikrofizičkim shemama WSM6 i NSSL2.

Nadalje, kako bi se dobio detaljniji i kvantitativni opis uspješnosti članova ansambla, provodi se SAL metoda evaluacije. SAL analiza provodi se na dnevnim akumuliranim poljima opažene i simulirane aktivnosti munja kako bi se ublažili učinci vremenskih pomaka između početka opažene i simulirane konvekcije (Slika 3.5). SAL dijagrami pokazuju negativne vrijednosti S komponente svih članova ansambla za slučaj 25. lipnja 2017. što ukazuje na to da su simulirani objekti premali ili preintenzivni (engl. *overly peaked*). Neki od članova blago precjenjuju, a drugi podcjenjuju izmjerene amplitude. Lokacije objekata relativno su dobro reproducirane u većini članova osim onih s mikrofizičkom shemom NSSL2. Za slučaj od 24. srpnja 2017. i strukturu, S, i amplitudu, A, dobro reproduciraju svi članovi ansambla, osim člana WSM6-YSU. Navedena kombinacija reproducira objekte s preintenzivnom aktivnošću munja, kao što pokazuje komponenta S čija je vrijednost blizu  $-2$ . Članovi s NSSL2 mikrofizičkom shemom pokazuju najmanji A, što ukazuje na podcjenjivanje aktivnosti munja. Važno je primijetiti da članovi sa shemom WSM6 pokazuju velike razlike u uspješnosti za različite sheme PBL-a, pri čemu se najbolja uspješnost u smislu komponente S postiže za shemu MYNN, a najslabija za shemu YSU. Vrijednosti svih komponenti za slučaj 16. rujna 2017. blizu su 0, što ukazuje na dobru uspješnost svih članova ansambla. Nadalje, odstupanja između aktivnosti munja simuliranih s članovima WSM6 i NSSL2 istaknuta su uglavnom u komponentama A i S.

Sve u svemu, analizirajući uspješnost u svim slučajevima zajedno, možemo vidjeti da većina članova ansambla pokazuje sličnu uspješnost, osim onih s mikrofizičkom shemom NSSL2 i kombinacijom WSM6-YSU. Članovi s mikrofizičkom shemom NSSL2 pokazuju najmanje amplitude u SAL dijagramima, što ukazuje da ti članovi nisu reproducirali intenzitet promatrane aktivnosti munja. Posljedično, za analizu odabranih slučaja ova MP shema čini se najmanje prikladnim izborom od svih razmatranih shema. S druge strane, gledajući uspješnost svih slučajeva zajedno, WSM6-YSU član proizvodi komponentu S blizu  $-1$  što ukazuje da ova kombinacija proizvodi preintenzivnu aktivnost munja. Sve ostale razmatrane konfiguracije, osim onih sa shemom NSSL2, pokazuju sličnu uspješnost u odgovarajućim srednjim vrijednostima i sve bi mogle biti prikladni izbori za buduće simulacije aktivnosti munja. Međutim, treba napomenuti da shema WSM6 malo precjenjuje opažene amplitude i proizvodi najintenzivniju aktivnost munje od svih analiziranih mikrofizičkih shema. Što se tiče shema PBL-a, MYNN predstavlja najbolji, a

YSU najlošiji izbor, iako, bitno je napomenuti, da su razlike u izvedbi ovih shema PBL-a male.



**Slika 3.5.** Dijagrami metode SAL za dnevni akumulirani broj udara munja za sve članove ansambla (označene različitim simbolima) dobiven za: (a) 25. lipnja 2017., (b) 24. srpnja 2017., (c) 16. rujna 2017. i (d) sve slučajeve zajedno. Svaki simbol prikazuje vrijednosti sve tri komponente metode SAL; amplituda (A) i struktura (S) su naznačene na  $y$ -osi odnosno  $x$ -osi, dok je vrijednost komponente lokacije (L) označena bojom ispunje simbola. Optimalne vrijednosti (sve tri komponente jednake 0) označene su vodoravnim i okomitim crtama. Osim toga, zeleni markeri i zvjezdice pokazuju medijane A, S i L u svim analiziranim slučajevima zajedno za svaku odabranu shemu parametrizacije MP i PBL-a.

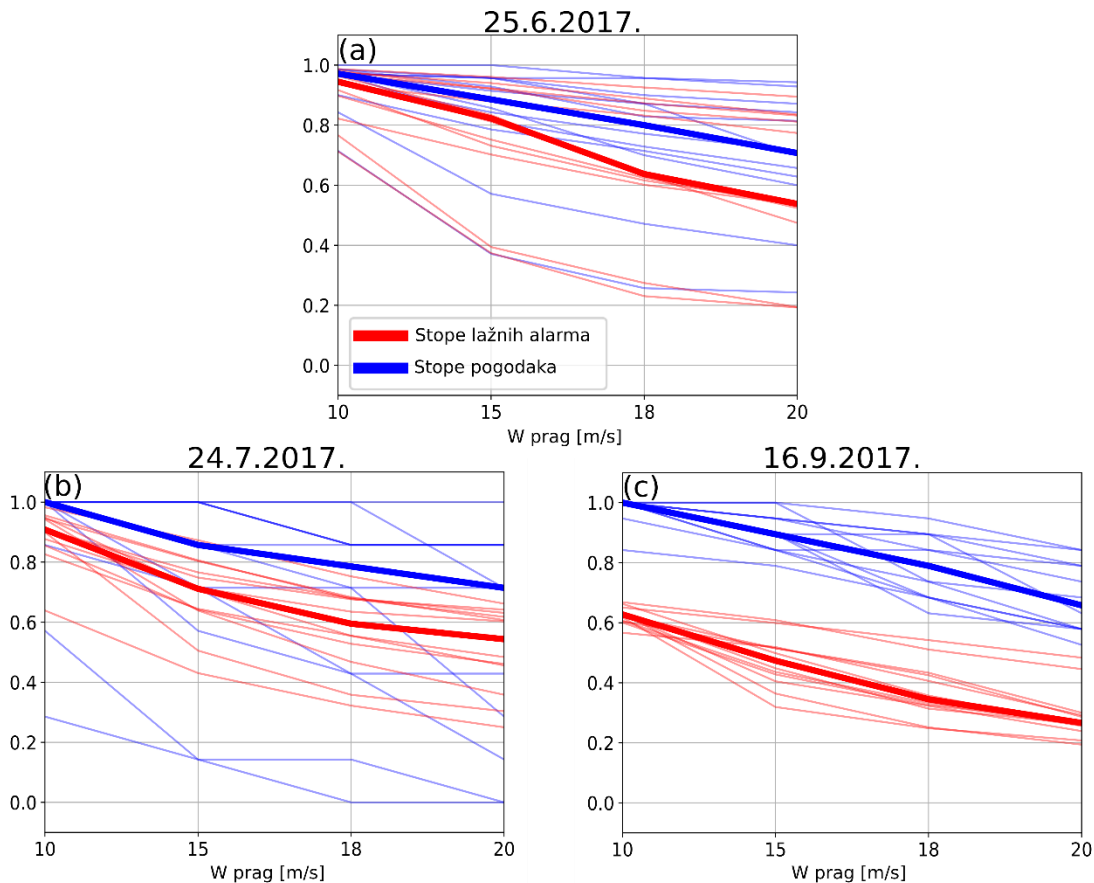
Mikrofizičke sheme jednog i dva momenta daju sličnu uspješnost i nije očita prevalencija niti jednog od ova dva pristupa. Ovi rezultati su u skladu s analizom koju su proveli Lagasio i sur. (2017.), koji su analizirali uspješnost LPI-ja u simulaciji multi-mikrofizičkog ansambla mezoskalnog konvektivnog sustava u Genovskom zaljevu u Italiji. Nisu pronašli nikakvu razliku u uspješnosti između mikrofizičkih shema s jednim i dvostrukim momentom. Štoviše, najveće LPI vrijednosti i posljedično najintenzivniju aktivnost munja proizvela je shema WSM6, dok je shema NSSL2 s prognoziranom koncentracijom jezgara kondenzacije oblaka (engl. *could condensation nuclei*, CCN) proizvela niže LPI vrijednosti (ovdje koristimo shemu NSSL2 sa stabilnom pozadinskom CCN koncentracijom). S druge strane, Sokol i Minářova (2020.) uspoređivali su utjecaj

mikrofizičkih shema s jednim i dva momenta na rezultate LPI unutar prognostičkog modela COSMO tijekom 10 grmljavinskih dana u središnjoj Europi i zaključili da je LPI pokazao bolju uspješnost koristeći shemu mikrofizike s dva momenta. Međutim, treba spomenuti da je mikrofizika oblaka korištena u Sokol i Minářová (2020.) drugačije opisana u modelu COSMO nego u modelu WRF. Pa ipak, slično prethodnim studijama (Yair i sur., 2010.; Lagasio i sur., 2017.; Sokol i Minářová, 2020.), i ova analiza pokazuje da je LPI koristan alat za simulaciju promatrane aktivnosti munja tijekom odabranih slučajeva tuče.

### 3.1.5. Podešavanje HAILCAST-a

U prvotnoj formulaciji HAILCAST se aktivira u točkama mreže u kojima postoji vertikalna brzina veća ili jednaka  $10 \text{ m s}^{-1}$ . Kako bi se izbjegao znatan broj lažnih alarma dobivenih aktivacijom HAILCAST-a u svakoj točki mreže gdje vertikalna brzina prelazi  $10 \text{ m s}^{-1}$ , ispituju se četiri različita praga za aktivaciju HAILCAST-a: 10, 15, 18 i  $20 \text{ m s}^{-1}$ . Za odabrane pragove provodi se usporedba točka na točku između simulirane i opažene tuče, a vrijednosti stope pogodaka ( $a/(a + c)$ ) i stope lažnih alarma ( $b/(b + d)$ ) određuju se za sve slučajeve i sve članove ansambla (Slika 3.6). Detaljniji opis ovih metrika dan je u Poglavlju 2.3. Uzimajući u obzir rezultate na Slici 3.6, jasno je da ako je prag za aktivaciju HAILCAST-a  $10 \text{ m s}^{-1}$ , HAILCAST bi se aktivirao u previše točaka mreže, stvarajući prognozu s mnogo lažnih alarma. Odabirom većeg praga aktivacije smanjuju se stope lažnih alarma, ali i stope pogodaka. Ovdje je odabran prag od  $18 \text{ m s}^{-1}$ , budući da su srednje stope pogodaka koje odgovaraju ovoj vrijednosti još uvijek veće ili jednake 0.8 sa smanjenom stopom lažnih alarma u usporedbi s onom koja odgovara pragu od  $10 \text{ m s}^{-1}$ . Čineći to, maksimiziramo razliku između stope pogodaka i stope lažnih alarma, što zapravo odgovara maksimiziranju Peirceove metrike uspješnosti (engl. *Pierce skill score*, PSS)  $((ad-bc)/((a + c)(b + d))) = \text{POD} - \text{FAR}$  (Peirce, 1884.). Gledajući Sliku 3.6, postoji bolja uspješnost u smislu PSS-a za slučaj 16. rujna 2017., ali je relativna promjena PSS-a između pragova od  $10 \text{ m s}^{-1}$  i  $18 \text{ m s}^{-1}$  veća za slučajeve 25. lipnja 2017. i 24. srpnja 2017. To ukazuje da postoji veća korist od uvođenja praga od  $18 \text{ m s}^{-1}$  za slučajeve od 25. lipnja 2017. i 24. srpnja 2017. u smislu relativne promjene PSS-a između pragova od  $10 \text{ m s}^{-1}$  i  $18 \text{ m s}^{-1}$ . Međutim, treba uzeti u obzir da je ovaj prag dobiven na temelju tri slučaja tuče i četiri granične vrijednosti i potrebno ga je dalje testirati.

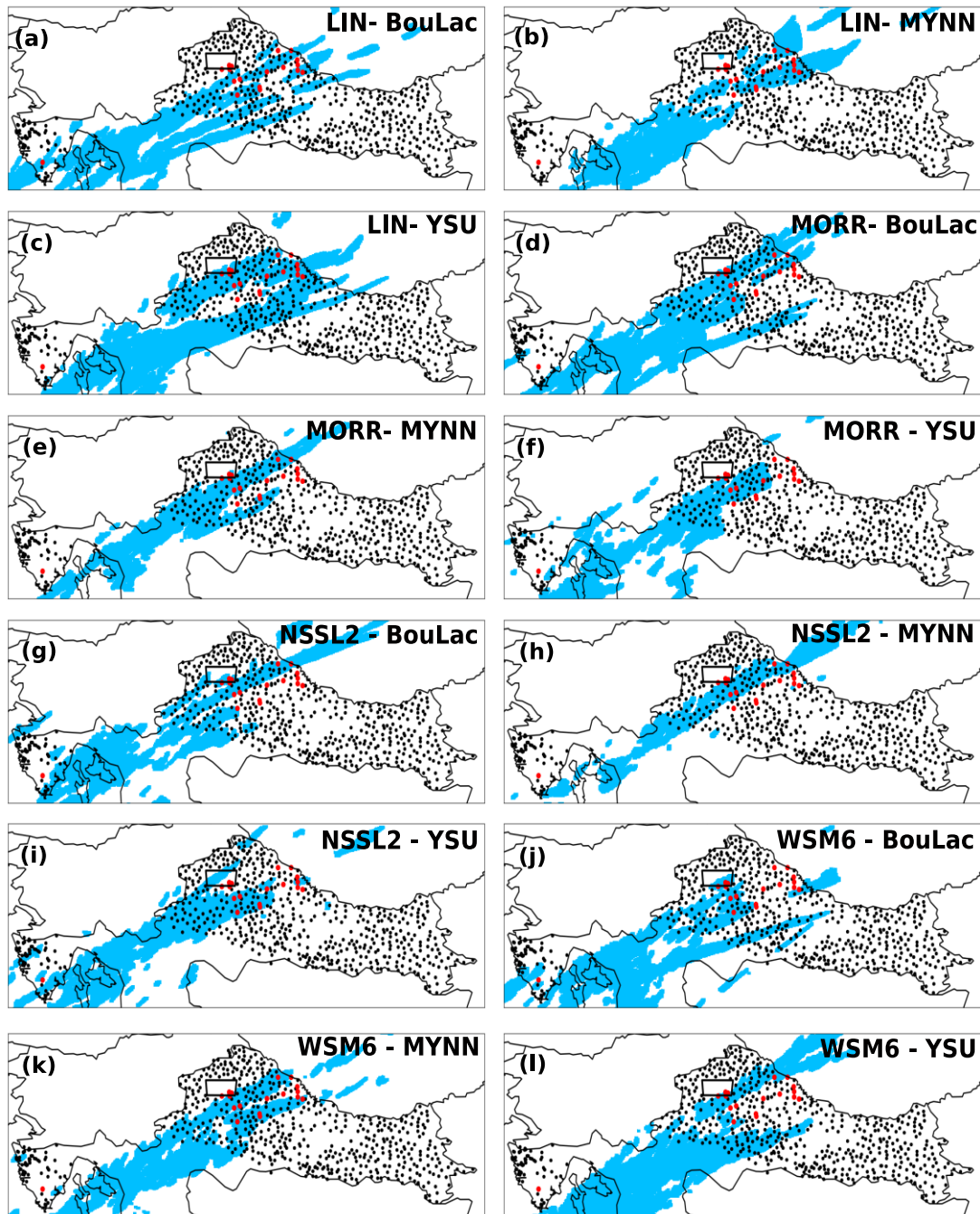




**Slika 3.6.** Dijagrami uspješnosti koji prikazuju stopu pogodaka i stopu lažnih alarma za različite vrijednosti pragova aktivacije HAILCAST-a za sve članove ansambla i sve slučajeve: (a) 25. lipnja 2017., (b) 24. srpnja 2017. i (c) 16. rujna 2017. Ispituju se pragovi od 10, 15, 18 i 20  $\text{m s}^{-1}$ . Stope pogodaka za sve članove ansambla prikazane su plavim linijama, dok debela plava linija predstavlja medijane ansambla. Stope lažnih alarma za sve članove ansambla prikazane su crvenim linijama, dok debela crvena linija predstavlja medijane ansambla.

### 3.1.6. Rezultati primjene HAILCAST-a

Analiza rezultata HAILCAST-a temelji se na usporedbi između simulirane tuče i opažene tuče na tlu za razdoblje od 00 UTC do 24 UTC na dan kada je tuča opažena. Kako bismo uklonili dio nesigurnosti zbog vremenske varijabilnosti između opažene i simulirane konvekcije, simulirani skup podataka sažet je za razdoblje od 24 h. Prvo izvodimo kvalitativnu usporedbu između simulirane i izmjerene tuče. Iz tog razloga, Slika 3.7 prikazuje područja na kojima je tuča simulirana unutar razdoblja od 24 sata zajedno s označenim tučomjerima koji su zabilježili tuču za slučaj 16. rujna 2017. Slika 3.7 sugerira općenito dobar prostorni odnos između simulirane i opažene tuče za sve članove ansambla. Unatoč tome, svi članovi ansambla pokazuju određeni broj lažnih alarma, odnosno tuča je simulirana, ali nije opažena. Nadalje, od svih kombinacija, član NSSL2-MYNN pokazuje najmanju površinu pokrivenu tučom.



**Slika 3.7.** Prognoza tuče za 16. rujna 2017. Područje na kojem je tuča bila prognozirana od 00 do 24 UTC 16. rujna 2017. osjenčano je plavom bojom. Položaj tučomjera označen je crnim točkama. Crvenim kružićima označeni su tučomjeri koji su registrirali tuču. Položaj posebno dizajniranog poligona tučomjera označen je crnim pravokutnikom. Prikazane su prognoze za sve članove ansambla: (a) LIN-BouLac, (b) LIN-MYNN, (c) LIN-YSU, (d) MORR-BouLac, (e) MORR-MYNN, (f) MORR-YSU, (g) NSSL2-BouLac, (h) NSSL2-MYNN, (i) NSSL2-YSU, (j) WSM6-BouLac, (k) WSM6-MYNN, i (l) WSM6-YSU. Član s najboljom uspješnošću je (k) WSM6-MYNN, a član s najslabijom uspješnošću je (l) WSM6-YSU.

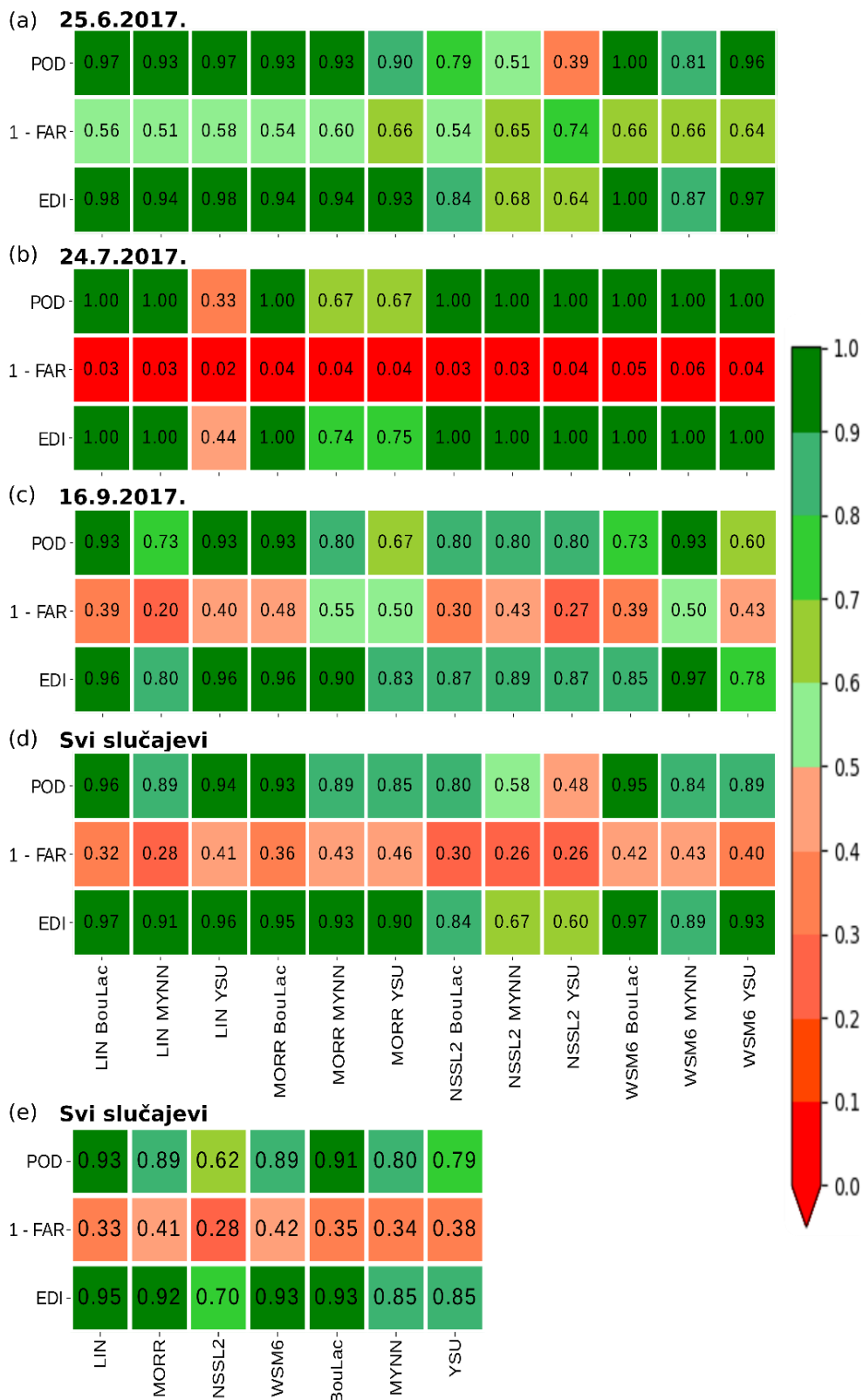
Kako bi se dobio kvantitativni opis ove evaluacije, provodi se skalirana metoda susjedstva (kao što je opisano u poglavlju 2.3.4.) za sve članove ansambla i sve analizirane



slučajeve. Ispitana je osjetljivost rezultata na izbor dopuštenog radijusa pomaka. Budući da je prosječna udaljenost između većine tučomjera 5.5 km, testirana su tri različita radijusa – 6, 11 i 22 km. Za svaki od radijusa izračunavaju se POD, FAR i EDI (Slika 3.8 i Dodatak C, Slika C1, C2). Slika 3.8 prikazuje rezultate za dopušteni radijus pomaka od 11 km budući da je utvrđeno da prognoza ima dovoljnu uspješnost za taj radijus pomaka (većina EDI vrijednosti uspješnosti svih slučajeva veća je od 85%), a razlike između članova bolje su istaknute u usporedbi s rezultatima za radijus 22 km. Na slici 3.8 prikazane su 1-FAR vrijednosti, stoga je savršena prognoza povezana sa svim razmatranim metrikama uspješnosti jednakim 100 %.

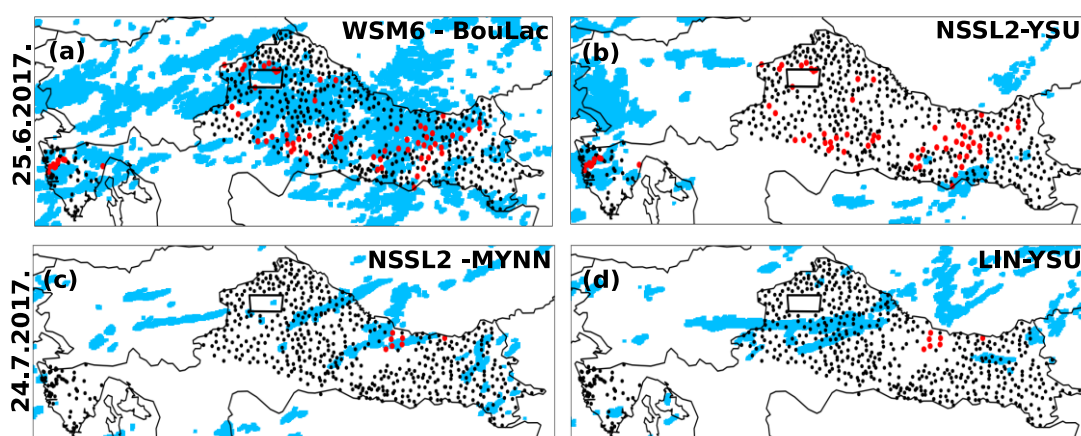
Za slučaj 16. rujna 2017., POD vrijednosti veće ili jednake 80% za većinu članova ansambla potvrđuje da je model uspješno reproducirao tuču tamo gdje je opažena. U isto vrijeme, svi članovi ansambla proizveli su znatan broj lažnih alarma, što pokazuju FAR vrijednosti veće od 45% ili 1-FAR vrijednosti niže od 55%. Uz potencijalnu tendenciju modela da precjenjuje tuču, određeni broj lažnih alarma može se pripisati ograničenim prostornim informacijama o pojavi tuče koje pruža mreža tučomjera; dostupne su samo informacije o pojavi tuče na točnom mjestu gdje je tučomjer postavljen. Tuča je mogla pasti u blizini tučomjera i ostati nezabilježena. Sumirajući uspješnosti svih članova ansambla, najbolja uspješnost se postiže s članom WSM6-MYNN s najvišim vrijednostima POD i EDI i relativno malim vrijednostima FAR-a. Što se tiče FAR-a, najbolju uspješnost pokazuje član MORR-MYNN, ali s nižim POD-om i EDI-jem. Nasuprot tome, član s najlošijom uspješnosti je WSM6-YSU prema POD i EDI vrijednostima, dok član LIN-MYNN proizvodi najviše lažnih alarma.

Nadalje, većina POD vrijednosti povezana sa slučajem 25. lipnja 2017. veća je od 90 % (Sl. 3.8a), sugerirajući da je opažena tuča uspješno reproducirana u modelu. U ovom slučaju ima manje lažnih alarma u usporedbi s prethodnim slučajem; FAR vrijednosti za sve članove niže su od 49 % (ili 1-FAR vrijednosti veće ili jednake 51 %). Sve u svemu, član WSM6-BouLac pokazuje najbolju uspješnost u pogledu POD i EDI s relativno niskim FAR-om, dok član NSSL2-YSU pokazuje najlošiju uspješnost s najnižim vrijednostima POD i EDI. Područje pogođeno tučom za najbolje i najlošije članove osjenčano je plavom bojom na Slici 3.9a-b.



**Slika 3.8.** Dijagrami uspješnosti za simulaciju tuče za sve članove ansambla za (a) 25. lipnja 2017., (b) 24. srpnja 2017. i (c) 16. rujna 2017., (d) sve analizirane slučajeve i (e) svaku shemu parametrizacije u svim razmatranim slučajevima. Dane su vrijednosti kategoričkih metrika uspješnosti vjerojatnosti otkrivanja (POD), 1 - omjer lažnih alarma (1-FAR) i indeksa ekstremne ovisnosti (EDI). Ljestvica boja označava najbolju (zelena) i najlošiju (crvena) uspješnost.

Slični rezultati dobiveni su za 24. srpnja 2017. (Slika 3.8b); većina POD vrijednosti jednake su 100 %, što sugerira da model uspješno reproducira opaženu tuču. Međutim, FAR vrijednosti iznad 94 % pokazuju da svi članovi ansambla značajno precjenjuju područje zahvaćeno tučom. Nadalje, POD vrijednosti od 33 % i 67 % za članove LIN-YSU, MORR-MYNN i MORR-YSU pokazuju da opažena tuča nije reproducirana u ovim konfiguracijama. U ovom konkretnom slučaju, član s najlošijom uspješnosti je LIN-YSU budući da ovaj član nije simulirao uočenu tuču i istovremeno je proizveo znatan broj lažnih alarma. Ostali članovi pokazuju sličnu uspješnost, a čini se da nema niti jednog člana s najboljom uspješnosti. Područje pogođeno tučom za jednog od članova s najboljim i najslabijim rezultatima osjenčano je plavom bojom na Slici 3.9c-d.



**Slika 3.9.** Prognoza tuče za 25. lipnja 2017. za najbolje (a) MORR-YSU i najlošije (b) članove NSSL2-YSU ansambla i 24. srpnja 2017. za jedne od najboljih (c) NSSL2- MYNN i najlošiji (d) LIN-YSU članove ansambla. Područje na kojem je tuča bila prognozirana od 00 do 24 UTC na dan opažanja tuče je osjenčano plavom bojom. Položaj tučomjera označen je crnim točkama. Crvenim kružićima označeni su tučomjeri koje su registrirali tuču. Položaj posebno dizajniranog poligona tučomjera označen je crnim pravokutnikom.

Dodatno, ispitana je uspješnost ansambla u svim slučajevima zajedno (Slika 3.8d) kako bi se agregirali rezultati i pružila robusnija procjena uspješnosti svakog člana tijekom svih analiziranih slučajeva. Zajednička analiza pokazuje da bi WSM6-BouLac i LIN-YSU mogle biti kombinacije MP-PBL koje daju najbolje rezultate u pogledu EDI-ja i razlike između POD i FAR, dok bi NSSL2-MYNN i NSSL2-YSU mogli biti najlošiji MP- PBL izbori. Iako, treba napomenuti da su razlike između članova ansambla relativno male (ako izuzmemo članove s shemom mikrofizike NSSL2). Nadalje, vrijednosti EDI-ja u zajedničkoj evaluaciji za većinu slučajeva veće su od 0.9 i dobro se podudaraju s trendovima uočenim u POD vrijednostima u zajedničkoj i zasebnoj evaluaciji. Treba uzeti u obzir da u

zasebnoj evaluaciji, vrijednosti EDI dobivaju savršenu vrijednost ( $EDI = 1$ ) jer POD također dobiva savršenu vrijednost ( $POD = 1$ ) bez obzira na relativno veliki FAR, što se izbjegava kod evaluacije združenih rezultata. Ovo ponašanje proizlazi iz formulacije EDI-ja (Ferro i Stephenson, 2011.) koja pati od malog broja podataka koji se koriste u evaluaciji. Konačno, te primjedbe naglašavaju potrebu evaluacije većeg broja događaja kako bi se postigli robusniji rezultati, posebno za metrike povezane s rijetkim događajima, kao i potrebu za analizom više različitih metrika uspješnosti pri evaluaciji ovakvih ekstremnih i rijetkih događaja.

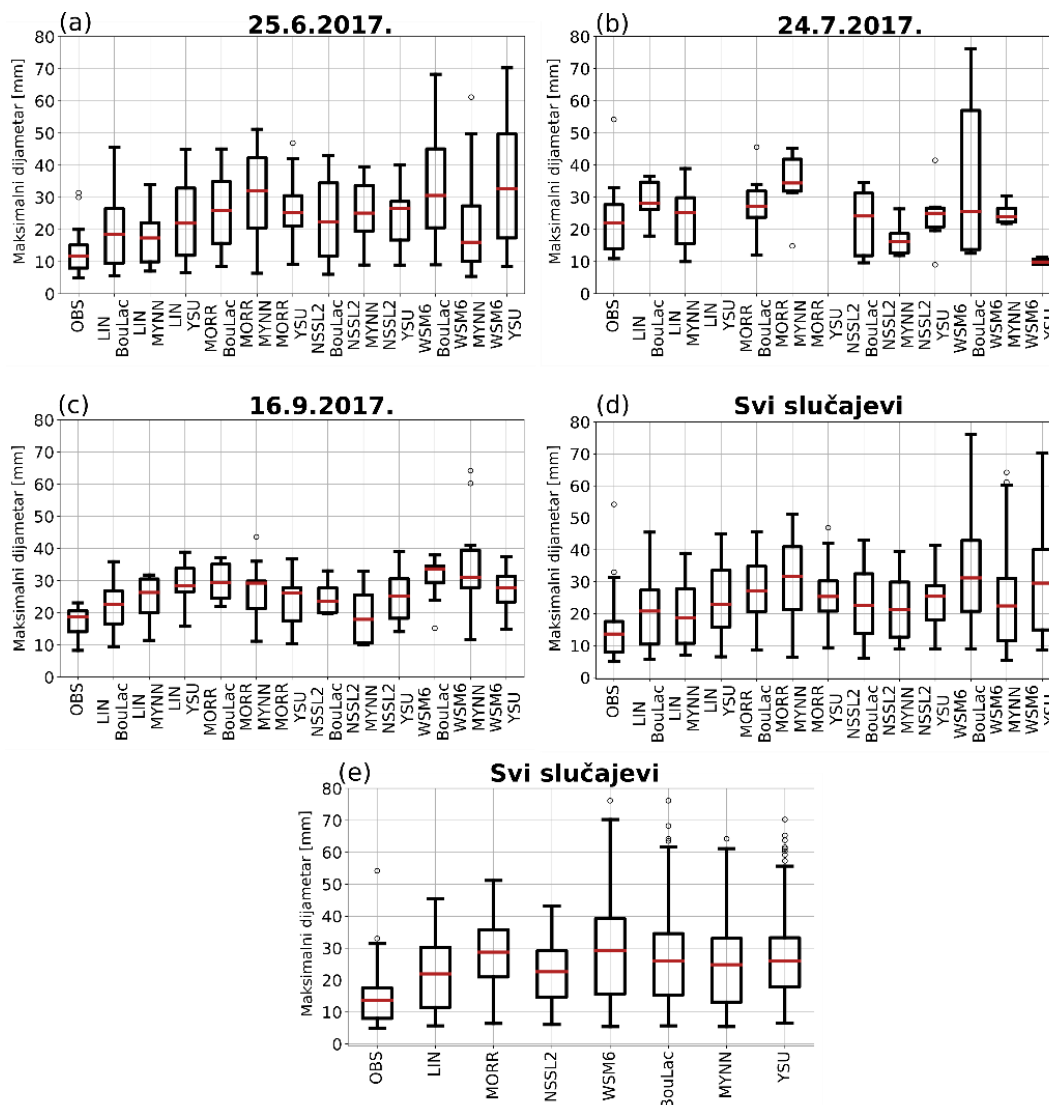
Nadalje, provodi se zajednička evaluacija svake opcije parametrizacije u svim slučajevima (Slika 3.8e). Zajednička evaluacija otkriva da od svih razmatranih opcija mikrofizike, LIN pokazuje najbolje rezultate, u smislu vrijednosti parametara POD i EDI s relativno niskim vrijednostima FAR-a. Nije iznenađujuće da je NSSL2 najlošija mikrofizička opcija od svih razmatranih u smislu vrijednosti parametara POD i EDI. Gledajući obilježja shema PBL, BouLac se čini najboljom opcijom, dok se YSU čini najslabijom opcijom prema vrijednostima parametara POD i EDI, iako je razlika u rezultatima evaluacije između YSU i MYNN mala. Zanimljivo je da čak i shema NSSL2 ima bolju uspješnost kada je uparena sa shemom BouLac umjesto sa shemama MYNN i YSU (Slika 3.8d). Ovdje treba uzeti u obzir da je YSU shema također bila najlošija u LPI evaluaciji (Slika 3.5d). Moguće je da sam koncept nelokalne sheme YSU razlog ovakvih značajki (u usporedbi s BouLac i MYNN koji su lokalne sheme) jer je do sada uočeno da shema YSU previše produbljuje PBL u proljetnim dubokim konvektivnim okruženjima (Coniglio, 2012.). To zatim rezultira previše suhim zrakom u blizini tla što dovodi do podcjenjivanja MLCAPE (npr. Cohen i sur., 2015.; Milovac i sur., 2016.). S druge strane, BouLac je lokalna shema i osmišljena je za bolji prikaz turbulencije nad kompleksnim terenom (Cohen i sur., 2015.), a s obzirom na kompleksnost terena u Hrvatskoj, bolji prikaz turbulencije nad kompleksnim terenom mogao bi dovesti do boljih rezultata.

Nije iznenađujuće da analizirane metrike uspješnosti postižu veće vrijednosti za veće radijuse verifikacije i manje vrijednosti za manje radijuse verifikacije (Slika 3.8 i Dodatak C, Slika C1, C2). Kada se uspoređuje zajednička evaluacija za sve analizirane slučajeve za radijus verifikacije od 6 km, član WSM6-BouLac ističe se kao najbolji u pogledu vrijednosti parametara EDI i POD s relativno malim FAR-om u usporedbi s ostalim članovima. Zanimljivo je da čak i na 6 km, članovi s NSSL2 shemom pokazuju lošije rezultate od ostalih članova, gledajući sve slučajeve zajedno. S druge strane, gledajući uspješnost na 22 km svih slučajeva zajedno, svi članovi postižu svoje najveće vrijednosti parametara EDI, POD i 1-FAR vrijednosti. Kao i prije, članovi sa shemom NSSL2 pokazuju

lošije rezultate u usporedbi s ostalim članovima. Dakle, čini se da bi se WRF-HAILCAST prognoza mogla smatrati pouzdanom na skali od 22 km, iako treba uzeti u obzir da čak i s radijusom verifikacije od 22 km još uvijek postoji znatna količina lažnih alarma u usporedbi s opažanjima iz mreže tučomjera.

Provedena je također i evaluacija točka na točku između promatranih i simuliranih maksimalnih promjera zrna tuče (Slika 3.10). Kutijasti dijagrami (engl. *box-plot*) prikazuju maksimalne simulirane promjere zrna tuče (veće od 5 mm) na točki koja je najbliža tučomjeru koji je registrirao tuču za svaki pojedinačni slučaj, za sve analizirane slučajeve zajedno i za svaku shemu parametrizacije u svim analiziranim slučajevima. Svi članovi ansambla za 25. lipnja 2017. i 16. rujna 2017. pokazuju opće precjenjivanje izmjerenih maksimalnih promjera zrna tuče. S druge strane, samo je član WSM6-BouLac uspio proizvesti promjere zrna tuče od 54.2 mm izmjerene 24. srpnja 2017. Član WSM6-MYNN proizveo je najveće simulirane maksimalne promjere zrna tuče za slučaj 16. rujna 2017. i pokazuje najveći raspon simuliranih veličina zrna tuče. S druge strane, najveća zrna tuče s najvećim rasponom za slučaj 25. lipnja 2017. proizveli su članovi WSM6-YSU i WSM6-BouLac. Nadalje, uzimajući u obzir sve slučajeve zajedno, očito je da su članovi WSM6 proizveli najveća zrna tuče s najvećim rasponom veličina zrna tuče. Štoviše, sheme WSM6 i MORR proizvode veće medijane promjera zrna tuče u usporedbi s mikrofizičkim shemama LIN i NSSL2. Moguće je da WSM6 shema reproducira veličine zrna tuče sličnije izmjerenima za razliku od ostalih analiziranih shema mikrofizike (Manzato i sur., 2020.). Promatrajući sve slučajeve zajedno, razlike između simuliranih veličina zrna tuče među različitim razmatranim shemama PBL su manje očite što ukazuje na manju osjetljivost simulacija tuče na razmatrane PBL nego mikrofizičke sheme. Dodatno, YSU shema proizvodi manji raspon veličina zrna tuče što bi moglo biti povezano s tendencijom nelokalnih shema da proizvedu previše suhog zraka na površini i podcjenjuju MLCAPE. Raspravljajući o ovim rezultatima, treba primijetiti da opisana usporedba ima nekoliko ograničenja: (i) vjerojatnost da tučomjer uhvati najveće zrno tuče je mala s obzirom da tučomjer pokriva samo 0.25 m<sup>2</sup> (Smith i Waldvogel, 1989.), i (ii) analiza od točke do točke ne uzima u obzir moguće prostorne pomake između promatrane i simulirane konvekcije. Ipak, s obzirom na sva ograničenja, dobiveni rezultati u skladu su s onima prikazanim u Adams-Selin i sur. (2019.), koji su izvijestili da HAILCAST ima tendenciju podcjenjivanja veličine zrna tuče u kategoriji 50–74 mm, dok su veličine zrna tuče u kategoriji 19–24 mm uglavnom precijenjene (njihova Slika 4e). Međutim, s obzirom da su zrna tuče u kategoriji 50–74 mm uočena samo u jednom analiziranom slučaju, potrebno je napraviti detaljniju

analizu učinka HAILCAST-a u simulaciji većih veličina zrna tuče (onih u kategoriji 50–74 mm) kako bi se potvrdile uočene tendencije.



**Slika 3.10.** Usporedba između opaženih (OBS) i simuliranih maksimalnih promjera zrna tuče na točki koja je najbliža tučomjeru s evidentiranom tučom za (a) 25. lipnja 2017., (b) 24. srpnja 2017., (c) 16. rujna 2017., (d) sve analizirane slučajeve i za sve članove ansambla, i (d) svaku shemu parametrizacije u svim analiziranim slučajevima. Pravokutnici označavaju medijane te donje i gornje kvartile, dok su donje i gornje horizontalne linije unutar 1,5 interkvartilnog raspona od donjeg i gornjeg kvartila. *Outlieri* su označeni crnim točkama.

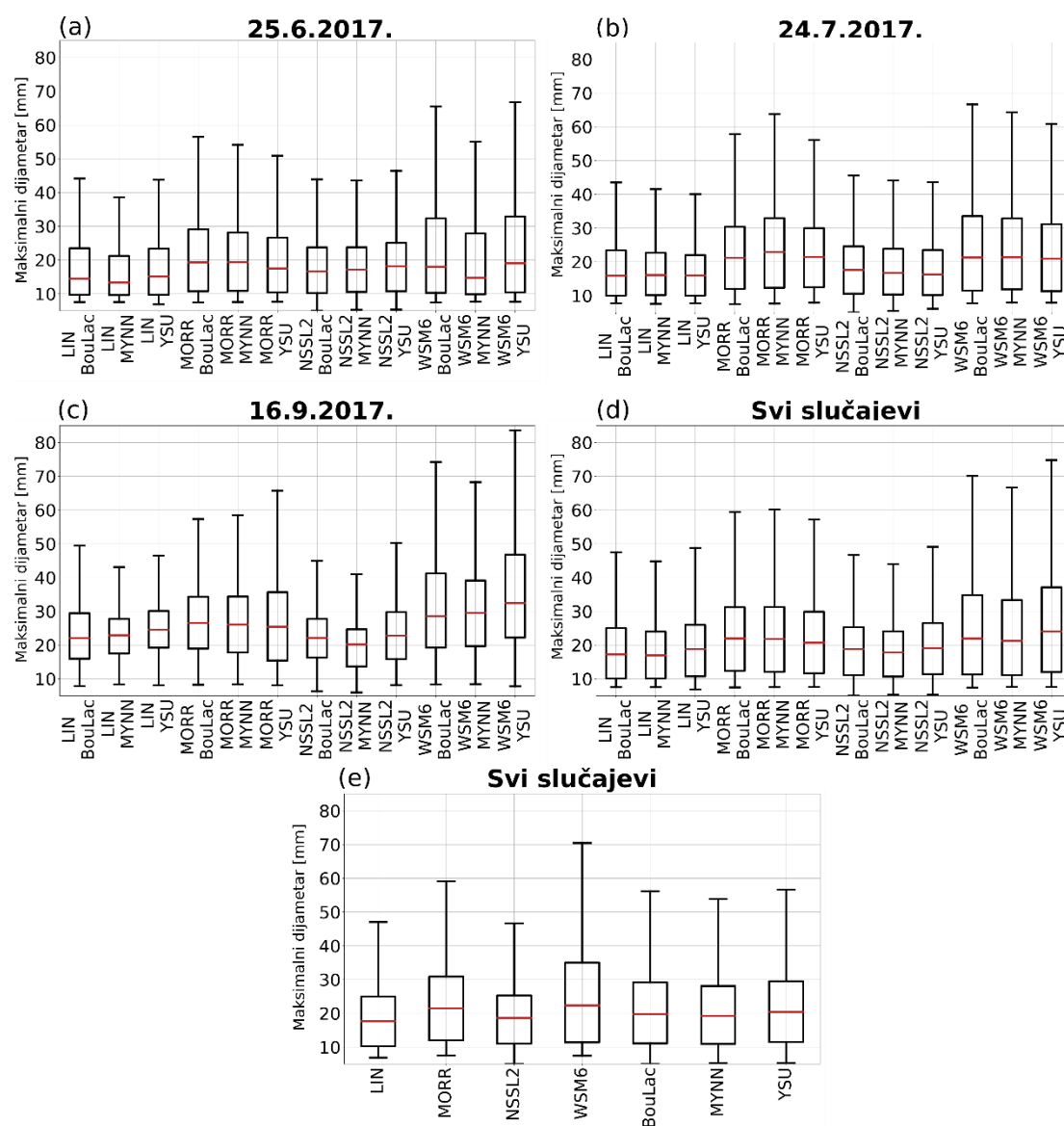
### 3.1.7. Razlike između članova ansambla

Simulirani maksimalni promjeri zrna tuče na području cijele domene uspoređeni su između članova ansambla (Slika 3.11). Jasno je da medijani promjera zrna tuče variraju unutar raspona od 15 mm kroz cijeli ansambl. Međutim, neke tendencije mogu se ekstrapolirati – maksimalne promjere zrna tuče simuliraju članovi s mikrofizičkom shemom WSM6 u svim analiziranim slučajevima. S druge strane, minimalne promjere zrna tuče simuliraju članovi s mikrofizičkom shemom NSSL2. Štoviše, uočena je tendencija članova WSM6 i MORR da simuliraju veća zrna tuče s većim interkvartilnim rasponom u usporedbi s članovima NSSL2 i LIN.

Važno je naglasiti da su i LPI i HAILCAST izrazito osjetljivi na jačinu uzlaznog strujanja i omjere miješanja hidrometeora unutar grmljavinske oluje. Slika 3.12 pokazuje usporedive jačine uzlaznog strujanja kroz sve članove ansambla. Postoji tendencija da članovi NSSL2 proizvode slabije uzlazne struje u usporedbi s drugim kombinacijama shema. Osim toga, također postoji indikacija da članovi WSM6 proizvode malo jače uzlazne struje; međutim, ta razlika između članova nije toliko izražena kao što je slučaj kada se uspoređuju promjeri zrna tuče. Unatoč tome, na Slici 3.13 prikazana je jasna razlika u simuliranim omjerima miješanja solike između članova ansambla. Članovi NSSL2 proizvode najmanje omjere miješanja solike, vjerojatno zbog slabijeg uzlaznog strujanja. Što su uzlazna strujanja intenzivnija, to je veća visina na kojoj se čestice mogu transportirati. Posljedično je veći broj čestica leda i solike koje bi se mogle sudarati jedna s drugom u prisutnosti prehladne tekuće vode što u konačnici rezultira razdvajanjem naboja i rastom zrna tuče. Ovo bi moglo objasniti zašto članovi NSSL2 proizvode manje intenzivne munje i tuču. Članovi s mikrofizičkom shemom LIN pokazuju najveće medijane omjera miješanja solike. Ipak oni daju veći raspon u usporedbi s članovima WSM6 i MORR te većim vertikalnim brzinama u usporedbi s članovima MORR-a, ali u isto vrijeme teže stvaraju manja zrna tuče. Nadalje, razlike između uspješnosti različitih shema PBL-a nisu tako izražene što ukazuje da su simulirane veličine zrna tuče, uzlazne struje i omjeri miješanja zrna osjetljiviji na izbor MP od PBL sheme.

Ovi se rezultati mogu povezati s onima koje su objavili Lagasio i sur. (2017.), koji su analizirali uspješnost LPI-ja u simulaciji multi-mikrofizičkog ansambla mezoskalnog konvektivnog sustava u Genovskom zaljevu u Italiji. Otkrili su da je NSSL2 shema s prognoziranom koncentracijom kondenzacijskih jezgri oblaka (engl. *cloud condensation nuclei*, CCN) (ovdje je korištena shema NSSL2 sa stabilnom pozadinskom CCN koncentracijom) proizvela slabije polje vertikalne brzine i niže omjere miješanja solike u

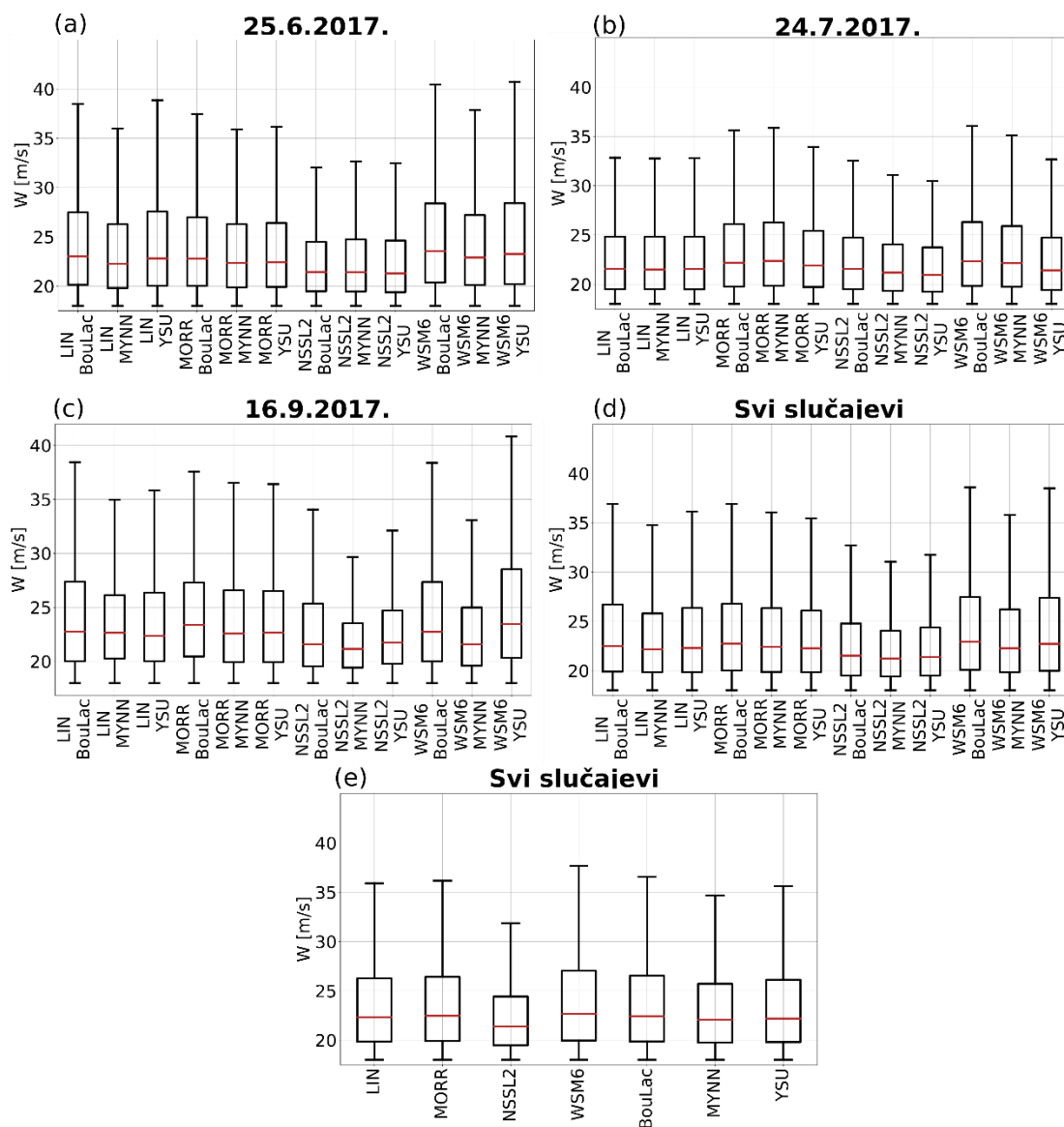
odnosu na shemu WSM6. To je dovelo do manje izraženog LPI-ja i manje intenzivne aktivnosti munja dobivene shemom NSSL2 s predviđenim CCN-om u usporedbi s onima dobivenim shemom WSM6. Štoviše, najjače uzlazne struje i najveće omjere miješanja solike u kombinaciji s najvišim LPI i najintenzivnijom aktivnošću munja proizveo je član s mikrofizičkom shemom WSM6.



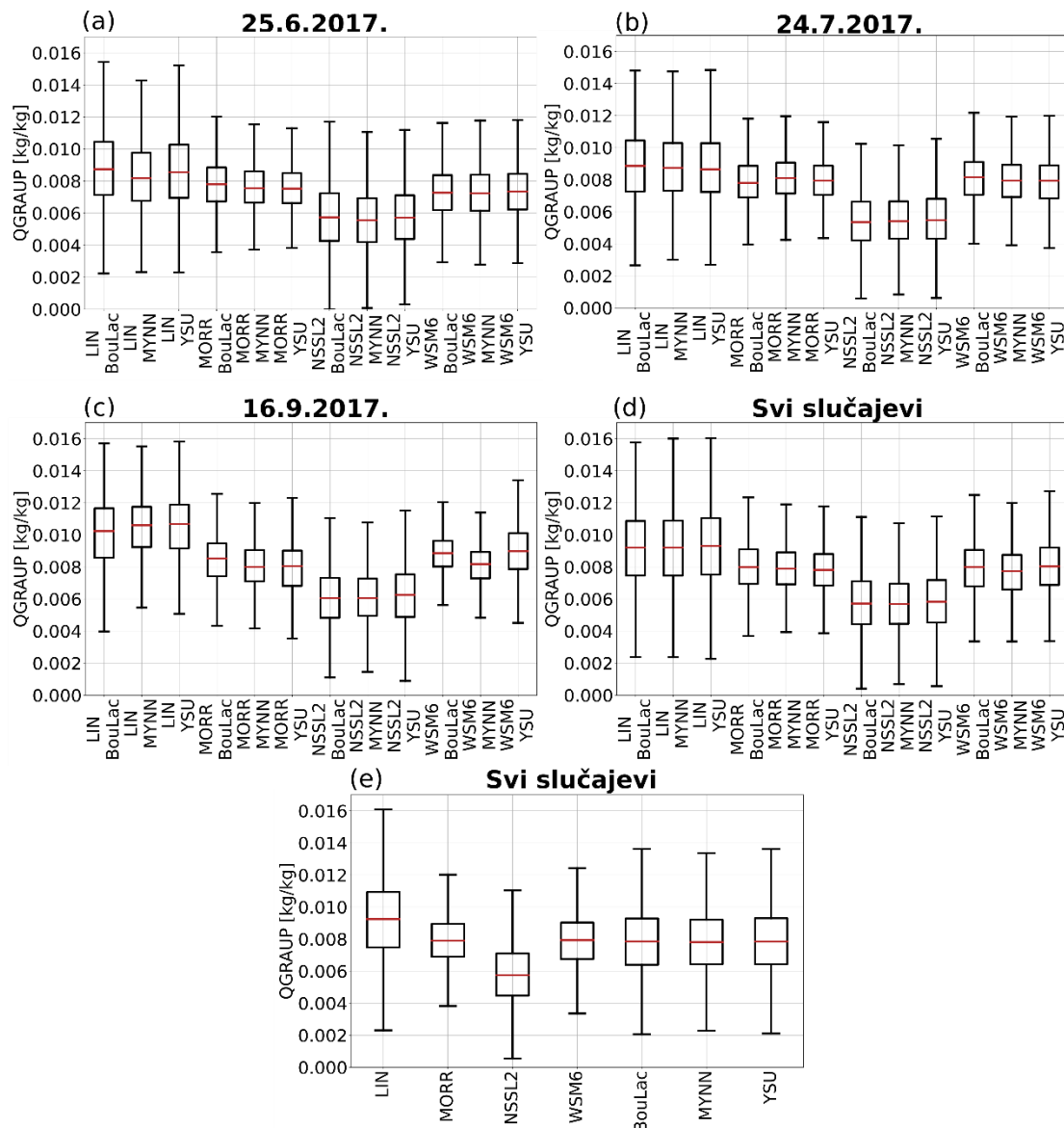
**Slika 3.11.** Kutijasti dijagrami maksimalnih promjera tuče za točke u kojima je simulirana tuča kroz cijelu domenu i za sve članove ansambla za (a) 25. lipnja 2017., (b) 24. srpnja 2017., (c) 16. rujna 2017., (d) sve analizirane slučajeve, i (e) svaku parametrizacijsku shemu u svim analiziranim slučajevima. Pravokutnici označavaju medijane te donje i gornje kvartile, dok su horizontalne linije unutar 1.5 interkvartilnog raspona od donjeg i gornjeg kvartila.



Prikazani rezultati pokazali su da je simulirano područje zahvaćeno tučom osjetljivo i na izbor shema mikrofizike i graničnog sloja. Naime, mikrofizička shema NSSL2 proizvodi manje površine zahvaćene tučom, što rezultira manjim vrijednostima



**Slika 3.12.** Kutijasti dijagrami maksimalnih vertikalnih brzina za točke u kojima je simulirana tuča kroz cijelu domenu i za sve članove ansambla za (a) 25. lipnja 2017., (b) 24. srpnja 2017., (c) 16. rujna 2017., (d) sve analizirane slučajeve te (d) svaku parametrizacijsku shemu u svim analiziranim slučajevima. Pravokutnici označavaju medijane te donje i gornje kvartile, dok su horizontalne linije unutar 1.5 interkvartilnog raspona od donjeg i gornjeg kvartila.



**Slika 3.13.** Kutijasti dijagrami maksimalnih omjera miješanja solike za točke u kojima je simulirana tuča kroz cijelu domenu i za sve članove ansambla za (a) 25. lipnja 2017., (b) 24. srpnja 2017., (c) 16. rujna 2017., (d) sve analizirane slučajeve te (d) svaku parametrizacijsku shemu u svim analiziranim slučajevima. Pravokutnici označavaju medijane te donje i gornje kvartile, dok su horizontalne linije unutar 1.5 interkvartilnog raspona od donjeg i gornjeg kvartila.

Nadalje, simulirane veličine zrna tuče, uzlazne struje i omjer miješanja solike osjetljiviji su na izbor mikrofizičke sheme. Naime, mikrofizičke sheme WSM6 i MORR proizvode veće medijane veličine zrna tuče u usporedbi s mikrofizičkim shemama LIN i NSSL2, pri čemu WSM6 proizvodi veća zrna tuče u usporedbi s mikrofizičkom shemom MORR. S druge strane, mikrofizička shema NSSL2 proizvodi najmanja zrna tuče, najslabije uzlazne struje i najmanje omjere miješanja solike.

### 3.1.8. Sažetak rezultata

Iako relativno česta pojava u Hrvatskoj, tuča još uvijek predstavlja izrazito izazovan fenomen za prognozu i klimatsko modeliranje. Iz tog razloga, odabrana su tri slučaja tuče iznad Hrvatske koja su simulirana modelom WRF s horizontalnim korakom mreže od 1 km. Dodatno, korištene su dijagnostike HAILCAST i LPI zajedno s 12-članim multifizičkim ansamblom s kombinacijama četiri različite sheme za mikrofizičke procese u oblaku i tri različite sheme opisa procesa u PBL-u. Glavni cilj provedene analize je procijeniti sposobnost modela WRF u reprodukciji atmosferskih uvjeta prisutnih tijekom oluja s tučom u Hrvatskoj te ispitati u kojoj mjeri HAILCAST i LPI mogu reproducirati opaženu aktivnost tuče i munja. Dodatno, ispitana je osjetljivost rezultata na izbor shema parametrizacije mikrofizike i PBL-a. Najbitniji rezultati analize su:

- i. Model WRF uspješan je u reprodukciji prizemnih atmosferskih uvjeta prisutnih tijekom odabranih slučajeva tuče. Štoviše, svi članovi ansambla reproduciraju prizemna mjerenja u komplementarnom rasponu drugih numeričkih studija i modela ECMWF IFS-a.
- ii. Svi članovi ansambla, osim onih s mikrofizičkom shemom NSSL2, uspješni su u simulaciji dnevne aktivnosti munja. Članovi s mikrofizičkom shemom NSSL2 sustavno podcjenjuju broj opaženih udara munja. S druge strane, u većini slučajeva, najintenzivniju aktivnost munje proizvode članovi s mikrofizičkom shemom WSM6.
- iii. Združena opcija modela WRF-HAILCAST uspješna je u simulaciji opažene tuče. Međutim, prisutni su mnogi lažni alarmi, što ukazuje na tendenciju modela da precijeni područje pogođeno tučom. Neki od lažnih alarma mogu se pripisati ograničenim prostornim informacijama o pojavi tuče povezanim s mrežom tučomjera koja pruža prostornu diskretnu informaciju o pojavi tuče. Nadalje, model općenito precjenjuje maksimalni simulirani promjer zrna tuče.
- iv. Najveća zrna tuče simuliraju članovi s mikrofizičkom shemom WSM6, dok najmanja zrna tuče simuliraju članovi s mikrofizičkom shemom NSSL2. Članovi ansambla koji sadrže shemu NSSL2 proizvode slabije uzlazno strujanje te niže vrijednosti omjera miješanja solike i posljedično niži LPI te manja zrna tuče u usporedbi s ostalim članovima ansambla.

Dakle, ova analiza pokazuje da članovi ansambla koji su bolje reproducirali opaženu aktivnost munja i tuče također proizvode i vjerodostojniju vertikalnu distribuciju

uzlaznih struja i omjera miješanja, usporedivu s onom tijekom oluja s tučom iznad Hrvatske. Ovo naglašava činjenicu da na rezultate nemaju utjecaj samo HAILCAST i LPI, već da većina uspješnosti ovisi o sposobnosti WRF-a da ispravno simulira konvekciju, kao i ovisnosti o poljima u procesu inicijalizacije iz analize ECMWF. Također analiza pokazuje na potencijalno precjenjivanje simuliranog područja zahvaćenog tučom. Za detaljniju analizu ovog zaključka u budućnosti bi trebalo provesti simulacije puno većeg broja slučajeva te detaljnije ispitati osjetljivost rezultata modela na pragove parametara koji definiraju aktivaciju HAILCAST-a. Također, analiza većeg broja slučajeva omogućila bi i detaljniju analizu parametara prilagodbe simuliranog LPI-a izmjenom broju udara munja. Nadalje, analiza pokazuje veću osjetljivost rezultata na odabir mikrofizičke nego PBL parametrizacijske sheme. Zbog toga bi se u operativnoj prognozi trebao koristiti ansambl simulacija za prognozu munja i tuče. Nadalje, iako su tučomjeri vjerojatno jedini izvor izravnih prizemnih mjerenja tuče, bilo bi izuzetno korisno usporediti rezultate simulacije s drugim izvorima podataka kao što su radarski produkti, podaci osiguravajućih kuća ili opažanja tuče iz medija. To bi upotpunilo korišteni set podataka o tuči i pružilo prostorno kontinuirane informacije o pojavi tuče. Uz to, potrebno je analizirati puno veći broj slučajeva tuče kako bi se dobili statistički robusniji zaključci o uspješnosti HAILCAST-a i LPI-ja. Osim toga, u operativnom okruženju trebala bi se implementirati asimilacija podataka kako bi se dodatno poboljšala prediktabilnost ovih ekstremnih događaja. Međutim, usprkos svim ograničenjima, predstavljeni rezultati su obećavajući te pokazuju da bi i HAILCAST i LPI mogli biti vrijedni alati za kratkoročnu prognozu vremena, ali i klimatološku procjenu pojave tuče i munja u sadašnjim i budućim klimatskim uvjetima.

## **3.2. Usporedba rezultata simulacija tuče modelima COSMO i WRF nad Alpsko-jadranskom regijom**

### *3.2.1. Odabrani slučajevi tuče*

Za analizu je odabrano osam dana s jakom konvekcijom nad Alpsko-jadranskom regijom. Ovi konvektivni događaji i mehanizmi koji su odgovorni za pojavu konvektivnih efekata već su detaljno analizirani numeričkim simulacijama modelom COSMO s uključenim opcijama HAILCAST i LPI (Cui i sur., 2023.). Točnije, Cui i sur. (2023.) odabrali su osam slučaja s jakom konvekcijom iznad Alpsko-jadranske regije na temelju uočenih šteta i različitih sinoptičkih obilježja kako bi proučili mehanizme odgovorne za pojavu olujnog vremena nad Alpsko-jadranskom regijom. Autori su pokazali da su i HAILCAST i LPI uspješno reproducirali promatrane značajke tuče i munja u širokom rasponu sinoptičkih situacija. Potaknuta obećavajućim rezultatima, ova analiza ima za cilj nadopuniti vrijedna prethodna istraživanja simulacija tuče u topografski složenoj Alpsko-jadranskoj regiji. Točnije, koriste se dva modela kilometarskih rezolucija, COSMO i WRF, združena s dijagnostikama HAILCAST i LPI za simulaciju oluja s tučom koje su analizirali Cui i sur. (2023.), a s posebnim geografskim fokusom na Hrvatsku i Švicarsku. Analizirajući osam slučaja tuče pomoću dva modela, cilj je (i) provesti sustavnu i kvantitativnu procjenu uspješnosti modela za sve slučajeve i (ii) identificirati robusnost HAILCAST i LPI rezultata proizvedenih dvama intrinzično različitim modelima. Ishod ove analize otkriva informacije o pristranostima modela i podrijetlu neslaganja između dva modela u simulaciji jakih oluja povezanih s tučom i munjama u topografski složenoj Alpsko-jadranskoj regiji.

Od osam odabranih olujnih slučajeva, tuča je zabilježena u Hrvatskoj i/ili Švicarskoj tijekom sedam od njih. Tijekom osmog slučaja nije bilo opažene tuče u Švicarskoj i Hrvatskoj, ali je iznad Alpa zabilježena intenzivna oborina koja je rezultirala velikim poplavama. Događaji tuče birali su se na temelju njihovih intenziteta koji je mjeran njihovim učinkom ili kinetičkom energijom zabilježenom pomoću tučomjera. Osim toga, pokušalo se odabrati one oluje s tučom koje se pojavljuju u nizu različitih sinoptičkih i mezoskalnih situacija radi procijene sposobnosti oba modela kod reprodukcije opažene konvekcije. Detaljan opis sinoptičkih čimbenika koji doprinose pojavi olujnog vremena tijekom odabranih dana dali su Cui i sur. (2023.). Štoviše, odabirom dana u kojem nema tuče, procjenjuje se sposobnost oba modela da razlikuju konvektivne dane sa i bez tuče.

Tipovi dostupnih mjerenja tuče za osam odabranih događaja zajedno s kratkim opisom njihovih učinaka navedeni su u Tablici 3.3.

**Tablica 3.3** Odabrani konvektivni događaji nad Alpsko-jadranskom regijom. Navedena je vrsta dostupnih mjerenja i kratak opis događaja. Radarska mjerenja pokrivaju Švicarsku, a tučomjeri pokrivaju Hrvatsku (Slika 3.14). Više informacija o učincima nekih od ovih događaja može se dobiti putem <http://www.sturmarchiv.ch/index.php/Hagel>.

Datum	Vrsta opažanja	Učinak
23.6.2009.	Radar	Grmljavinska oluja povezana s hladnom frontom pogodila je Švicarsku i prouzročila štetu od oko 261 milijuna CHF.
1.7.2013.	Radar	Značajna šteta na vinogradima u istočnoj Švicarskoj.
18.6.2013.	Tuča nije opažena u Hrvatskoj i Švicarskoj	Intenzivna oborina iznad Alpa dovela je do teških poplava u središnjoj i istočnoj Švicarskoj. Šteta se procjenjuje na 15 milijuna CHF.
25.7.2017.	Radar, tučomjeri	Veliki mezoskalni konvektivni sustav opažen u Hrvatskoj. 74 pogođena tučomjera s najvećim promjerom zrna tuče od 31,4 mm.
8.7.2017.	Radar	Štete na usjevima i vinogradima u Švicarskoj.
24.7.2017.	Radar, tučomjeri	U Hrvatskoj su zabilježene velika zrna tuče. Maksimalni zabilježeni promjer zrna tuče je 54.2 mm.
17.5.2018.	Tučomjeri	Bezgradijentno polje tlaka nad Hrvatskom. Značajna kinetička energija i veličina tuče (do 19.9 mm) nad Istrom.
30.5.2018.	Radar	Izražena šteta na automobilima i zgradama u središnjoj i istočnoj Švicarskoj.

### 3.2.2. Postavke simulacija

Odabrani dani s intenzivnom konvekcijom simulirani su korištenjem modela WRF (WRF ARW, verzija 4.1.5) (Skamarock i sur., 2019.) i klimatske verzije modela COSMO (COSMO-

crCLIM) (Baldauf i sur., 2011.; Leutwyler i sur., 2017.; Schär i sur., 2020.) u kombinaciji s HAILCAST-om i LPI-jem. Nastojalo se ujednačiti postavke među modelima što je više moguće. Dodatno, jedna epizoda tuče simulirana je i pomoću najnovije verzije modela COSMO, COSMO verzija 6.0.

Postavke za modeliranje sumirane su u Tablici 3.4, a sastojale su se od dvije jednosmjerne ugniježdene domene s horizontalnim korakom mreže od približno 12 km ( $0.11^\circ$ , 361x361 točaka mreže) i 2.2 km ( $0.02^\circ$ , 800x600 točaka mreže za COSMO i 801x601 točaka mreže za WRF) (Slika 3.14). Uzimajući u obzir važnost koraka fine mreže i u vertikalnom smjeru (npr. Fiori i sur., 2014.) i osjetljivost termodinamičkog indeksa na vertikalno uzorkovanje (npr. Manzato, 2008.), vertikalna mreža modela sastoji se od 65 vertikalnih razina u WRF-u i 60 vertikalnih nivoa u COSMO-u. Model WRF koristi hibridnu vertikalnu sigma-tlak koordinatu (engl. *hybrid sigma-pressure vertical coordinate*) (Park i sur., 2013.), dok COSMO koristi Gal-Chen koordinate. Vremenski korak za domene modela WRF su postavljene na 20 s i 4 s, dok je vremenski korak modela COSMO postavljen na 90 s odnosno 20 s za simulacije na 12 km, odnosno 2.2 km. Početni i rubni uvjeti preuzeti su iz reanalize ERA5 (Hersbach i sur., 2020.), a simulacije su inicijalizirane u 12 UTC dan prije nego što je opažena jaka konvekcija.

Korak mreže od približno 2.2 km omogućuje da model eksplicitno razlučuje mnoge konvektivne procese (Kain i sur., 2006., 2008.), pa se stoga u unutarnjoj domeni ne primjenjuje parametrizacija konvekcije. U vanjskoj domeni, konvekcija u WRF-u je parametrizirana pomoću Kain-Fritschove sheme (Kain i Kain, 2004.). Ostale korištene fizičke opcije uključuju shemu RRTM (Mlawer i sur., 1997.) za dugovalno zračenje i shemu Dudhia (Dudhia, 1989.) za kratkovalno zračenje. Što se tiče parametrizacije planetarnog graničnog sloja i parametrizacije mikrofizike, koriste se sheme MYNN2.5 (Nakanishi i Niino, 2006.) i WSM6 (Hong i Lim, 2006.).

Kumulusna shema korištena u vanjskoj domeni modela COSMO s korakom mreže od 12 km temelji se na radu Tiedtke (1989.) s parametriziranom verzijom za plitku konvekciju. U unutarnjoj domeni modela COSMO konvekcija također nije parametrizirana. Shema mikrofizike jednog momenta (Reinhardt i Seifert, 2006.) predstavlja mikrofiziku oblaka s prognostičkom vodom u oblaku, ledom u oblaku, kišom i snijegom. Shemu zračenja dali su Ritter i Geleyn (1992.).

Za simulaciju tuče i munja u oba modela koriste se HAILCAST i LPI. HAILCAST je aktiviran svakih 5 minuta na unutarnjoj domeni od 2.2 km ako uzlazno strujanje u

određenoj točki mreže prelazi  $10 \text{ m s}^{-1}$  i traje dulje od 15 min. S druge strane, LPI se izračunava svakih 15 min te se pohranjuju 15 min polja.

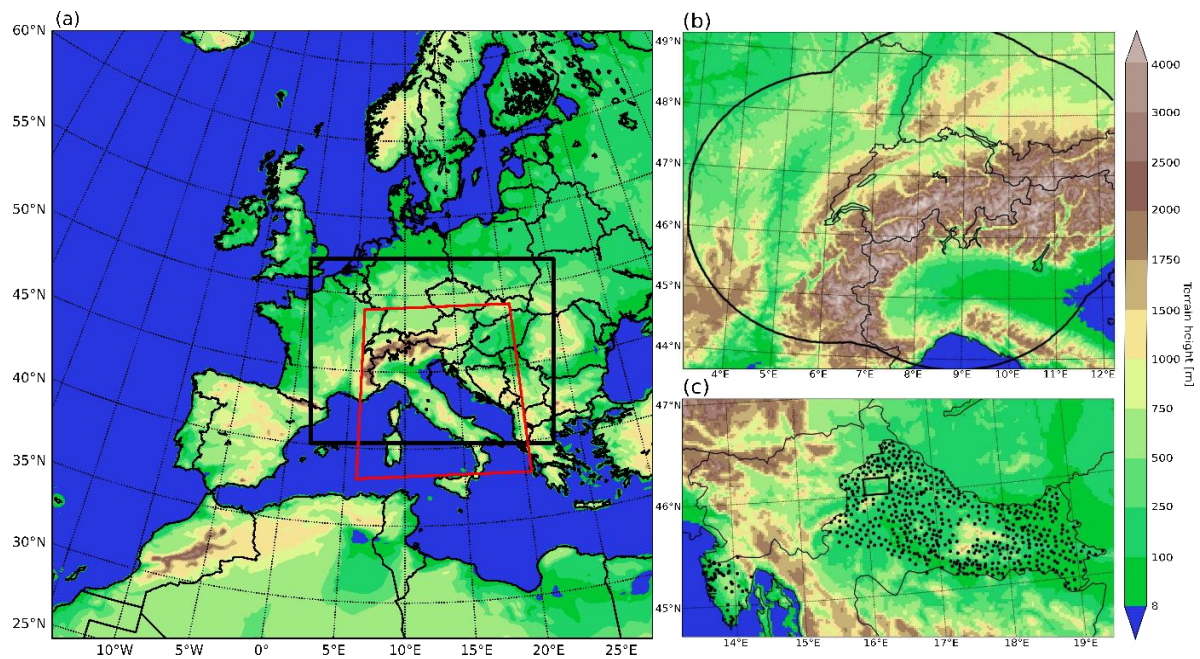
**Tablica 3.4** Pregled odabranih modelskih postavki COSMO i WRF modela.

	<b>COSMO</b>	<b>WRF</b>
<b>Domena</b>	12 km (361 x 361 točaka)	12 km (361 x 361 točaka)
	2.2 km (800 x 600 točaka)	2.2 km (801 x 601 točaka)
<b>Vertikalni nivoi</b>	60, Gal-Chen koordinate	65, hibridni sigma tlak koordinate
<b>Vremenski korak</b>	90 s, 20 s	20 s, 4 s
<b>Inicijalizacija vlage u tlu</b>	da <sup>7</sup>	ne
<b>Parametrizacija kumulusa</b>	12 km Tiedtke	12 km Kain-Frisch
	2.2 km bez parametrizacije kumulusa	2.2 km bez parametrizacije kumulusa
<b>PBL shema</b>	Prognostička TKE shema	MYNN 2.5
<b>Mikrofizika</b>	Jednomomentna Reinhardt i Seifert shema	WSM6
<b>Radijacija</b>	Ritter i Geleyn shema	RRTM i Dudhia shema
<b>Tuča</b>	HAILCAST aktiviran svakih 5 min	HAILCAST aktiviran svakih 5 min
<b>Munje</b>	LPI aktiviran svakih 15 min	LPI aktiviran svakih 15 min

---

<sup>7</sup> Vlaga u tlu za COSMO simulacije inicijalizirana je 7 dana prije promatranog slučaja koristeći srednje mjesečne profile tla dobivene 12 km COSMO simulacijama u periodu 1999-2008 (Vergara-Temprado i sur., 2020.)



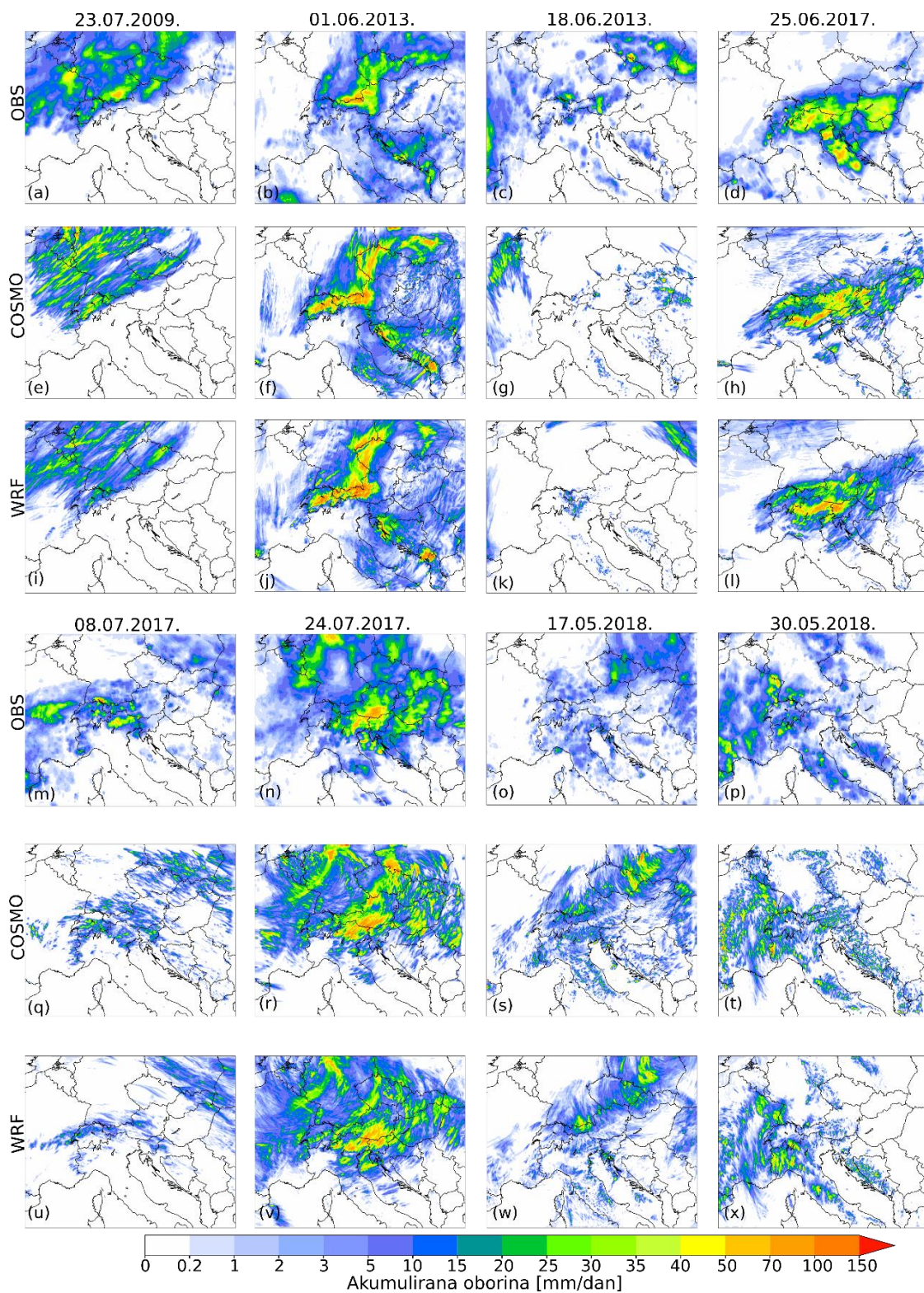


**Slika 3.14.** (a) Visina terena (nadmorska razina) kako je predstavljeno u modelu WRF za vanjsku domenu od 12 km. Unutarnja domena od 2.2 km označena je crnim pravokutnikom. Domena u kojoj su dostupna mjerenja iz mreže LINET/UBIMET označena je crvenom linijom. (b) Visina terena kako je predstavljena u modelu WRF u unutarnjoj domeni od 2.2 km iznad Alpskog područja. Crna linija označava prostornu pokrivenost švicarskog radara. (c) Visina terena kako je predstavljena u WRF-u u unutarnjoj domeni od 2.2 km iznad Hrvatske. Crne točke označavaju položaje tučomjera.

### 3.2.3. Rezultati oborine

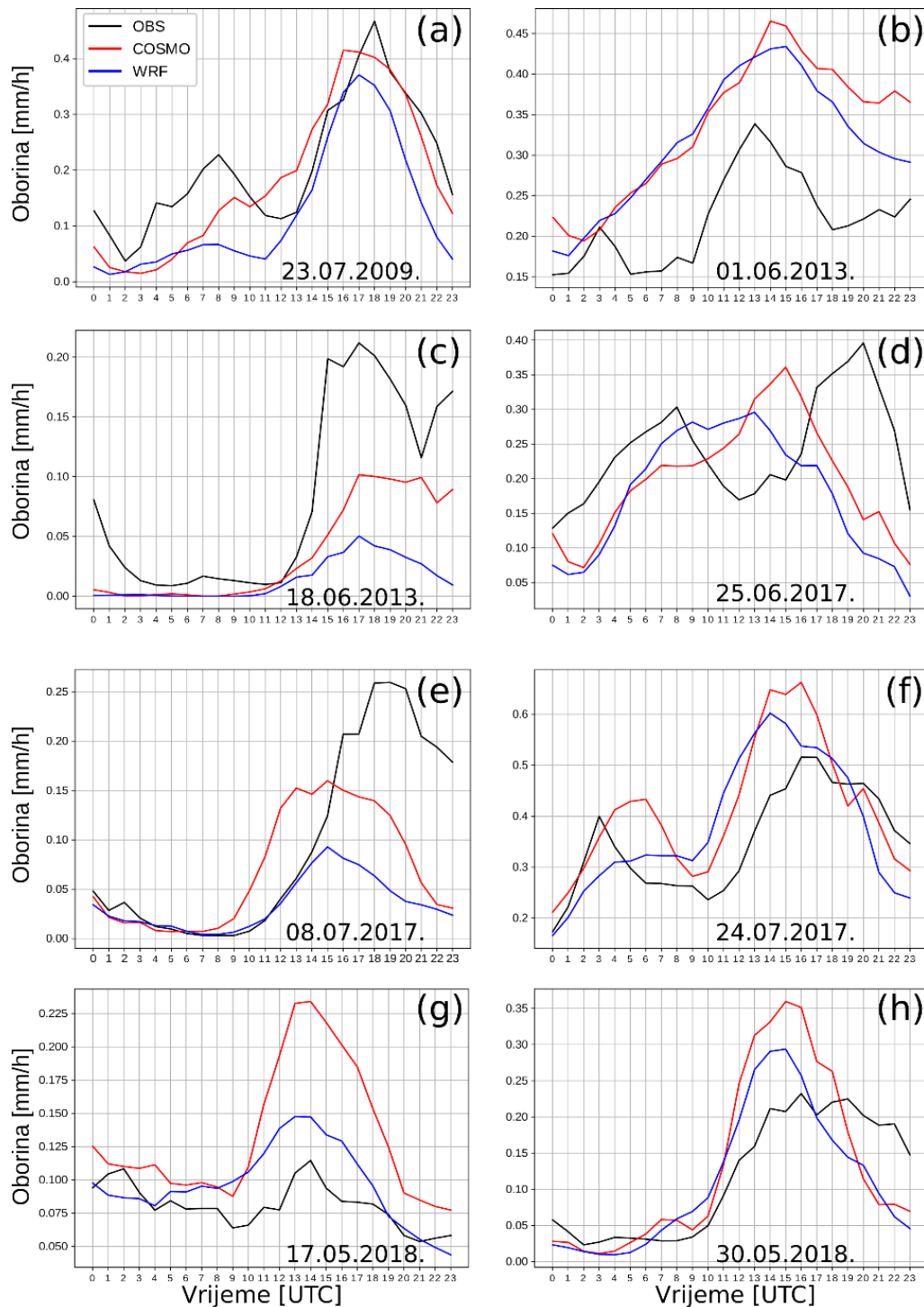
Prvi korak u analizi rezultata jest evaluacija simulirane oborine. Evaluacija se provodi za razdoblje od 00 UTC do 24 UTC na dan kada je opažena jaka konvekcija. Za evaluaciju je odabran set podataka IMERG, budući da pokriva cijelu domenu od interesa (domena 2 sa Slike 3.14). Uspoređujući dnevna akumulirana polja promatrane i simulirane oborine, vidi se dobro kvalitativno slaganje između opaženih i simuliranih polja u njihovim glavnim obilježjima (Slika 3.15). Stoga, oba modela prilično dobro reproduciraju opaženu oborinu, iako postoje manja lokalna odstupanja. Štoviše, područja s intenzivnijom simuliranom i mjerenom oborinom dobro se slažu. Međutim, oba modela naginju stvaranju intenzivnijim (engl. *more peaked*) i raštrkanijim (engl. *more scattered*) oborinskim strukturama u usporedbi s podacima IMERG. Navedeno ponašanje se uočava u svim analiziranim slučajevima, osim 8. srpnja 2017. i 18. lipnja 2013. Ta se tendencija djelomično može pripisati razlikama u horizontalnoj razlučivosti između simuliranih i mjenjenih polja. Simulirana polja su na razlučivosti od 2.2 km, dok su mjerena polja na razlučivosti od 11 km. S druge strane, za 18. lipnja 2013. i 8. lipnja 2017., oba modela su dala uglavnom manje i slabije oborinske strukture od mjenjenih. Uspoređujući polja

oborine dobivene pomoću modela COSMO-crCLIM i WRF, primjećuje se da model WRF teži proizvesti nešto manje intenzivnu oborinu nego model COSMO-crCLIM.



**Slika 3.15.** Akumulirana oborina za razdoblje između 00 i 24 UTC na dan kad je opažena jaka konvekcija za osam analiziranih slučajeva. Prikazana su mjerena i simulirana polja modela COSMO-crCLIM i WRF.

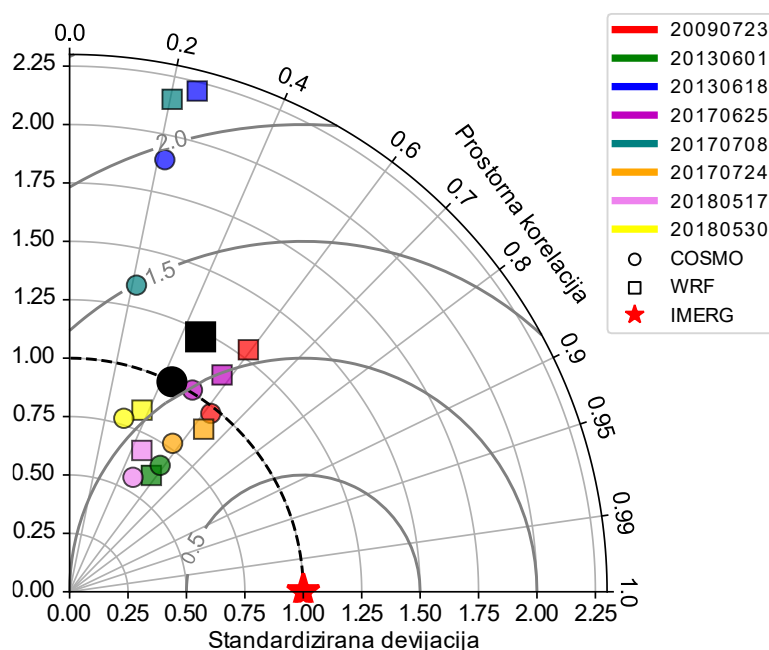




**Slika 3.16.** Akumulirana satna oborina dobivena iz mjerenja IMERG (crno) i simulirana pomoću modela COSMO-crCLIM (crveno) i WRF (plavo) za svih osam slučajeva (a)-(h). Satne izmjerene i simulirane količine oborine interpoliraju se na mrežu od 12 km, a zatim se izračunava srednjak za područje koje pokriva 2.2 km domena.

Kako bismo dodatno proširili i nadopunili ovu analizu, vremenska evolucija prosječne akumulirane oborine za cijelu domenu (Slika 3.14a) uspoređena je između

mjerenja i modela (Slika 3.16). Uzimajući u obzir razliku u horizontalnoj razlučivosti modela i IMERG-a, i opažena i simulirana polja interpolirana su na vanjsku mrežu od 12 km s granicama koje odgovaraju unutarnjoj mreži od 2.2 km prikazanoj na slici 3.14a. Usporedba otkriva da su oba modela prilično dobro reproducirala vremenski razvoj oborine u svim slučajevima, osim 25. lipnja 2017. Međutim, treba napomenuti da su određena podcjenjivanja/precjenjivanja ili vremenski pomaci još uvijek prisutni, ovisno o analiziranom slučaju. Za 25. lipnja 2017. oba modela nisu uspjela reproducirati dva lokalna maksimuma oborine opažena u ranim jutarnjim i večernjim satima. U većini slučajeva oba modela simuliraju usporedive ili malo veće količine oborine u usporedbi s mjerenjima. Podcjenjivanje oborine prisutno je samo za slučajeve 18. lipnja 2013. i 8. srpnja 2017. kao što je već navedeno u analizi prostornih karakteristika oborine. Uočeno je da za analizirane događaje, model WRF daje u prosjeku, manje količine oborine u usporedbi s modelom COSMO-crCLIM.



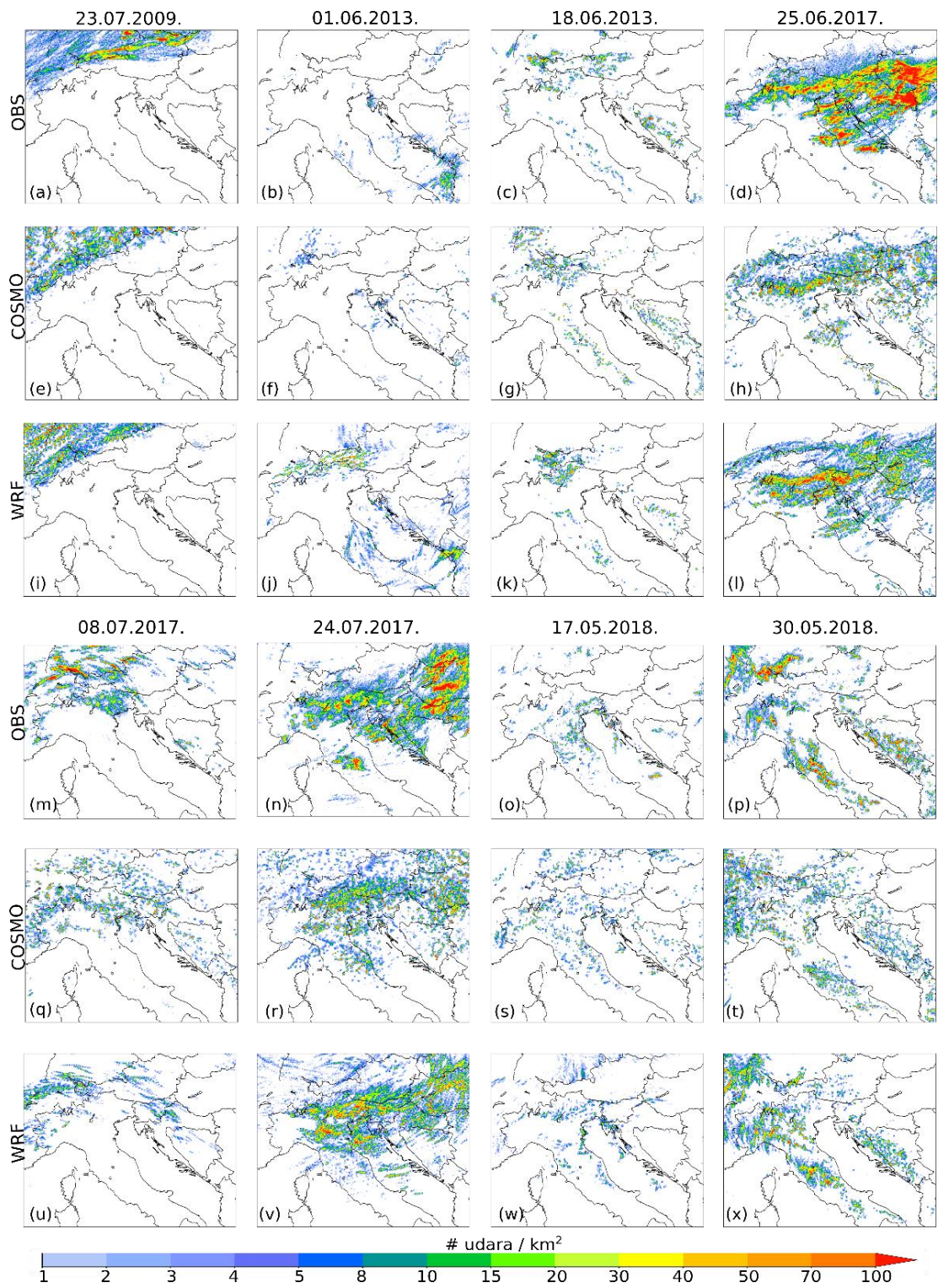
**Slika 3.17.** Taylorov dijagram koji prikazuje uspješnost modela COSMO-crCLIM (krug) i WRF (kvadrat) pri simulaciji dnevne akumulirane oborine te nakon usporedbe s mjerenjima iz baze IMERG (crvena zvijezda). Usporedba je napravljena za svih 8 slučajeva prema legendi, dok su odgovarajući medijani označeni crnim oznakama. Naznačena je standardizirana devijacija, prostorna korelacija te RMSE (polukružnice u dijagramu).

Simulirana i izmjerena oborina dalje se kvantitativno uspoređuje pomoću Taylorovih dijagrama (Taylor, 2001.). Kako bi uzeli u obzir moguće vremenske pomake između izmjerene i simulirane konvekcije, te različite horizontalne razlučivosti između

mjerenja IMERG-a i modela, Taylorovi dijagrami dobiveni su interpolacijom dnevno akumuliranih izmjerenih i simuliranih polja na zajedničku mrežu od 12 km. Kao što je prikazano na Slici 3.17, oba modela pokazuju slične rezultate, iako su veće razlike u standardiziranim odstupanjima za slučaj 18. lipnja 2013. i 8. srpnja 2017. Oba modela pokazuju slične koeficijente korelacije između simuliranih i izmjerenih polja. Gledajući srednje vrijednosti za sve slučajeve zajedno, može se zaključiti da oba modela pokazuju sličnu uspješnost u simulaciji izmjerene oborine sa standardiziranim odstupanjima od 1.14 i 1, koeficijentima korelacije od 0.5 i 0.5 i korijenom srednje kvadratne pogreške od 1.1 i 1 za modele COSMO-crCLIM odnosno WRF.

### *3.2.4. Rezultati primjene LPI-a*

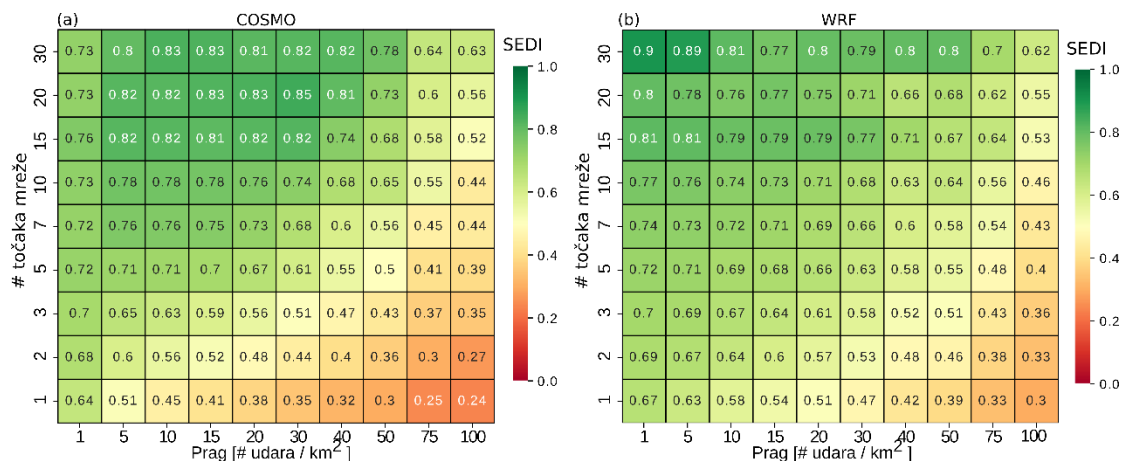
Drugi korak evaluacije rezultata modela podrazumijeva evaluaciju LPI [ $J\ kg^{-1}$ ] u odnosu na izmjereni broj munja iz mreže LINET. Kako LPI ukazuje na potencijal za razvoj munja, kao takav nije izravno povezan s opaženim brojem udara munja. Za izravnu usporedbu između LPI i opaženog broja udara munja, provedena je pretvorba LPI u broj udara munja prema Brissonu i sur. (2021.) kao što je već opisano u poglavlju 3.1.4. Ovdje se pretvorba provodi korištenjem  $t = 0.045$ ,  $k = 3.3$  i  $l = 0.1$  za COSMO-crCLIM i  $t = 0.65$ ,  $k = 0.65$  i  $l = -0.2$  za model WRF za sve slučajeve. Razlika u optimalnim vrijednostima parametara između WRF-a i COSMO-a ističe razlike između LPI-ja koje proizvodi COSMO-crCLIM i WRF. Naime, veće vrijednosti parametra  $t$  i niže vrijednosti parametra  $k$  povezane s WRF-om pokazuju da WRF proizvodi veći LPI, za razliku od rezultata dobivenih za oborinu gdje je WRF proizveo nešto manje količine oborine u odnosu na COSMO. Budući da je LPI jako ovisan o intenzitetu uzlaznog strujanja i poljima hidrometeora (kao što je naznačeno jednadžbom 2.1), ova razlika u  $t$ ,  $k$  i  $l$  vrijednostima između dva modela mogla bi biti posljedica razlika u simuliranim uzlaznim brzinama ili mikrofizičkim poljima proizvedenim modelima COSMO-crCLIM i WRF. Ove razlike bit će dalje diskutirane u poglavlju 3.2.6.



**Slika 3.18.** Simulirana i izmjerena akumulacija udara munja u vremenskom periodu od 00 do 24 UTC na dan s jakom konvekcijom. Stupci označavaju slučajeve, dok retci označavaju mjerenja iz (a-d; m-p) mreže LINET, i polja simulirana modelima (e-h; q-t) COSMO-crCLIM i (i-l; u-x) WRF.

Kako bi se smanjile nesigurnosti u simulaciji vremenskih obilježja promatrane konvekcije (kao što se vidi na Slici 3.16), analiziraju se dnevne sume  $LPI_{adj}$  dobivene modelima COSMO-crCLIM i WRF u odnosu na izmjeren broj udara munja za svaki analizirani slučaj (Slika 3.18). Prostorni uzorak izmjerene aktivnosti munja u oba modela općenito dobro reproducira mjerenja, iako su simulirana polja više raspršena od izmjerenih. Jedan od razloga je različito bilježenje munja u vremenu; za razliku od proračuna LPI koji se provodi svakih 15 minuta, mreža LINET kontinuirano detektira udare munja. Štoviše, uzimajući u obzir sve slučajeve, primjećuje se da je pretvorba LPI u broj udara munja bolje prilagođena manje intenzivnoj aktivnosti munja. To se objašnjava činjenicom da se prilagodba izvodi na svim točkama mreže. Budući da postoji više točaka mreže sa slabijom aktivnošću munja nego točaka s izrazito intenzivnom aktivnošću munja, prilagodba je intrinzično bolja za manji broj udara munja. Razlika u prilagodbi između manjeg i većeg broja udara izraženija je u slučajevima s intenzivnijom i raširenijom aktivnošću munja, tj. za slučajeve 25. lipnja 2017. i 24. srpnja 2017. Ipak, prostorna raspodjela munja, tj. prostorna raspodjela s većim i manjim intenzitetom aktivnosti munja između simuliranih i izmjerenih polja dobro se podudaraju. Unatoč tome lokalna odstupanja još uvijek postoje ovisno o slučaju i analiziranom modelu. Gledajući razlike između polja koje reproduciraju COSMO-crCLIM i WRF, postoji tendencija COSMO-crCLIM-a da simulira raspršenija polja s manjim intenzitetom aktivnosti.

Nadalje, za kvantitativnu procjenu uspješnosti COSMO-crCLIM-a i WRF-a u simulaciji opažene aktivnosti munja, koristi se metoda minimalne pokrivenosti (engl. *minimal coverage verification method*). Kako bismo dobili robusnije rezultate, evaluaciju provodimo uzimajući u obzir sve analizirane slučajeve zajedno. Nadalje, analiza je provedena uzimajući u obzir dnevne sume izmjerene i simulirane aktivnosti munja (polja prikazana na Slici 3.18). Koristeći metodu minimalne pokrivenosti u kombinaciji s različitim radijusima verifikacijskih prozora i različitim pragovima za broj munja, konstruiraju se tablice kontigencije i izračunava se SEDI indeks (Slika 3.19). Oba modela pokazuju sličnu uspješnost koja je bolja za manje intenzivnu aktivnost munja. Štoviše, dobra uspješnost ( $SEDI > 0.6$ ) dobivena je čak i za intenzivniju aktivnost munja ako se uzmu u obzir veći verifikacijski prozori. Model WRF pokazuje veće SEDI vrijednosti od COSMO-crCLIM za intenzivniju i lokaliziranu aktivnost munja (donja desna strana dijagrama), što potvrđuje prethodne zaključke da COSMO-crCLIM ima tendenciju proizvesti manje i raštrkanije izvore aktivnosti munja.

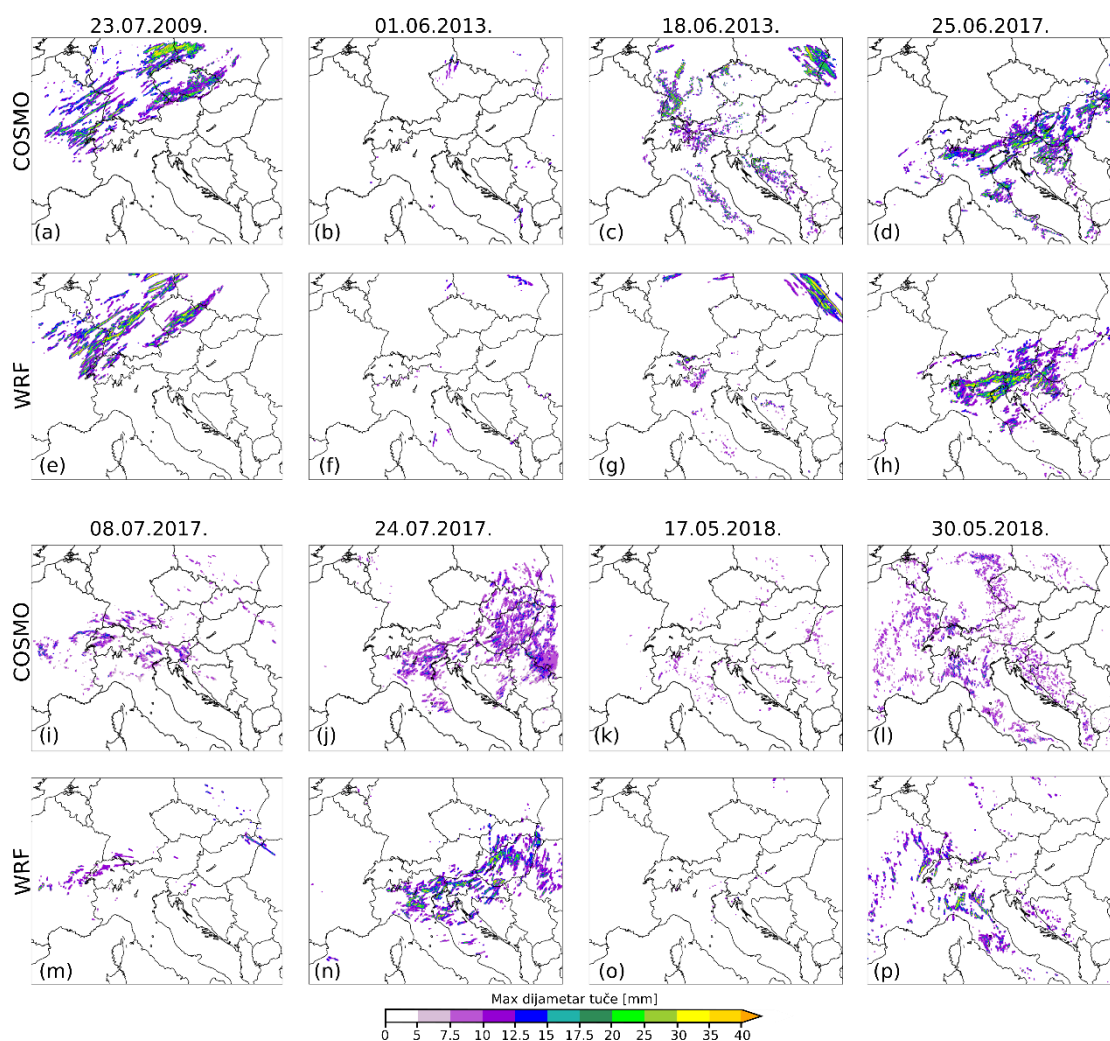


**Slika 3.19.** Uspješnost modela (a) COSMO-crCLIM i (b) WRF u simulaciji izmjerenih udara munja. Uspješnost ovisno o pragu za broj udara munja i veličini verifikacijskog prozora naznačena je pomoću verifikacijske metrike SEDI. Viša/niša vrijednost indeksa SEDI znači bolju/lošiju uspješnost modela, što se odražava u zelenoj/crvenoj boji.

### 3.2.5. HAILCAST rezultati

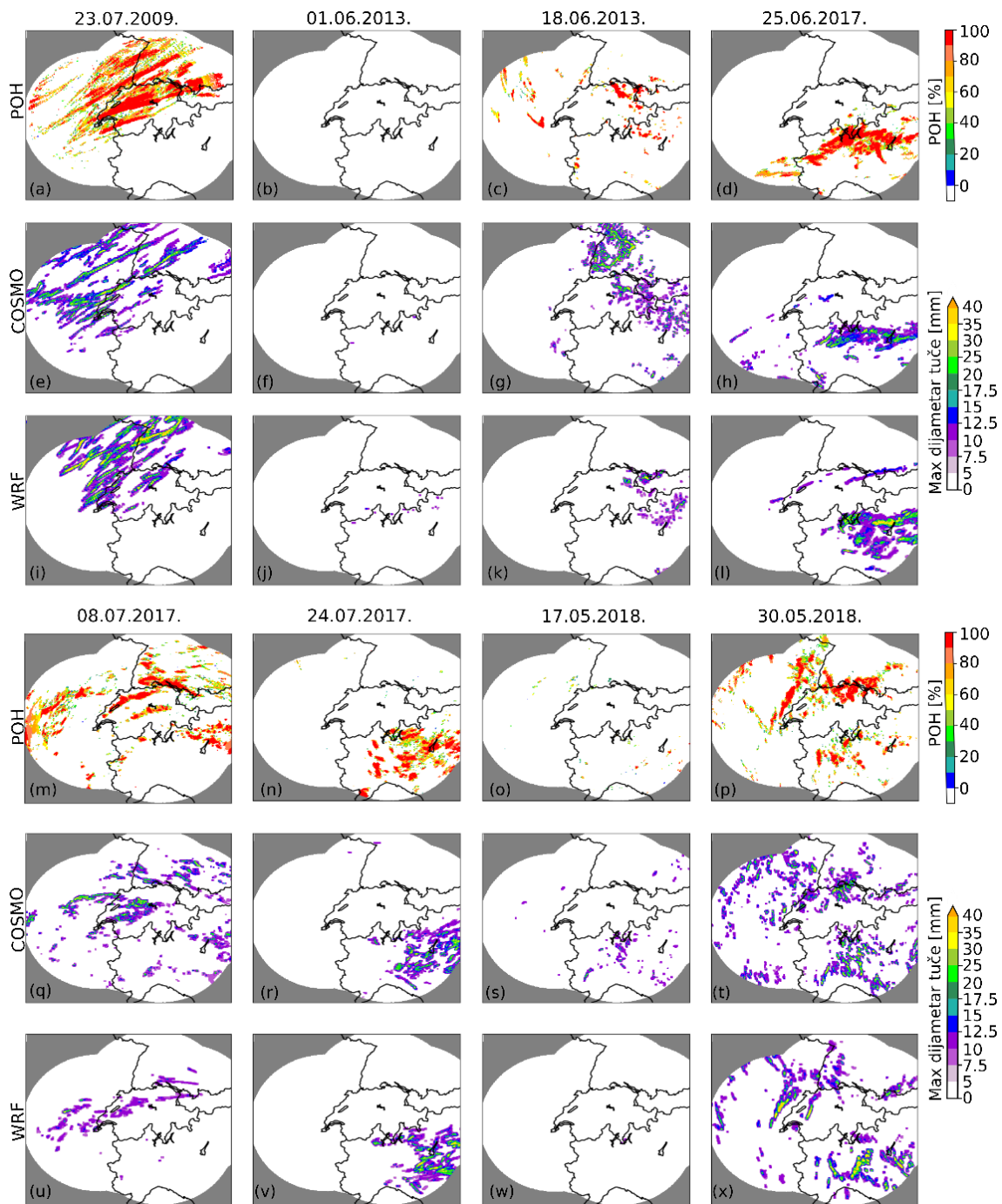
Rezultati HAILCAST-a evaluirani su u odnosu na daljinska i *in-situ* mjerenja za razdoblje od 00 UTC do 24 UTC na dan kada je opažena jaka konvekcija. Štoviše, kako bismo smanjili utjecaj mogućih vremenskih pomaka između simulirane i opažene konvekcije, simulirani i izmjereni skupovi podataka sumirani su za period od 24 h. Prvo vršimo kvalitativnu usporedbu između obilježja tuče dobivenih pomoću dvaju modela. Slika 3.20 sugerira da su oba modela dala općenito slične prostorne karakteristike tuče na istom području od interesa, iako određene lokalne razlike između simuliranih značajki tuče još uvijek postoje. Unatoč ukupnoj sličnosti rezultata, očita je tendencija COSMO-crCLIM-a da simulira više tuče tijekom svih analiziranih slučajeva. Tijekom slučaja 1. lipnja 2013. kada tuča nije opažena ni u Hrvatskoj ni u Švicarskoj COSMO uspješno simulira dan bez tuče nad navedenim područjima, dok WRF proizvodi sporadične signale s tučom.





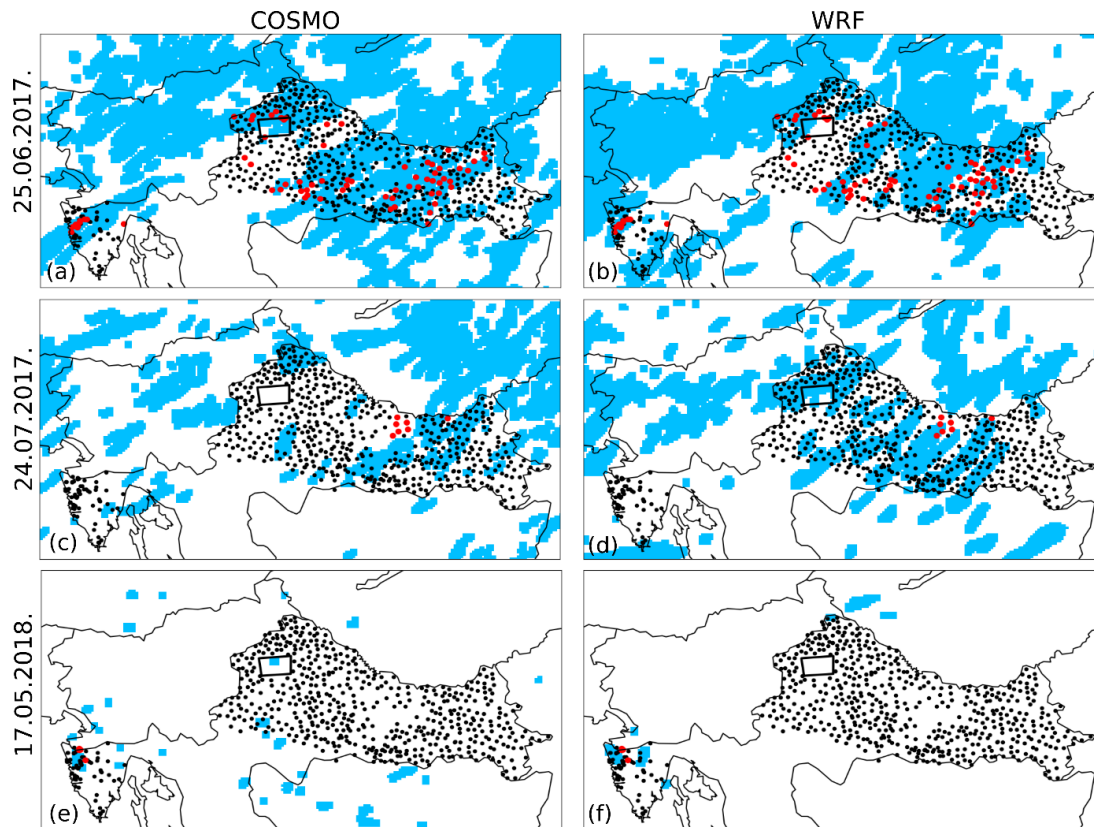
**Slika 3.20.** Maksimalni promjeri zrna tuče u vremenskom razdoblju od 00 UTC do 24 UTC na dan s jakom konvekcijom simulirani pomoću modela COSMO-crCLIM (a)-(d); (i)-(l) i WRF (e)-(h); (m)-(p).

Nadalje simulirana polja uspoređena su s radarskim produktima u Švicarskoj. Slika 3.21 prikazuje simuliranu i izmjerenu tuču u alpskom području. Jasno je da oba modela mogu proizvesti prostorna obilježja tuče usporediva s radarskim produktima, iako određena odstupanja postoje, ovisno o promatranom slučaju i modelu. U većini analiziranih slučajeva model WRF daje manje površine zahvaćene tučom nego COSMO-crCLIM. S druge strane, model WRF simulira više točaka mreže s maksimalnim promjerom zrna tuče većim od 35 mm.



**Slika 3.21.** Dnevni maksimumi promjera zrna tuče simulirani pomoću modela (e)-(h); (q)-(t) COSMO-crCLIM i (i)-(l); (u)-(x) WRF i dnevni maksimumi (a)-(d); (m)-(p) radarskog produkta POH.

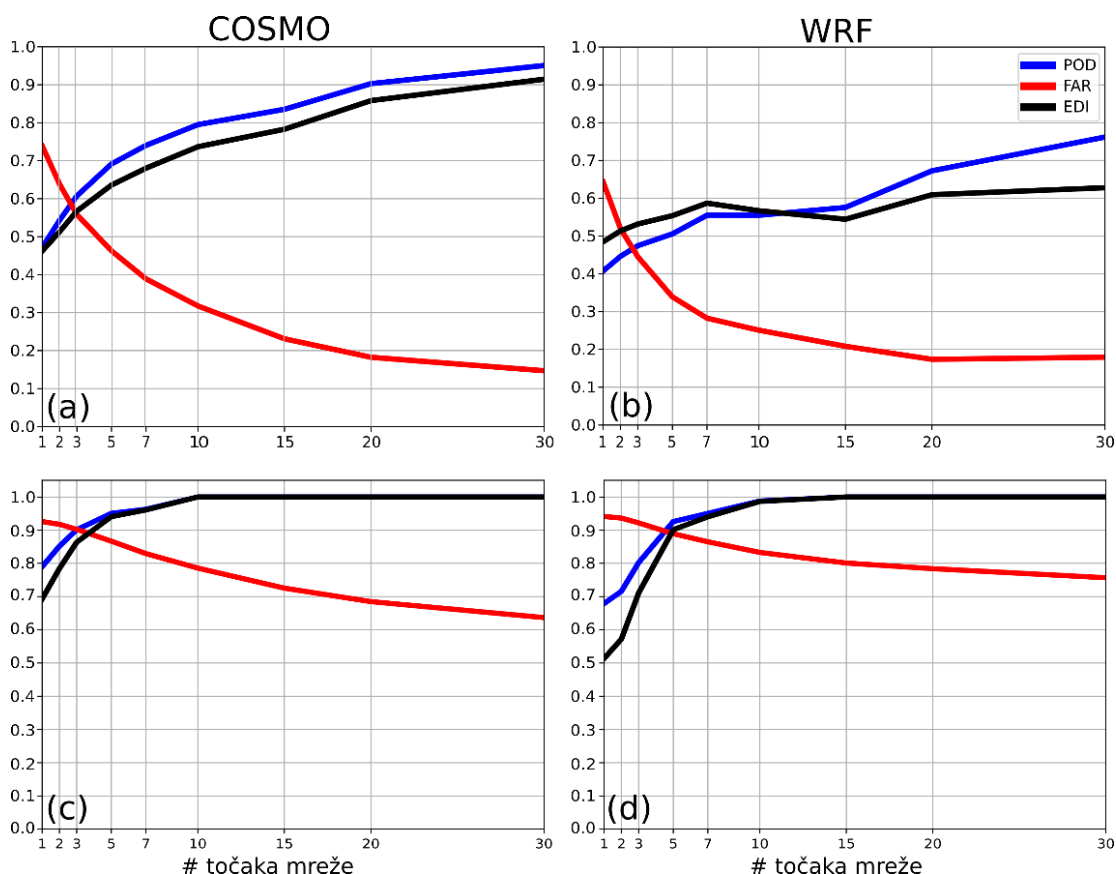
Dalje simulirana polja uspoređujemo u odnosu na drugi izvor informacija o pojavi tuče – mjerenja iz hrvatske mreže tučomjera. Od osam slučaja s jakom konvekcijom nad Alpsko-jadranskom regijom, tučomjeri u Hrvatskoj zabilježili su tuču na samo tri dana (25. lipnja 2017., 24. srpnja 2017., 17. svibnja 2018.). Za ove dane, simulirano područje pokriveno tučom s naznačenim pogođenim tučomjerima prikazano je na Slici 3.22. Sve u svemu postoji dobro slaganje između izmjerene i simulirane tuče za oba modela. Većina pogođenih tučomjera nalazi se u području gdje je tuča zaista simulirana. Međutim, oba modela pokazuju određeni broj lažnih alarma, tj. tuča nije opažena, ali je model simulirao tuču. Valja napomenuti da se neki od ovih lažnih alarma mogu pripisati ograničenim prostornim informacijama o pojavi tuče koje pruža mreža tučomjera. Za razliku od radara, mreža tučomjera daje informacije o pojavi tuče samo na točnom mjestu gdje je tučomjer postavljen. Tuča se lako može pojaviti bilo gdje između dva tučomjera i ostati nezabilježena. Unatoč tome, najveći broj lažnih alarma prisutan je za slučaj 24. srpnja 2017., pri čemu je model WRF proizveo više lažnih alarma nego COSMO-crCLIM. Oba modela su uspješno reproducirala čak i jako lokaliziranu oluju s tučom koja se dogodila 17. svibnja 2018. popraćena gotovo bezgradijentnim poljem tlaka nad sjeveroistočnim Jadranom (Cui i sur., 2023.). Bitno je napomenuti da, tijekom ovog slučaja COSMO-crCLIM, za razliku od WRF-a, proizvodi nekoliko lažnih signala u kontinentalnom dijelu Hrvatske. U ostala dva analizirana slučaja, 25. lipnja 2017. i 24. srpnja 2017., združeni modelski sustav WRF-HAILCAST dao je slična obilježja tuče čak i uz različite postavke modela u usporedbi s prethodnom analizom, tj. različitim domenama, horizontalnim korakom, ulaznim podacima i vremenom aktivacije HAILCAST-a.



**Slika 3.22.** Simulirana i opažena tuča tijekom tri slučaja s tučom u Hrvatskoj. Osjenčano plavo područje predstavlja područje simulirane tuče (maksimalni promjer zrna tuče veći od 5 mm) od 00 do 24 UTC na dan kada je tuča opažena. Položaj tučomjera označen je crnim točkama. Pogođeni tučomjeri označeni su crvenim krugovima. Položaj poligona tučomjera označen je crnim pravokutnikom, a tučomjeri unutar poligona su obojeni samo ako je tuča zabilježena na tom određenom tučomjeru. Prikazana su polja simulirana modelima (a, c, e) COSMO-crCLIM i (b, d, f) WRF.

Kako bismo kvantitativno opisali uspješnost modela, provodimo evaluaciju simuliranih polja u odnosu na opažanja. Da bi se dobili robusniji rezultati, evaluacija se provodi sumiranjem svih analiziranih slučajeva zajedno i analizom dnevnih maksimuma opaženih i simuliranih polja. Točnije, polja prikazana na Slici 3.21 evaluirana su u odnosu na signale POH > 80 %, budući da je u području koje odgovara POH > 80 % vrlo vjerojatno da će na tlu biti tuče (Nisi i sur., 2016.). Za analizu, produkt POH se interpolira na mrežu modela, a opažena i simulirana polja evaluiraju se korištenjem metode minimalne pokrivenosti s različitim veličinama verifikacijskog prozora, kao što je već opisano u poglavlju 2.3.4. Dobiveni dijagrami uspješnosti prikazani na Slici 3.23a-b pokazuju da model COSMO-crCLIM pokazuje bolje rezultate u smislu parametara POD i EDI za sve razmatrane veličine verifikacijskog prozora. S druge strane, WRF pokazuje bolje rezultate u smislu FAR-a za sve veličine verifikacijskog prozora osim onog koji odgovara 30 točaka mreže. Ovakvi se zaključci mogu pripisati činjenici da COSMO-crCLIM proizvodi više tuče

u usporedbi s WRF-om što dovodi do viših POD i FAR vrijednosti. Sažimajući rezultate sa Slika 3.21 i 3.23a-b, zaključuje se da model COSMO-crCLIM simulira područje pokriveno tučom koje je sličnije opaženom u alpskoj regiji.

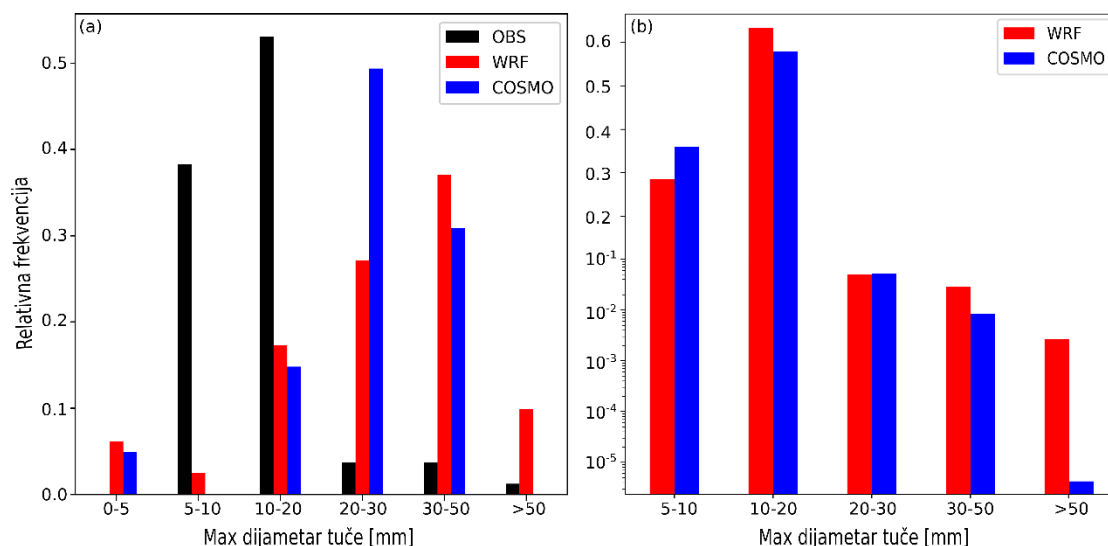


**Slika 3.23.** Uspješnost (a) COSMO-crCLIM i (b) WRF modela u simulaciji opažene tuče u odnosu na radarski produkt POH i uspješnost modela (c) COSMO-crCLIM i (d) WRF u simulaciji tuče u odnosu na mjerenja tuče s hrvatske mreže tučomjera u smislu vjerojatnosti otkrivanja (POD, plavo), stope lažnih alarm (FAR, crveno) i indeksa ekstremne ovisnosti (EDI, crno). Prikazana je uspješnost ovisno o veličini verifikacijskog prozora.

Evaluacija simuliranih polja u usporedbi s mjerenjima iz mreže tučomjera u Hrvatskoj korištenjem skalirane metode susjedstva (kako je opisano u poglavlju 2.3.4) također je prikazana na Slici 3.23 c-d. Dobiveni dijagrami uspješnosti pokazuju slične rezultate između dva modela. Velike vrijednosti POD za veće veličine verifikacijskog prozora pokazuju da su modeli simulirali tuču tamo gdje je opažena. Međutim, za razliku od rezultata povezanih s radarima (Slika 3.23a-b), vrijednosti FAR-a povezane s mrežom tučomjera puno su veće. To je najvjerojatnije povezano s potencijalnom tendencijom modela da precijeni područje zahvaćeno tučom, ako ne i s nedostatkom prostorno

kontinuiranih informacija o pojavi tuče u Hrvatskoj. Značajno je da postoji veliki doprinos vrijednostima FAR-a od slučaja 24. srpnja 2017. gdje su oba modela proizvela mnogo lažnih alarma. Isti slučaj, 24. srpnja 2017., slabo je reproduciran i u prethodnom poglavlju (3.1.6.) s mnogo lažnih alarma koji ukazuju na nisku prediktabilnost atmosferskih uvjeta koji dovode do inicijacije i evolucije opažene konvekcije.

Mreže tučomjera, osim što pružaju informacije o pojavi tuče, također pružaju informacije o veličini zrna tuče na tlu. Koristeći te informacije, napravljena je usporedba simuliranih i izmjerenih maksimalnih promjera zrna tuče. Kako bi se uzeli u obzir mogući prostorni pomaci između izmjerene i simulirane tuče, pretražuje se susjedno okruženje unutar radijusa od 5 točaka mreže (što otprilike odgovara 12 km) svakog pogođenog tučomjera. Tada maksimalni simulirani promjer zrna tuče unutar ovog područja uspoređujemo s izmjerenim maksimalnim promjerom zrna tuče (Slika 3.24a). Oba modela podcjenjuju učestalost pojave manjih zrna tuče (promjera 5-10 mm i 10-20 mm), a precjenjuju učestalost pojave većih zrna tuče (promjera većeg od 20 mm). Međutim, pri analizi takvih rezultata treba postupati s oprezom, budući da je iz prijašnjih studija poznato da tučomjeri vjerojatno neće zabilježiti najveća zrna tuče s obzirom na to da pokrivaju samo 0.25 m<sup>2</sup> (npr. Smith i Waldvogel, 1989.). Doista, da bi se dobila realističnija usporedba između simuliranog i opaženog maksimalnog promjera zrna tuče, bilo bi bolje koristiti informacije o veličini zrna tuče koja dolazi od motritelja. Nažalost takvi podaci nisu bili dostupni za ovu studiju. Ipak neki zaključci se mogu dobiti iz ove analize. Naime, COSMO-crCLIM uglavnom simulira zrna tuče u kategoriji 20-30 mm, dok WRF uglavnom simulira zrna tuče u kategoriji 30-50 mm. Za razliku od modela COSMO-crCLIM, model WRF je uspio reproducirati izmjereno zrno tuče veće od 50 mm. Navedene razlike između dva modela dodatno se ističu ako usporedimo raspodjelu maksimalnih veličina zrna tuče u cijeloj domeni i svim analiziranim slučajevima (Slika 3.24b). Model COSMO-crCLIM simulira veći broj zrna tuče u kategoriji 5-10 mm nego WRF, dok model WRF daje više većih zrna tuče. Ovi zaključci u skladu su s Cui i sur. (2023) koji su pokazali da COSMO često simulira previše malih, a premalo većih zrna tuče u usporedbi s radarskim proizvodom MESHS (engl. *Maximum Expected Severe Hail Size*).



**Slika 3.24.** (a) Relativna frekvencija maksimalnog promjera zrna tuče izmjenjenog tučomjerima (crno) i simuliranog pomoću modela COSMO-crCLIM (plavo) i WRF (crveno) te (b) relativna frekvencija simuliranih maksimalnih promjera zrna tuče u cijeloj domeni za modele COSMO-crCLIM (plavo) i WRF (crveno). Histogrami se normaliziraju dijeljenjem broja zrna tuče u svakoj kategoriji s ukupnim promatranim brojem zrna tuče. Kako bi se bolje prikazale razlike između modela, y-os u (b) je dijelom linearna, a dijelom logaritamska.

Sukus ovih rezultata je sljedeći. HAILCAST, bilo da je integriran u modele WRF ili COSMO, može reproducirati opažene prostorne karakteristike tuče u Alpsko-jadranskoj regiji kao što su već potvrdile prethodne studije za druga područja (Trefalt i sur., 2018.; Manzato i sur., 2020.; Raupach i sur., 2021.; Tiesi i sur., 2022.). Usporedbom simuliranih i izmjenjenih maksimalnih promjera zrna tuče, uočeno je da oba modela često precjenjuju izmjerene maksimalne promjere zrna tuče. S obzirom na ograničenja mreže tučomjera u smislu detekcije najvećih zrna tuče, potrebno je provesti detaljnu analizu maksimalnih promjera zrna tuče dobivenih motrenjima kako bi se dobile dodatne potvrde ovih zaključaka. Iako su rezultati slični između dva modela, mogu se pronaći neke razlike. Općenito, model COSMO-crCLIM teži simuliranju većih područja prekrivenih tučom, ali manjih zrna tuče u usporedbi s WRF-om. S druge strane, model WRF češće simulira manja područja pokrivena tučom, ali širi spektar veličina zrna tuče. Međutim, COSMO-crCLIM pokazuje bolje rezultate u smislu simulacije tuče tamo gdje je opažena u cijeloj domeni, ali simulirane veličine zrna tuče su nešto manje u usporedbi s mjerenjima tučomjera.

### 3.2.6. Razlike između modela i interna varijabilnost modela

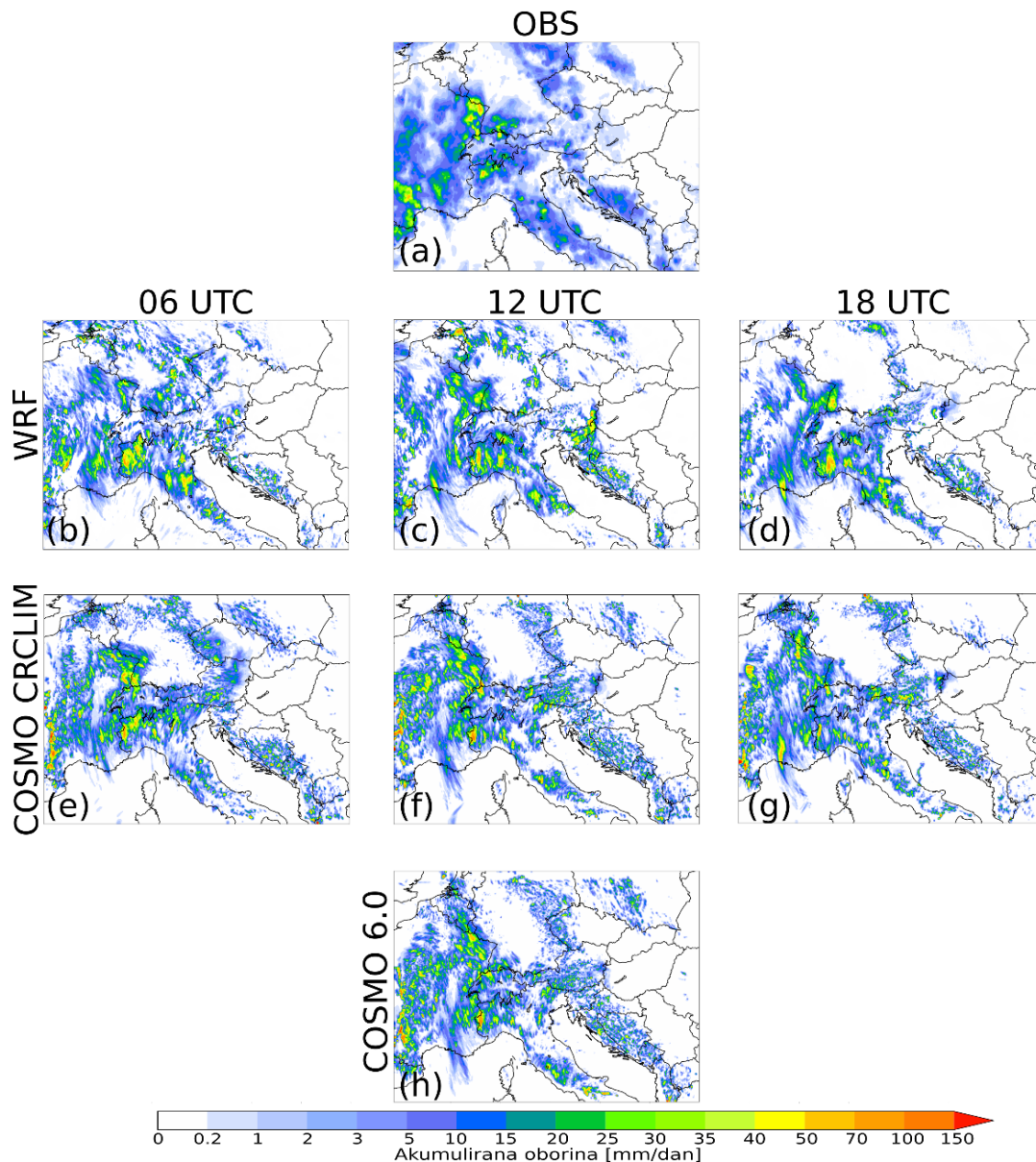
U ovom dijelu radnje istražuje se potencijalno podrijetlo razlika među modelima te se provodi analiza uloge interne varijabilnosti modela u rezultatima, odnosno osjetljivost



rezultata na vrijeme inicijalizacije. Iz tog razloga se formirao skup simulacija s različitim vremenima inicijalizacije za jedan od slučajeva s raširenom tučom i munjama diljem Alpsko-jadranske regije. Točnije radi se o slučaju 30. svibnja 2018. Oba modela su inicijalizirana u 06, 12 i 18 UTC na dan prije nego što je opažena tuča (29. svibnja 2018.). Kako bi se dodatno povećala veličina ansambla i robusnost zaključaka dodana je simulacija najnovije verzije modela COSMO-a, odnosno COSMO 6.0, koja je inicijalizirana u 12 UTC dan prije opažanja tuče.

Prva analiza se odnosi na simulirana polja dnevne akumulirane oborine između članova ansambla (Slika 3.25). Svi članovi ansambla daju oborinu sličnu opažanjima, ali na način da je veća razlika u poljima koja proizvode različiti modeli COSMO i WRF nego u poljima između članova istog modela. Navedeno sugerira da su razlike u rezultatima više povezane sa sustavnim razlikama između modela nego s internom varijabilnošću modela. Međutim, treba napomenuti da razlike između članova modela još uvijek postoje. Obje verzije COSMO-a proizvele su usporediva polja, iako su prisutne lokalne razlike koje mogu biti relevantne pri prognozi vremena. Na primjer, opažena intenzivna oborina duž francusko-njemačke granice uvelike je, ili u potpunosti, izostavljena u dva člana ansambla s modelom COSMO, ali je prisutna u članu inicijaliziranom u 06 UTC. Ovo naglašava potrebu za korištenjem ansambla prognoze u aplikacijama za numeričku prognozu vremena (Klasa i sur., 2018.).

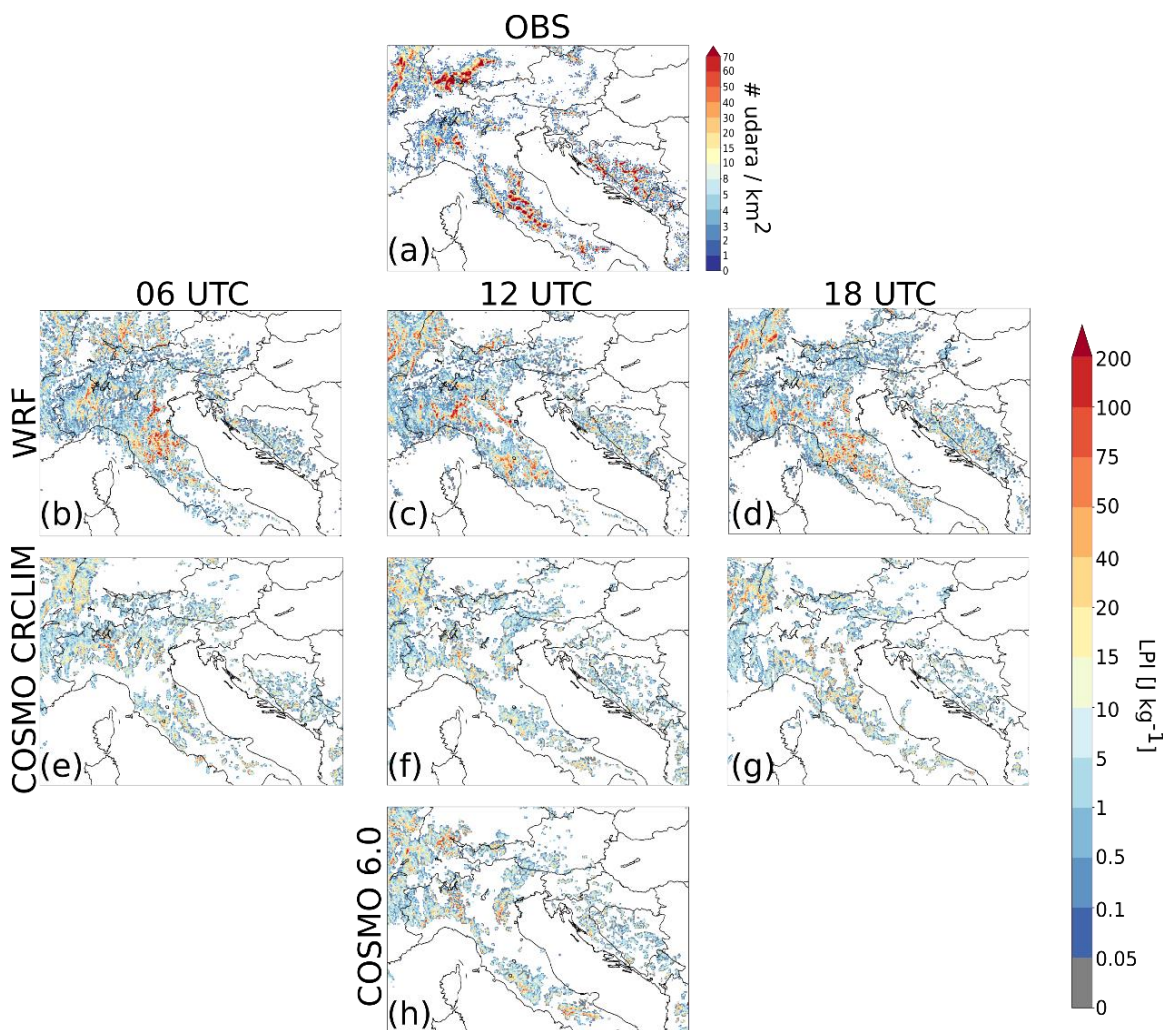




**Slika 3.25.** Akumulirana oborina za razdoblje između 00 i 24 UTC na dan 30. svibnja 2018. Od vrha do dna redovi prikazuju (a) mjerena IMERG i polja simulirana pomoću modela (b-d) WRF, (e-g) COSMO-crCLIM, (h) COSMO 6.0. Stupci s lijeva na desno predstavljaju simulacije inicijalizirane dan prije opažanja duboke konvekcije u 06, 12 i 18 UTC.

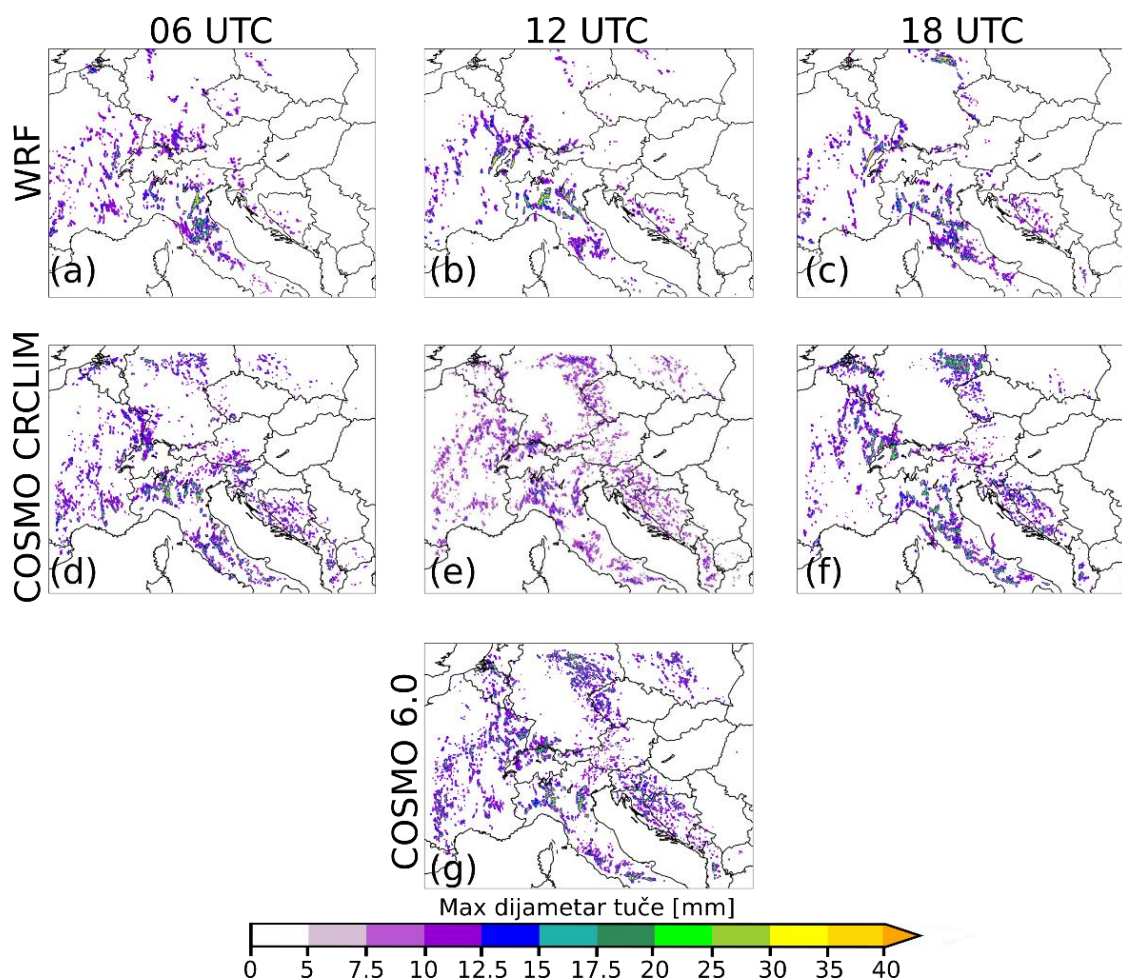
Nadalje, dnevni maksimumi LPI-ja koje proizvede svaki od članova ansambla uspoređuju se s dnevnim zbrojevima broja munja iz mreže LINET (Slika 3.26). Ovdje koristimo izvorni LPI umjesto prilagođenog LPI-a jer želimo provesti izravnu usporedbu simuliranih polja te izbjeći filtriranje signala. Jasno je da su oba modela prilično dobro reproducirala područje zahvaćeno munjama, iako model WRF daje veće vrijednosti LPI-a. Ovaj je zaključak u skladu s gornjim rezultatima za koje smo primijenili viši prag za WRF pri pretvorbi LPI-a u izmjereni broj udara munja. Iako razlike u LPI-u između članova

modela postoje, veće razlike postoje u rezultatima između dvaju modela. Moguće je da je to posljedica razlika u simulaciji konvekcije između dva modela, a ne interne varijabilnosti modela. Verzija modela COSMO 6.0 simulirala je LPI u skladu s verzijom modela COSMO-crCLIM-om, iako s nešto većim vrijednostima.



**Slika 3.26.** (a) Dnevna suma izmjerene broj udara munja pomoću mreže LINET mreže za razdoblje između 00 i 24 UTC na dan 30. svibnja 2018. Dnevni maksimum LPI-ja simuliran modelima (b-d) WRF (e-g) COSMO-crCLIM i (h) COSMO 6.0. Stupci predstavljaju simulacije inicijalizirane u 06, 12 i 18 UTC prethodnog dana.

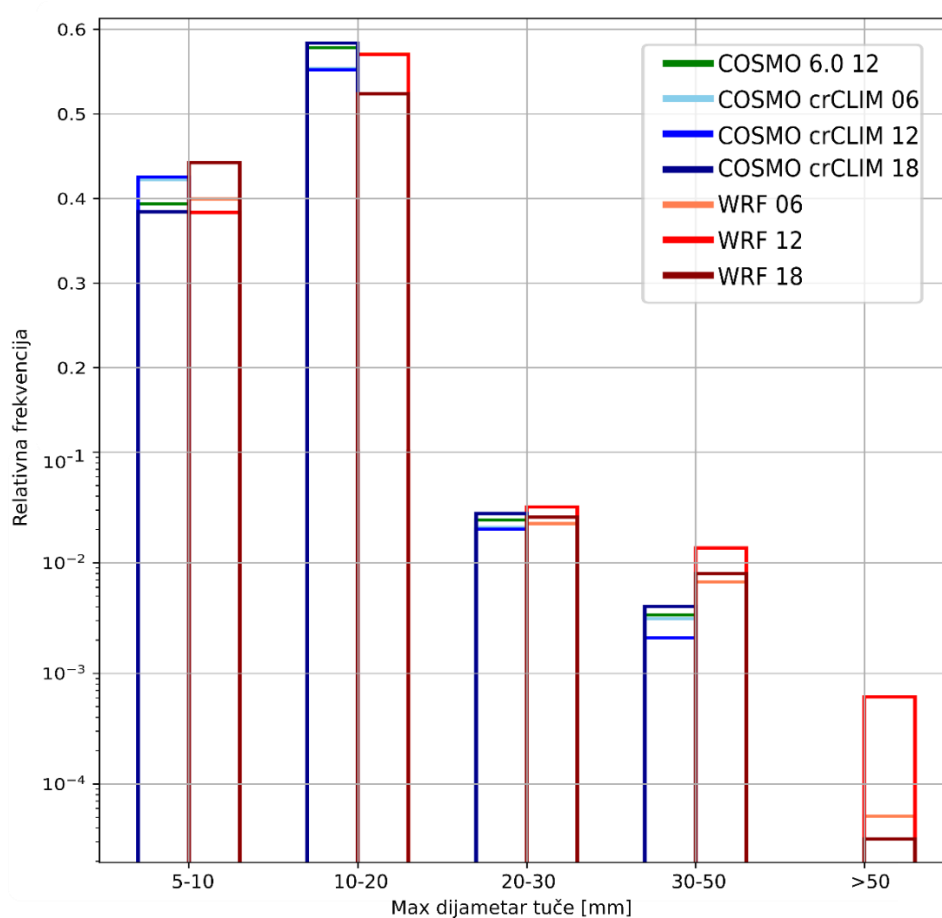
Usporedbom dnevnih maksimalnih promjera zrna tuče simuliranih članovima ansambla dolazi se do sličnih zaključaka. Slika 3.27 pokazuje da su simulirana polja općenito slična, iako model WRF daje manje tuče u usporedbi s COSMO-om bez obzira na vrijeme inicijalizacije. Obilježja tuče koju rekonstruira isti model, ali s različitim



**Slika 3.27.** Dnevni maksimum promjera zrna tuče za razdoblje između 00 i 24 UTC za dan 30. svibnja 2018. simuliran pomoću modela (a-c) WRF, (d-f) COSMO-crCLIM i (g) COSMO 6.0. Stupci predstavljaju simulacije pokrenute u 06, 12 i 18 UTC prethodnog dana.

vremenom inicijalizacije (06, 12 i 18 UTC) i različitim verzijama modela (COSMO-crCLIM i COSMO 6.0) međusobno su sličnija od obilježja tuče koju daju različiti modeli (WRF naspram COSMO). Dodatno, kada se uspoređuju simulirani maksimalni promjeri zrna tuče (Slika 3.28), primjećujemo da su, za zrna tuče manja od 30 mm, razlike između modela COSMO i WRF unutar interne varijabilnosti svakog modela. Međutim, za zrna tuče veće od 30 mm, ne samo da razlike između modela postaju veće od unutarnje varijabilnosti modela, već samo WRF simulira zrna tuče veće od 50 mm od svih članova ansambla. Ovo potvrđuje zaključak da model WRF daje više većih zrna tuče od COSMO-a (bez obzira na verziju modela).

Treba napomenuti da ovi zaključci vrijede samo za jedan slučaj, a budući da stupanj interne varijabilnosti ovisi o sinoptičkoj situaciji, konfiguraciji modela, području i sezoni (npr. Lavin-Gullon i sur., 2021.), trebalo bi analizirati više slučajeva kako bi se dobili robusniji zaključci. Usprkos tome, prikazani rezultati su ohrabrujući i pokazuju da se oluje s tučom iznad Alpsko-jadranske regiji mogu uspješno simulirati korištenjem modela na kilometarskoj skali. Varijabilnost rezultata između različitih modela i vremena inicijalizacije ukazuje na značaj i korist prilikom upotrebe multimodelskog ansambla pri simulaciji ovih događaja u kontekstu numeričke prognoze vremena.



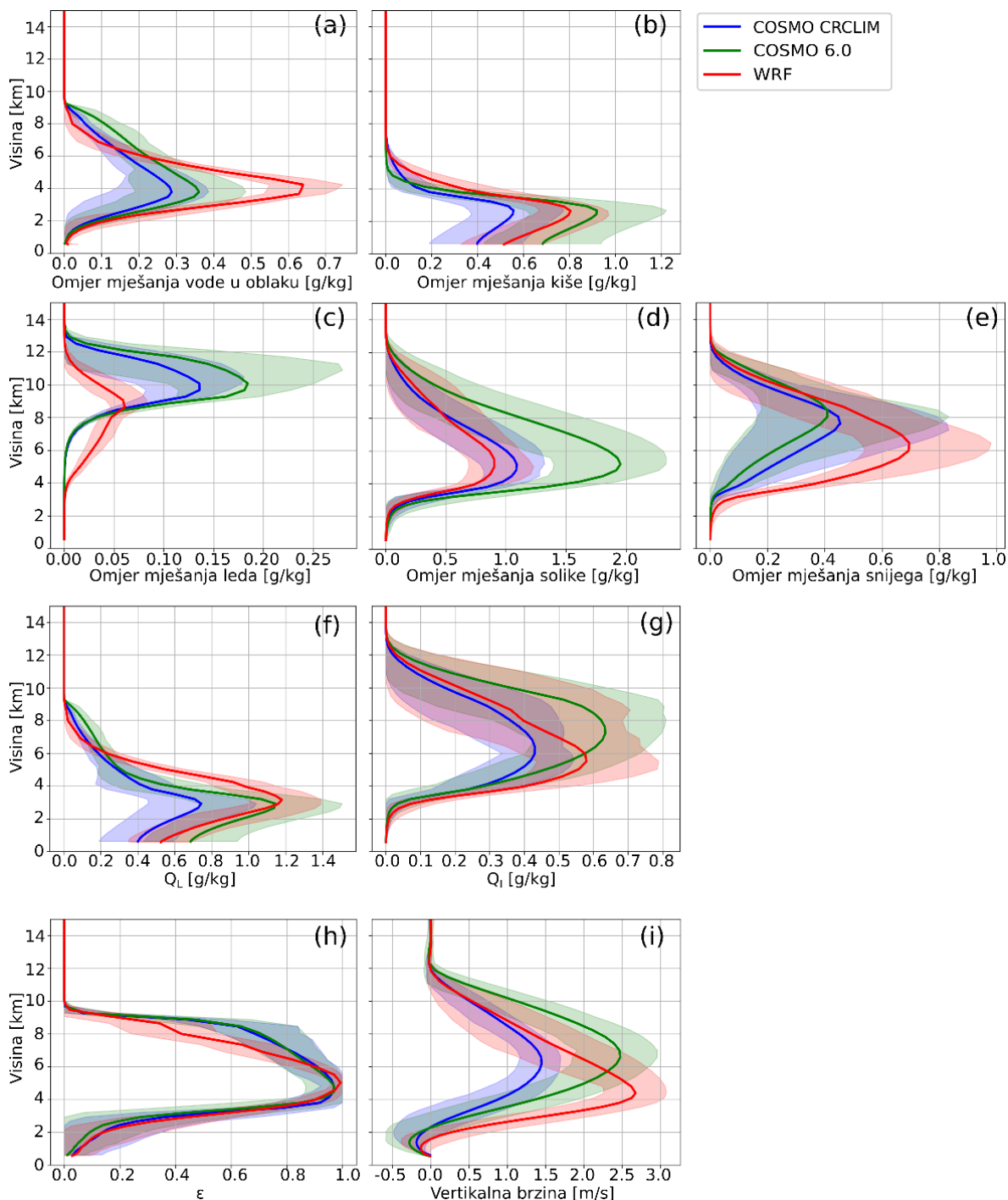
**Slika 3.28.** Relativna frekvencija simuliranih maksimalnih promjera zrna tuče u cijeloj domeni za modele COSMO-crCLIM inicijaliziran u 06, 12 i 18 UTC (nijanse plave), WRF inicijaliziran u 06, 12 i 18 UTC (nijanse crvene) i COSMO 6.0 inicijaliziran u 12 UTC (zeleno). Histogrami se normaliziraju dijeljenjem broja zrna tuče u svakoj kategoriji s ukupnim promatranim brojem zrna tuče. Kako bi se bolje prikazale razlike između modela, y-os je dijelom linearna, a dijelom logaritamska.



Nadalje, s obzirom na važnost uzlaznih gibanja, kao i krutih i tekućih hidrometeora kod pojave tuče i munja, uspoređeni su simulirani vertikalni profili ovih varijabli. Slika 3.29 prikazuje vertikalne profile usrednjene u vremenu i za točke mreže koje imaju LPI veći od 0 tijekom slučaja 30. svibnja 2018. Modeli su proračunali različite raspodjele krutih i tekućih hidrometeora unutar grmljavinskih oblaka. Naime, model WRF daje veće omjere miješanja vode u oblaku u usporedbi s obje verzije modela COSMO-a. Također WRF daje i veće omjere miješanja kiše u usporedbi s COSMO-crCLIM, ali niže omjere miješanja kiše u usporedbi s COSMO 6.0. Slično tome, obje verzije COSMO-a simuliraju veće omjere miješanja leda i solike, ali niže omjere miješanja snijega. Budući da je u formulaciji LPI-ja omjer između krutih i tekućih hidrometeora unutar grmljavinskog oblaka važniji od njihovih točnih vrijednosti, izračunati su i izrazi omjera frakcijske tekuće vode i leda iz formulacije LPI-ja (izrazi  $Q_L$  i  $Q_I$  iz jednadžbe 2.2 i 2.3) te bezdimenzionalni parametar  $\varepsilon$  koji predstavlja faktor skaliranja uzlaznog strujanja (jednadžba 2.1). Parametar  $\varepsilon$  poprima maksimalne vrijednosti kada su frakcijski omjeri miješanja ukupne tekuće vode i leda jednaki (jednadžba 2.2). Dobiveni vertikalni profil parametra  $\varepsilon$  ne pokazuje vidljiva odstupanja između modela, iako postoje neke razlike u parametrima  $Q_L$  i  $Q_I$ . Također postoji razlika u simuliranim uzlaznim strujanjima, tj. obje COSMO verzije simuliraju u prosjeku slabiju uzlaznu jezgru strujanja (engl. *updraft core*) u odnosu na model WRF. Model WRF simulira jača uzlazna strujanja s jezgrom uzlaznog strujanja točno na poziciji maksimalne vrijednosti parametra  $\varepsilon$  koja se podudara s područjem s gotovo jednakim količinama krutih i tekućih hidrometeora. Budući da je prisutnost krutih i tekućih hidrometeora važna za procese stvaranja munja i tuče, nije iznenađujuće da WRF simulira veći LPI i više velikih zrna tuče u usporedbi s COSMO-om. S druge strane, uzlazna jezgra u obje verzije COSMO-a nalazi se u području s mnogo više krutih nego tekućih hidrometeora što nije toliko povoljno za procese formacije munja ili tuče. To bi mogao biti razlog zašto model COSMO simulira niže vrijednosti LPI-ja i veće količine manjih zrna tuče. Verzija modela COSMO 6.0 simulira jače uzlazne jezgre u usporedbi s verzijom COSMO-crCLIM-om. Uočena razlika najvjerojatniji je razlog zašto COSMO 6.0 proizvodi nešto veće vrijednosti LPI-ja od COSMO-crCLIM-a (Slika 3.26) i skloniji je reprodukciji nešto većih zrna tuče u usporedbi s COSMO-crCLIM-om (Slika 3.28).

Nekoliko je studija izvijestilo o osjetljivosti varijabli povezanih s tučom i munjama, kao što su uzlazno strujanje i omjeri miješanja solike, na izbor sheme parametrizacije mikrofizike (Lagasio i sur., 2017.; Trefalt i sur., 2018.; Manzato i sur., 2020.; Sokol i Minářová, 2020.; Raupach i sur., 2021.), te forsiranja velike skale i vremena inicijalizacije (Manzato i sur., 2020.). Dakle, različiti modeli s različitim konfiguracijama mogu

proizvesti veliku varijabilnost za različite slučajeve. Ovo potiče, odnosno naglašava upotrebu multimodelskog i/ili multifizičkog ansambla za analizu ili prognozu takvih događaja, ali i za istraživanje odgovora takvih događaja u uvjetima toplije atmosfere u budućnosti.



**Slika 3.29.** Vertikalni profili omjera miješanja (a) vode unutar oblaka i (b) kiše; (c) leda, (d) solike i (e) snijega; (f) ukupne tekuće vode i (g) frakcijskog omjera miješanja leda; (h) parametara skaliranja uzlazne struje te (i) okomite brzine simulirane modelima COSMO-crCLIM (plavo), COSMO 6.0 (zeleno) i WRF (crveno). Crte označavaju srednje vrijednosti u svim točkama mreže s LPI > 0, dok sjenčanje označava raspon između 5. i 95. percentila.

Razlike u intenzitetu uzlaznog strujanja i strukturi uzlaznog strujanja snažno ovise o dinamičkoj jezgri modela (tj. odabiru numeričkih shema i numeričkog raspisa jednadžbi). Takve razlike mogu se objektivno procijeniti pomoću spektra kinetičke energije (Skamarock, 2004.). Iako oba promatrana modela imaju slične dinamičke jezgre koristeći *split-explicit* pristup, postoje značajne razlike u pogledu shema advekcije. Uloga postavki modela u uspješnosti simulacije jake ljetne konvekcije nad Europom nedavno je istražena u međusobnoj usporedbi modela COSMO i ECMWF-IFS (Zeman i sur., 2021.). Rezultati su otkrili značajnu osjetljivost rezultata s obzirom na dinamičku jezgru (*split-eksplicitna* naspram spektralne), ali i s obzirom na veličinu vremenskog koraka, kao i (eksplicitnu ili implicitnu) numeričku difuziju.

### 3.2.7. Sažetak rezultata

Tuča i munje, štetne i relativno česte pojave nad Alpsko-jadranskim područjem, još uvijek predstavljaju izazovan fenomen za modeliranje. Ova analiza koristila je dva modela na kilometarskoj skali, COSMO i WRF, s dijagnostikama za tuču (HAILCAST) i munje (LPI) za simulaciju osam intenzivnih konvektivnih događaja koji su se javili nad Alpsko-jadranskom regijom. Glavni cilj bio je analizirati robusnost rezultata algoritama HAILCAST i LPI iz dva različita združena modelska sustava. Pritom je bilo potrebno istražiti njihove razlike te sustavno i kvantitativno ocijeniti uspješnost svakog modela. Glavni zaključci ove analize mogu se sažeti kako slijedi:

- Oba modela su reproducirala opažene prostorne značajke i količine oborine, ali model WRF je češće davao nešto niže količine oborine nego model COSMO. Štoviše, vremenski razvoj oborine u većini je slučaja dobro simuliran.
- Oba modelska sustava uspješna su u reprodukciji promatrane aktivnosti munja unatoč tome što je model WRF simulirao veće vrijednosti LPI.
- Simulirana prostorna obilježja tuče koje su reproducirala oba tipa modela općenito su slične, ali je utvrđeno da model COSMO češće simulira više tuče nego model WRF. Oba modela uspješna su u reprodukciji tuče opažene radarima u Švicarskoj i mjerenjima tučomjerima u Hrvatskoj, iako je model COSMO imao nešto bolje rezultate od WRF-a. Štoviše, oba modela su u prosjeku precijenila opažene maksimalne promjere zrna tuče. Uočeno je da model WRF češće daje veća zrna tuče u usporedbi s modelom COSMO, što se pripisuje razlikama u strukturama modela.

Nadalje, analizirano je moguće podrijetlo razlika između modela i njihova interna varijabilnost korištenjem ansambla simulacija za jedan slučaj s različitim vremenima inicijalizacije (06, 12, 18 UTC). Ansamblu je dodana i simulacija inicijalizirana u 12 UTC izvedena s najnovijom verzijom COSMO-a, COSMO 6.0. Rezultati za oborinu, munje i tuču općenito su slični, ali postoje razlike ovisno o vremenu inicijalizacije i tipu/verziji modela. Model WRF češće simulira manje količine oborine i manju površinu zahvaćenu tučom. Veće vrijednosti LPI i veći broj velikih zrna tuče prisutne su bez obzira na vrijeme inicijalizacije. Pažljivom analizom najvažnijih varijabli za formiranje tuče i munja, uzlaznih brzina i omjera miješanja hidrometeora, otkriveno je da analizirani modeli proizvode, u prosjeku, različite raspodjele uzlaznih struja, krutih i tekućih hidrometeora unutar grmljavinskih oblaka koje bi se mogle povezati s razlikama u strukturi modela.

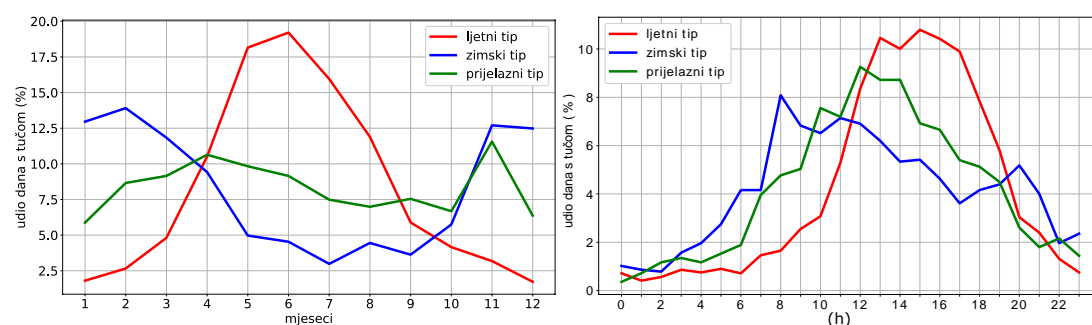
Zaključno, pokazano je da su atmosferski uvjeti koji dovode do stvaranja i razvoja oluja s tučom dobro simulirani korištenjem modela s velikom razlučivošću. Štoviše, dijagnostički alati kao što su HAILCAST i LPI imaju veliki potencijal za prognozu u stvarnom vremenu. Njihova upotreba može biti značajna i u klimatološkoj procjeni tuče i munja u sadašnjim i budućim klimatskim uvjetima. Međutim, varijabilnost rezultata ovisno o korištenom modelu naglašava te potiče upotrebu višemodelnog i/ili višefizičkog ansambla pri modeliranju takvih događaja. Nadalje, odstupanja u prostornoj pokrivenosti i intenzitetu simulirane tuče i munja otvaraju prostor za dodatna poboljšanja algoritama HAILCAST i LPI. Specifično, detaljno testiranje pragova aktivacije oba algoritma moglo bi dovesti do boljih rezultata. S druge strane, poboljšanje u reprezentaciji mikrofizičkih i dinamičkih procesa atmosferskih modela rezultiralo bi realističnijim dinamičkim i mikrofizičkim poljima koja predstavljaju glavne ulazne informacije za HAILCAST i LPI algoritme. Dodatno, u operativnom okruženju, asimilacija podataka mogla bi dodatno poboljšati prediktabilnost takvih ekstremnih događaja. Unatoč obećavajućim rezultatima, treba napomenuti da se ova analiza temelji na malom broju slučajeva. Da bi se dobili statistički robusniji zaključci potrebno je analizirati veći broj oluja s tučom. Osim toga korištenje drugih izvora podataka opažanja tuče koji pokrivaju cijelu Alpsko-jadransku regiju također bi dopustilo donošenje novih ili potvrđivanje ovdje iznesenih zaključaka. Unatoč tome, ova analiza predstavlja prvi pokušaj sustavnog istraživanja i evaluacije uspješnosti dva suštinski različita modela na kilometarskoj skali za reprodukciju glavnih obilježja oluja s tučom koje se javljaju u Alpsko-jadranskoj regiji.



### 3.3. Analiza ranojutarnje konvekcije nad Istrom

#### 3.3.1. Odabrani slučajevi tuče

Kao što je prikazano u prethodnim poglavljima, ali i u različitim dosadašnjim prognostičkim i klimatološkim studijama, Jadran je često pod utjecajem olujnog nevremena koje uključuje pojavu tuče, posebice njegov sjeverni dio (npr. Blašković i sur., 2023.; Jelić, 2022.; Mikuš i sur., 2015.; Renko i sur., 2018.). Kako su po prvi puta nedavno izrađene klimatološke analize pojave tuče za čitavu Hrvatsku, bilo je moguće uočiti različitosti između godišnjih i dnevnih hodova dana s tučom između obale i unutrašnjosti (Slika 3.30) (detalji te analize mogu se naći u Jelić (2020.) i Blašković i sur. (2023.)). Između ostalog spomenute studije ukazale su na relativno učestalu ranojutarnju tuču na određenim dijelovima hrvatske obale koje se ne bilježe na postajama u unutrašnjosti. Navedeni ranojutarnji događaji često pridonose lokalnom obalnom maksimumu dnevne aktivnosti (Slika 3.30) uočenom oko 08 sati po lokalnom vremenu (CET) (Jelić i sur., 2020.; Blašković i sur., 2023.). Dok se poslijepodnevni maksimum aktivnosti tuče (osobito u unutrašnjosti) mogu pripisati dnevnom ciklusu zagrijavanja kopna, mehanizmi odgovorni za pojavu ranojutarnjeg maksimuma aktivnosti tuče još su nepoznati. Nesigurnost u pogledu mehanizama povezanih s ranojutarnjom pojavom tuče proizlazi iz ograničene dostupnosti mjerenja i opažanja, ali i nedostatka numeričkih simulacija kilometarske rezolucije ovakvih događaja. Posljedično, navedena ograničenja dodatno smanjuju sposobnost prognoze ranojutarnje tuče nad hrvatskom obalom.



**Slika 3.30** Godišnji (a) i dnevni (b) hod tuče za tri tipa postaja u Hrvatskoj. 'Ljetni' tip postaje je prikazan crvenom krivuljom i najviše se nalazi u unutrašnjosti Hrvatske, 'prijelazni' tip zelenom te 'zimski' tip postaje koje dolaze uglavnom s obale plavom krivuljom. Svaki od tipova normaliziran je s ukupnim brojem dana s tučom u tipu te je na y-osi prikazan postotni udio dana u (a) odnosno sata u (b) s tučom za svaki mjesec. Preuzeto iz Jelić i sur. (2022.).

Potaknuti obećavajućim rezultatima povezanim s korištenjem alata kao što su HAILCAST i LPI u numeričkom modeliranju na km-skali, ovaj dio istraživanja ima za cilj ispitati nastajanje i evoluciju ranojutarnjih oluja s tučom koje se pojavljuju duž hrvatske obale s posebnim naglaskom na područje Istre. Poseban je fokus na dekompoziciji skala strujanja odnosno ulozu koju sinoptički, mezoskalni, ali i lokalni uvjeti poput orografije ili oblika obale, imaju u stvaranju procesa odgovornih za pojavu tuče.

Nekoliko slučajeva ranojutarnje tuče odabrano je za simulacije WRF modelom uz korištenje HAILCAST i LPI. Ciljevi ovog dijela istraživanja mogu se sažeti na sljedeći način:

- U kojoj mjeri model WRF može reproducirati opažene karakteristike konvekcije te dijagnosticirati pojavu tuče i munja?
- Koji su sinoptički, mezoskalni i lokalni uvjeti povezani s pojavom ranojutarnje tuče u obalnom području?

Radi odabira slučajeva za simuliranje radila se selekcija događaja tuče za područje Istre u tri koraka. Prvo su se iz skupa podataka o tuči izdvojili dani s ranojutarnjom tučom. Ranojutarnja tuča definirana je kao tuča koja je zabilježena na bilo kojoj meteorološkoj postaji unutar Istre tijekom sedam sati; točnije od 04 CET do 10 CET. Nadalje, s obzirom na ograničen set podataka o mjerenim munjama iz mreže LINET, uzimani su u obzir samo događaji tuče u razdoblju od početka 2008. godine do kraja 2019. godine. Treći kriterij selekcije se odnosio na tip vremena. U već spomenutom radu Blašković i sur. (2023.) provedena je analiza tipova vremena povezanih s pojavom tuče u Hrvatskoj. Ovdje je analiza tipova vremena ponovljena s uvjetom da se promatra samo ranojutarnja tuča iznad Istre. Sama metodologija određivanja tipova vremena detaljno je prikazana u Jelić i sur. (2020.) te Blašković i sur. (2023). Rezultati analize vremenskih tipova ukazali su na činjenicu da se ranojutarnja tuča u odabranom razdoblju povezuje uglavnom s ciklonalnim sustavima (Tablica 3.5). Prilikom najučestalijeg tipa vremena, Istra je pod utjecajem donje strane ciklone, zatim slijedi prednja strana ciklone i konačno gornja strana ciklone. Od svih slučajeva ranojutarnje tuče nad Istrom, samo dva slučaja u razdoblju selekcije povezana su s anticiklonalnim tipom vremena i to gornja i donja strana anticiklone.

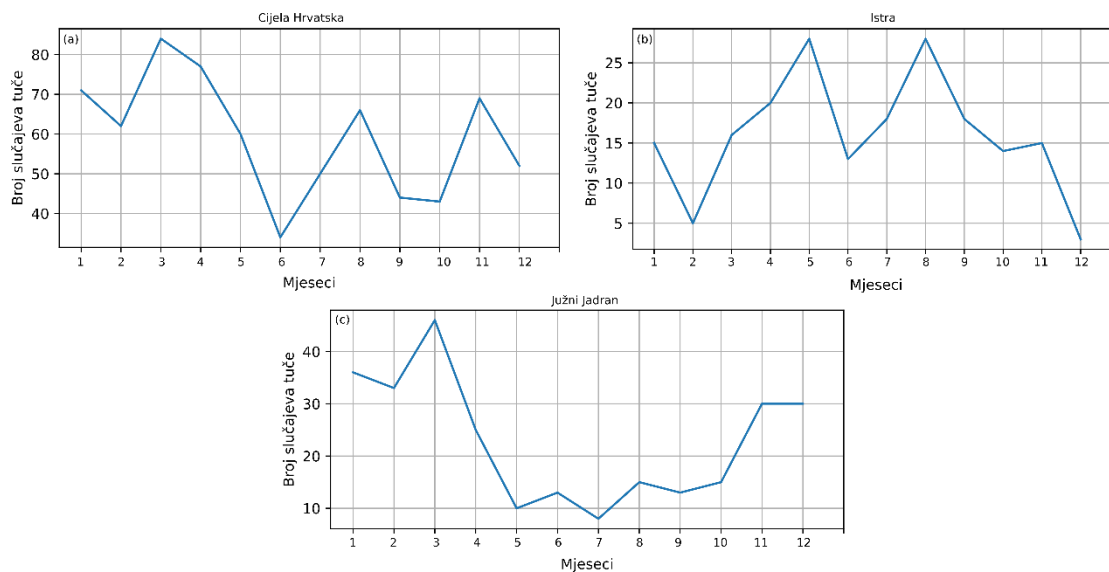
Na temelju navedenog, analiza tipova vremena otkrila je koji su sinoptički uvjeti prisutni tijekom ranojutarnje tuče, ali je pružila i obrazac za konačan odabir slučajeva tuče za simulacije. Stoga su odabrana tri slučaja tuče koji odgovaraju najučestalijim vremenskim tipovima – donja, prednja i gornja strana ciklone odnosno odabrani su

slučajevi 31. svibnja 2010., 02. svibnja 2014. te 13 kolovoza 2010. Postaje na kojima je opažena tuča i vrijeme pojave tuče naznačeni su na Slikama 3.38; 3.44; 3.50.

**Tablica 3.5.** Tipovi vremena povezani s pojavom ranojutarnje tuče iznad Istre. Naznačeni su broj događaja koji odgovara pojedinom tipu vremena te slučajevi tuče odabrani za simulaciju.

<b>Tip vremena</b>	<b>Broj događaja tuče</b>	<b>Odabrano za simulaciju</b>
<b>Prednja strana ciklone</b>	7	Da, 02.05.2014.
<b>Gornja strana ciklone</b>	2	Da, 13.08.2010.
<b>Stražnja strana ciklone</b>	1	Ne
<b>Donja strana ciklone</b>	10	Da, 31.05.2010.
<b>Gornja strana anticiklone</b>	1	Ne
<b>Donja strana anticiklone</b>	1	Ne

Općenito, raspodjela pojave ranojutarnje tuče u Hrvatskoj, Istri i južnom Jadranu (Slika 3.31) uzimajući u obzir opažanja tuče na meteorološkim postajama diljem Hrvatske (Blašković i sur., 2023.) otkriva tri lokalna maksimuma pojave ranojutarnje tuče gledajući cijelo područje Hrvatske – ožujak, kolovoz i studeni. Ipak, glavnina aktivnosti ranojutarnje tuče u Istri odvija se tijekom toplog dijela godine – od ožujka do listopada s lokalnim maksimumima u svibnju i kolovozu. Na samom jugu Hrvatske glavnina aktivnosti ranojutarnje tuče povezana je s hladnim dijelom godine s lokalnim maksimumom u ožujku. Prema tome, godišnji hodovi ranojutarnje tuče u skladu su s godišnjim hodovima tuče za ljetni, zimski i prijelazni tip postaje prikazan na Slici 3.30.



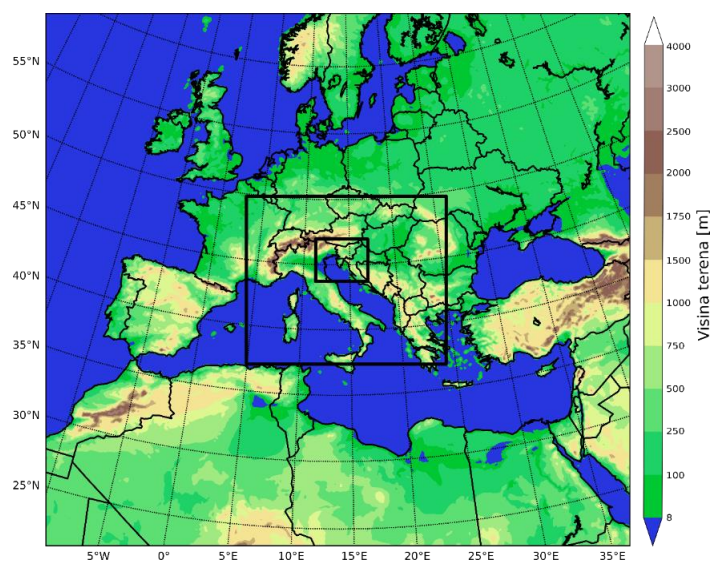
**Slika 3.31** Godišnji hod pojave ranojutarnje tuče uzimajući u obzir postaje iz (a) cijele Hrvatske, (b) Istre i (c) područja južnog Jadrana koje obuhvaća Splitsko-dalmatinsku i Dubrovačko-neretvansku županiju. Prikazan je broj slučajeva tuče po mjesecima uzimajući u obzir bazu podataka o pojavi tuče preuzetu iz Blašković i sur. (2023.).

### 3.3.2. Postavke simulacija

Odabrane oluje s tučom simulirane su korištenjem modela WRF (verzija 4.1.5) (Skamarock i sur., 2019.) uz uključivanje algoritama HAILCAST i LPI. Simulirane su tri jednosmjerno ugniježdene domene s horizontalnim koracima mreže od 9, 3 i 1 km i 97 vertikalnih razina (Slika 3.32). Vremenski korak u modelu WRF postavljen je redom na 40 s i 13.33 s za svaku domenu. Za početne i rubne uvjete korištena je analiza ECMWF IFS modela, a simulacije su inicijalizirane u 12 UTC prethodnog dana prije opažanja tuče.

Koraci mreže od 3 i 1 km omogućuju eksplicitno simuliranje mnogih konvektivnih procesa (Kain i sur., 2006., 2008.), pa se stoga u unutarnjim domenama ne primjenjuje konvektivna parametrizacijska shema. U vanjskoj domeni s korakom mreže od 9 km, konvekcija je parametrizirana pomoću Kain-Fritsch sheme (Kain i Kain, 2004.). Ostale korištene parametrizacijske opcije uključuju RRTM shemu (Mlawer i sur., 1997.) za dugovalno zračenje i Dudhia shemu (Dudhia, 1989.) za kratkovalno zračenje, MYNN2.5 (Nakanishi i Niino, 2006.) shemu za parametrizacija atmosferskog graničnog sloja i WSM6 mikrofizičku shemu (Hong i Lim, 2006.). Ove postavke usporedive su s onima opisanima u poglavlju 3.1.

Za dijagnozu tuče i munja korištene su HAILCAST i LPI dijagnostike. Proračun LPI-ja se odvija svakih 15 min, dok se HAILCAST aktivira svakih 5 min.



**Slika 3.32.** Položaj jednosmjerno ugniježđenih domena s horizontalnim koracima mreže od 9, 3 i 1 km (pravokutnici) koji se koriste za simulacije modelom WRF. Sjenčanje označava visinu terena.

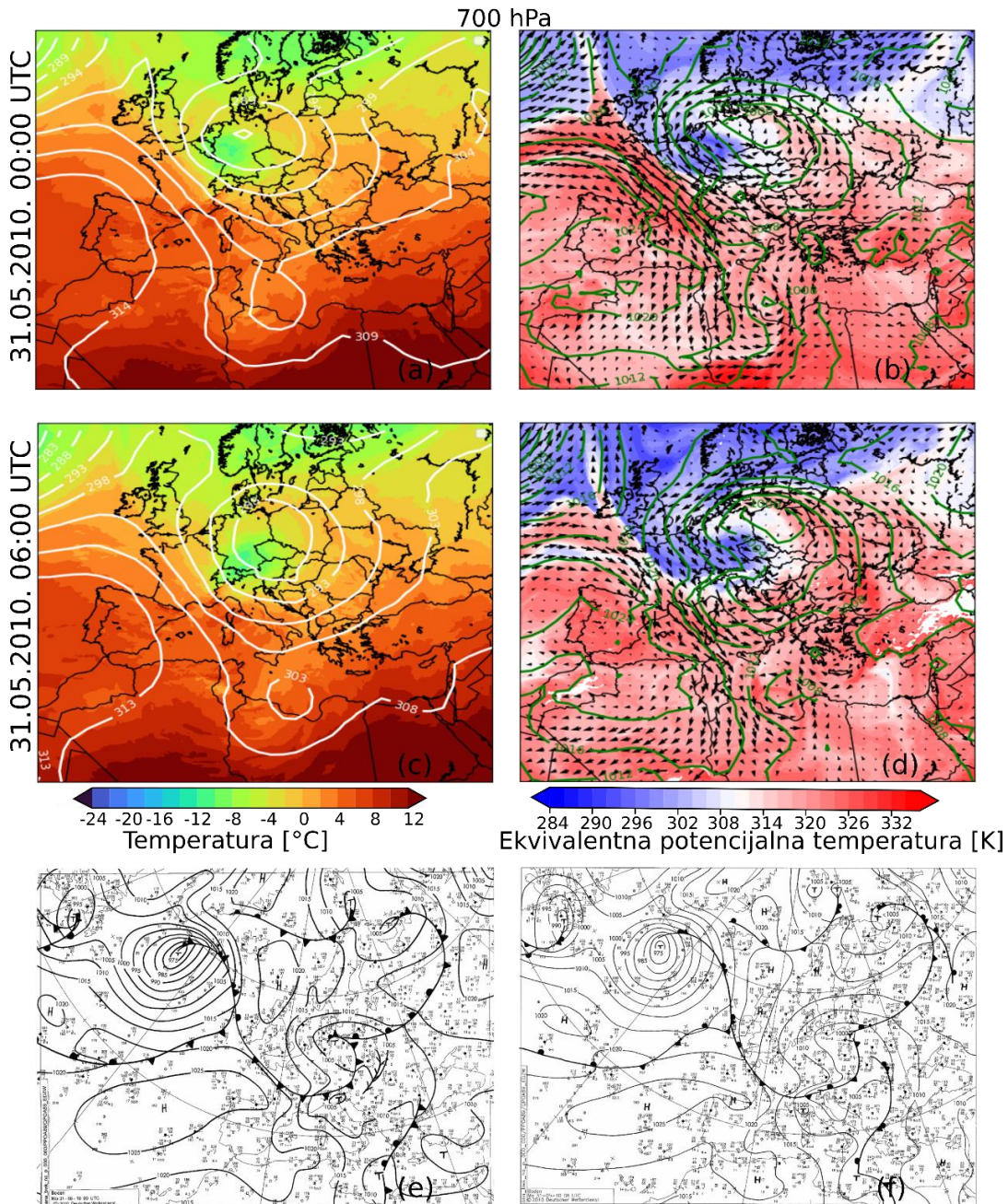
### 3.3.3. Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja 31. svibnja 2010.

Sinoptička situacija tijekom 31. svibnja 2010. pod jakim je utjecajem duboke ciklone iznad središnje Europe. Ona je pak povezana s dubokom visinskom dolinom koja se premješta preko Hrvatske i spušta do obala sjeverne Afrike (Slika 3.33). Prilikom toga se uočava premještanje hladne fronte prema jugoistoku kontinenta uz zapadno do sjeverozapadno visinsko strujanje nad područjem od interesa donoseći vlažan i relativno nestabilan zrak (Slika 3.33 b, d).

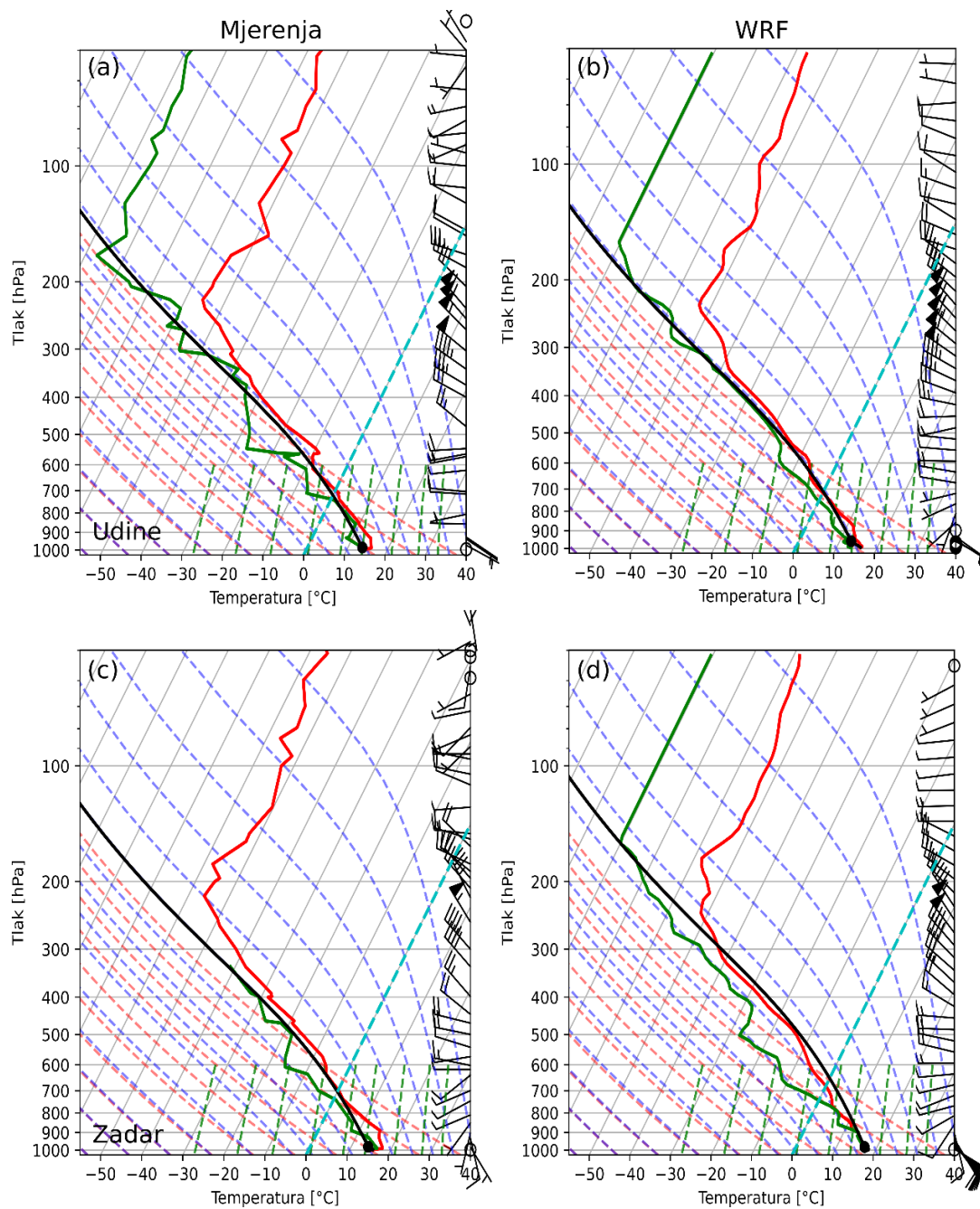
Vertikalni profil atmosfere nad Udinama (Slika 3.34) ukazuje na zapadno, sjeverozapadno visinsko strujanje s izraženim zakretanjem vjetra po visini, od jugoistočnih smjerova vjetra pri tlu do zapadnih smjerova iznad 850 hPa. Dakle, postoji izraženo smicanje vjetra u prvih 6, odnosno 10 km iznad tla. Na visinama između 850 i 750 hPa postoji mala razlika između temperature zraka i temperature rosišta stoga ovdje dolazi do stvaranja niskih kumulusnih oblaka. Dodatno, na visini oko 350 hPa dolazi do stvaranja i visokih cirusnih oblaka. Vrijednost K indeksa (dodatak D) ukazuje na potencijal razvoja mjestimičnih (engl. *scattered*) kumulusnih čelija ( $KI = 27.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ), dok ostali termodinamički indeksi ukazuju na slab potencijal za razvoj duboke konvekcije ( $CAPE = 13.2 \text{ J kg}^{-1}$  i  $LI = 2.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Jači potencijal za razvoj konvektivne aktivnosti vidljiv je na vertikalnom profilu atmosfere iznad Zadra ( $CAPE = 389.4 \text{ J kg}^{-1}$ ,  $KI = 29.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $LI = -1.8$



°C). Slično kao i kod Udina, vertikalni profil u Zadru ukazuje na značajno smicanje i brzine te smjera vjetra u prvih 6 km atmosfere;  $24 \text{ m s}^{-1}$  za Udine i  $16 \text{ m s}^{-1}$  za Zadar što pogoduje organizaciji konvekcije.



**Slika 3.33.** Sinoptički uvjeti za odabrani slučaj 31. svibnja 2020. (a, c) geopotencijalna visina (gpdam) apsolutne topografije izobarne plohe 700 hPa, AT700 hPa, i temperatura zraka (°C) na izobarnoj plohi 700 hPa, 31. svibnja 2010. u (a) 00 UTC (c) 06 UTC. Ekvivalentna potencijalna temperatura na 700 hPa izobarnoj plohi, vjetar na 700 hPa izobarnoj plohi te tlak na srednjoj morskoj razini, 31. svibnja 2010. u (b) 00 UTC (d) 06 UTC. Prizemna dijagnostička analiza za 31. svibnja 2010. u (e) 00 UTC i (f) 06 UTC (Izvor: [www1.wetter3.de](http://www1.wetter3.de)).

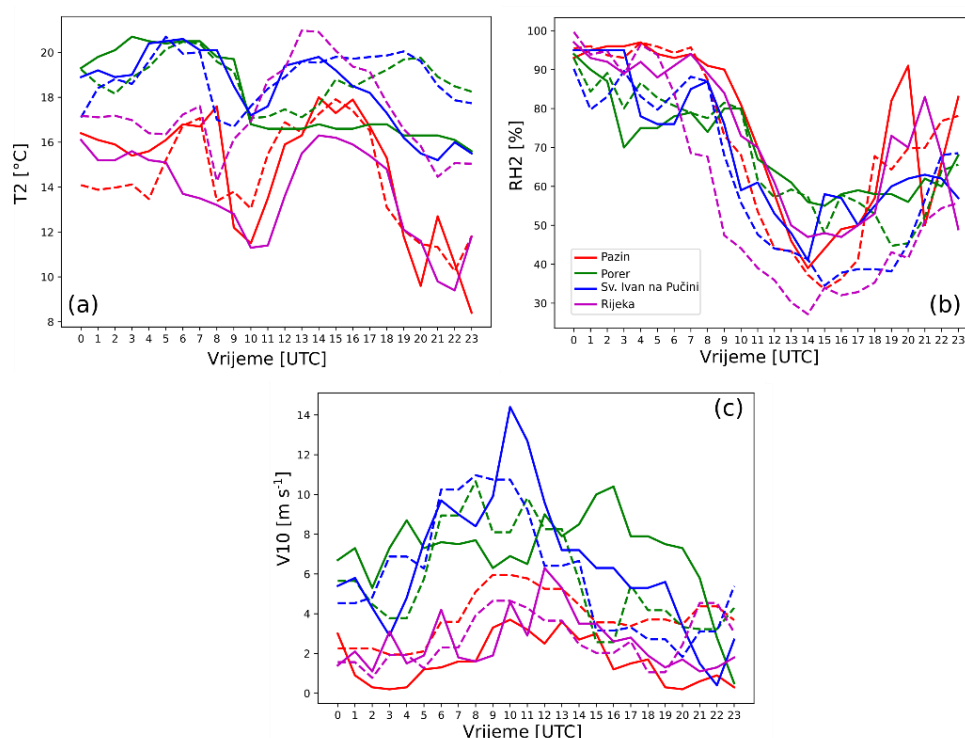


**Slika 3.34.** Vertikalni profili atmosfere u 00 UTC, 31. svibnja 2010. dobiven (a, c) radiosondažnim mjerenjima nad Udinama (a) i Zadrom (c) te (b, d) simuliran modelom WRF nad Udinama (b) i nad Zadrom (d). Crvena linija predstavlja vertikalni profil temperature, zelena linija predstavlja vertikalni profil temperature rosišta. Crna linija predstavlja vertikalnu putanju prizemne nezasićene česti zraka.

Uspoređujući simulirani i vertikalni profil atmosfere, može se zaključiti da je model uspješan u reprodukciji prekonvektivnih uvjeta prisutnih u Zadru i Udinama 31. svibnja 2010. u 00 UTC. Simulacije izmjenenog profila temperature zraka i temperature rosišta, ali i režim vertikalnog profila brzine i smjera vjetra u dobrom su slaganju.

Međutim, valja napomenuti kako model nije uspio reproducirati izmjerene vertikalni profil temperature u Zadru u donjim slojevima atmosfere koji ukazuje na prisutnost temperaturne inverzije kao ni suše područje u srednjoj troposferi u Udinama.

Dalje su uspoređene simulirane i izmjerene satne vrijednosti temperature i relativne vlažnosti na 2 m te satnih srednjaka vjetra na četiri postaje na širem području Istre i Kvarnera – Pazin, Porer (svjetionik na otočiću u blizini Pule), Sv. Ivan na Pučini (svjetionik na otočiću u blizini Rovinja) i Rijeka (Slika 3.35). Tijekom noćnih i ranojutarnjih sati u prizemnim slojevima, kao rezultat pretežito jugozapadnog strujanja nad ovim područjem, uočava se prisutnost toplog i vlažnog zraka. Tijekom jutarnjih sati uočava se pad temperature zraka i relativne vlažnosti uz povećanje brzine vjetra. Uspoređujući simulirane i izmjerene vrijednosti ovih veličina, vidimo generalno dobro slaganje između simuliranih i izmjerenih vrijednosti, iako određena odstupanja postoje. Najizraženije odstupanje vidljivo je u vrijednostima temperature zraka na postaji Rijeka gdje se u popodnevним satima uočava razlika između simuliranih i mjenjenih vrijednosti i do 5 °C. Ova razlika vidljiva je i u vrijednostima relativne vlažnosti (do 20 %).



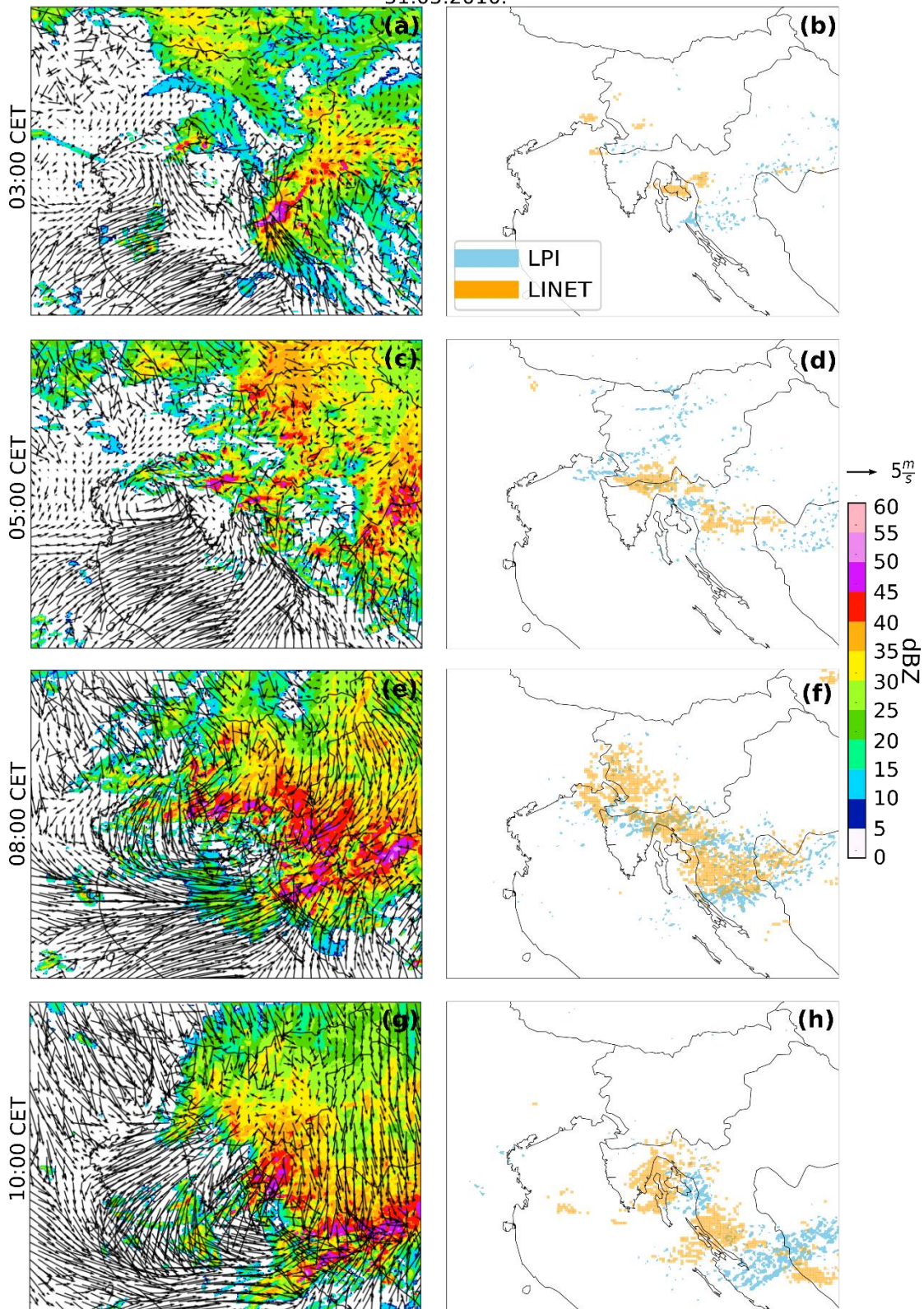
**Slika 3.35.** Simulirane (isprekidane linije) i izmjerene (pune linije) satne vrijednosti (a) temperature na 2 m, (b) relativne vlažnosti na 2 m i (c) satnih srednjaka vjetra na 10 m visine iznad tla na četiri meteorološke postaje: Pazin, Porer, Sv. Ivan na Pučini i Rijeka (boje) iz područja Istre i Kvarnera tijekom 31. svibnja 2010.



Prema modeliranim poljima, tijekom 30. svibnja 2010. u popodnevnim satima nad područjem od interesa dominira južni do jugozapadni vjetar donoseći topao i vlažan zrak sa Sredozemlja (nije prikazano). Sljedeći sati okarakterizirani su približavanjem hladne fronte sa sjeverozapada i zakretanjem vjetra prema sjevernim smjerovima na području obale sjevernog Jadrana. Strujanja sjevernih smjerova donose relativno hladan zrak te stvaraju s nasuprotnim južnim strujanjem zonu konvergencije nad morem što pogoduje lakšem dizanju zraka i stvaranju konvektivnih ćelija. Od ponoći 31. svibnja 2010. nastaje nekoliko serija konvektivnih sustava koji prelaze područje od interesa. Kulminacija nastaje nakon 03 CET kada se pod utjecajem jugozapadne i sjeveroistočne struje zatvara mezociklona nad sjeveroistočnom obalom Italije (Slika 3.36). Tada se mezociklona premješta istočno, na područje Istre stvarajući seriju konvektivnih ćelija čije maksimalne vrijednosti radarskog odziva premašuju 50 dBZ ukazujući na potencijal za stvaranje i pojavu tuče. Prelaskom preko Istre, mezociklona se premješta jugozapadno, preko Kvarnera.

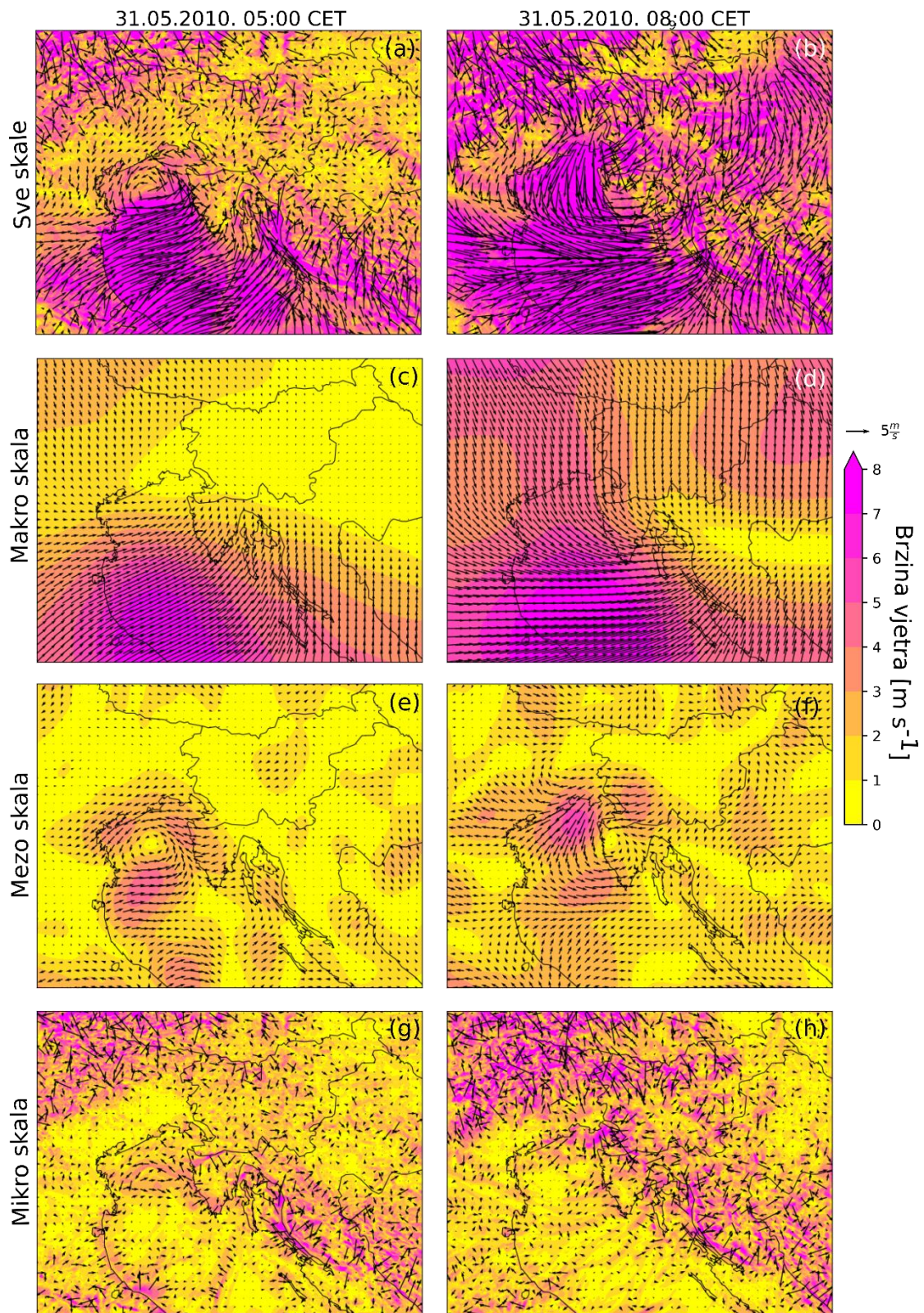
Uspoređujući simulirani i izmjereni trag aktivnosti munja, možemo zaključiti da je model reproducirao opaženu evoluciju konvekcije uz određena lokalna odstupanja. Reprodukcijska opažene konvekcije omogućila je provedbu dekompozicije skala koristeći Barnesov filter (Poglavlje 2.4) čime je u ukupnom polju vjetra istaknuta pristunost makro, mezo i mikro skale (Slika 3.37). Dekompozicija skala dodatno ističe uvjete povezane sa sinoptičkom, mezo i lokalnom skalom koji pogoduju nastanku konvektivnih ćelija. Slika 3.36 jasno prikazuje strukturu strujanja unutar mezociklone i to sjeverne struje zraka koja donosi hladan relativno nestabilan zrak nad toplu i vlažnu podlogu te zapadno-jugozapadnu struju koja donosi topao i vlažan zrak sa Sredozemlja. Ciklona se tijekom sljedećih sati premješta prema jugoistoku, prelazi područje Istre te se spušta na područje Kvarnera. Prelazak ciklone preko područja od interesa prati razvoj jake bure, vidljive osobito u područjima mlazeva bure u Tršćanskom zaljevu. Prolaskom fronte i jačanjem bure konvektivna aktivnosti nad Istrom zamire.

31.05.2010.

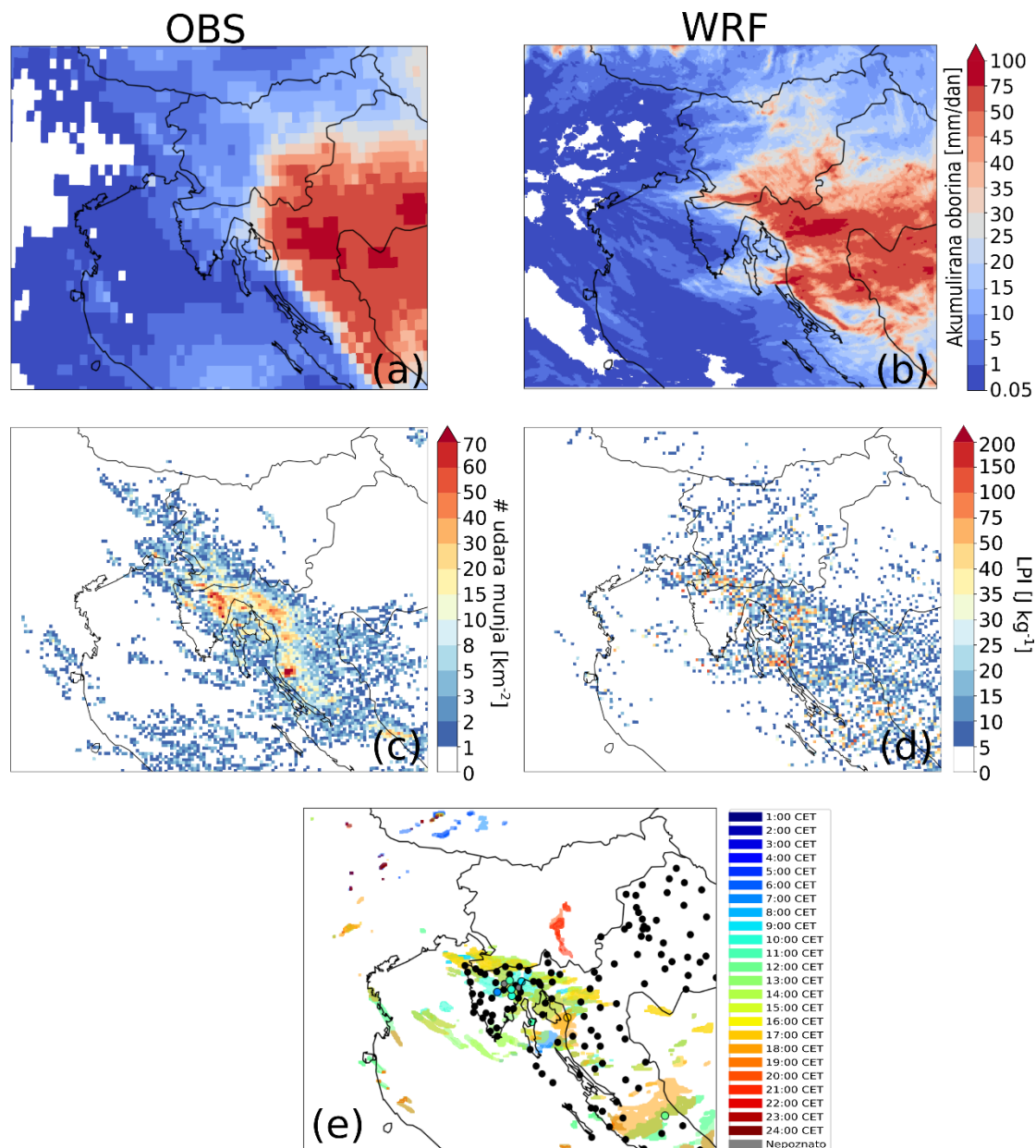


**Slika 3.36.** (lijevo) Simulirani maksimalni intenzitet refleksivnosti oblaka (dBZ) i polje vjetra ( $\text{m s}^{-1}$ ) na 10 m visine iznad tla te (desno) trag simulirane (plavo) i izmjerene (smeđe) aktivnosti munja u posljednjih sat vremena za 31. svibnja 2010. u (a, b) 03 CET, (c, d) 05 CET, (e, f) 08 CET, (g, h) 10 CET.





**Slika 3.37.** Dekompozicija ukupnog vjetra na 10 m (a, b) na komponente koje odgovaraju (c, d) makro, (e, f) mezo i (g, h) mikro skali 31. svibnja 2010. za dva termina: (lijevi stupac) 05 CET i (desni stupac) 08 CET.



**Slika 3.38.** Dnevna akumulirana količina oborine za razdoblje od 31. svibnja 2010. u 00 UTC do 01. lipnja 2010. u 00 UTC dobivena (a) produktom IMERG i (b) modelom WRF. (c) Dnevna suma broja udara munja i (d) dnevni maksimum LPI-a. (e) Osjenčano područje označava područje gdje je tuča simulirana unutar 24 h, a različite boje ukazuju na termin kada je tuča simulirana. Crne točke označuju područja meteoroloških postaja dok obojane točke predstavljaju meteorološke postaje na kojima je opažena tuča te boje ukazuju na vrijeme opažanja tuče.

Utjecaj lokalne skale vidljiv je pretežito u područjima s izraženom orografijom i na granicama kopno-more, ističući da unatoč dominaciji sinoptičkog i mezoskalnog strujanja u području od interesa, lokalni uvjeti ipak igraju ulogu u modifikaciji strujanja što je posebno istaknuto u području Tršćanskog zaljeva (Slika 3.37h). S druge strane,



utjecaj velike skale najuočljiviji je iznad Jadranskog mora koje prestavlja homogenu podlogu pa strujanje u tom području nije pod značajnim utjecajem lokalnih efekata.

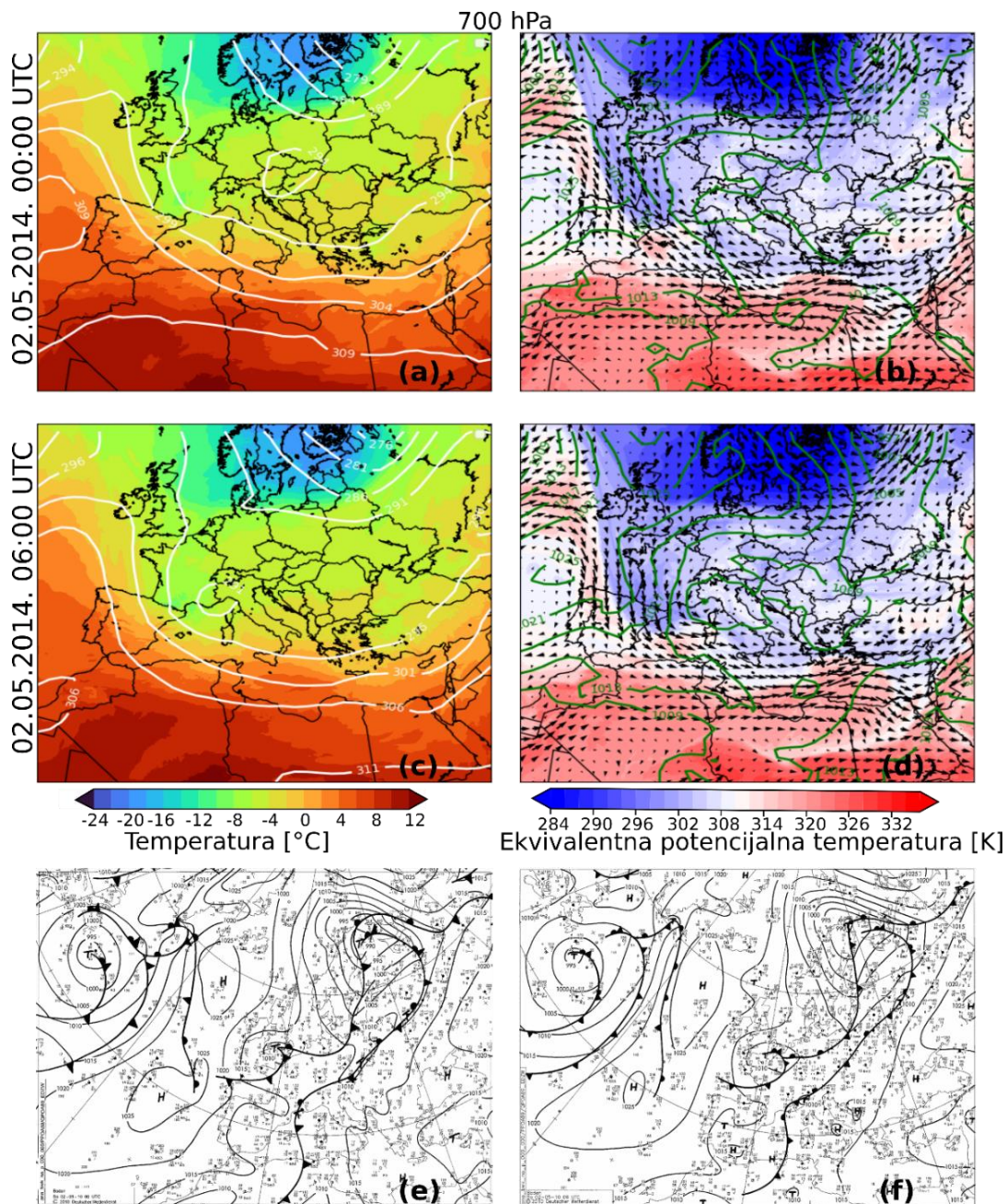
Konačno uspoređujući simulirane i izmjerene dnevne akumulacije oborine i munja (Slika 3.38), model se pokazao relativno uspješnim u simulaciji izmjerene oborine i aktivnosti munja. Štoviše, vidi se da je model prihvatljivo simulirao područja koja su zahvaćena oborinom, odnosno munjama i njihovim intenzitetom. Ovdje je bitno napomenuti razliku u horizontalnoj razlučivosti između mjerenja oborine iz mreže IMERG i modela WRF. Naime oborina iz mreže IMERG dostupna je na  $0.1^\circ$  što približno odgovara 10 km, dok je korak mreže modela WRF postavljen na 1 km. Slične razlike postoje i kod izmjerene i simulirane aktivnosti munja – LPI se unutar modela aktivira svakih 15 min, dok mreža LINET neprekidno detektira munje. Uspoređujući rezultate simulirane i opažene tuče, možemo zaključiti da je model uspješan u simulaciji i prostornih i vremenskih obilježja opažene tuče uz određene lažne alarme koji se djelomično mogu pripisati ograničenoj prostornoj informaciji o pojavi tuče.

#### *3.3.4. Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja 02. svibnja 2014.*

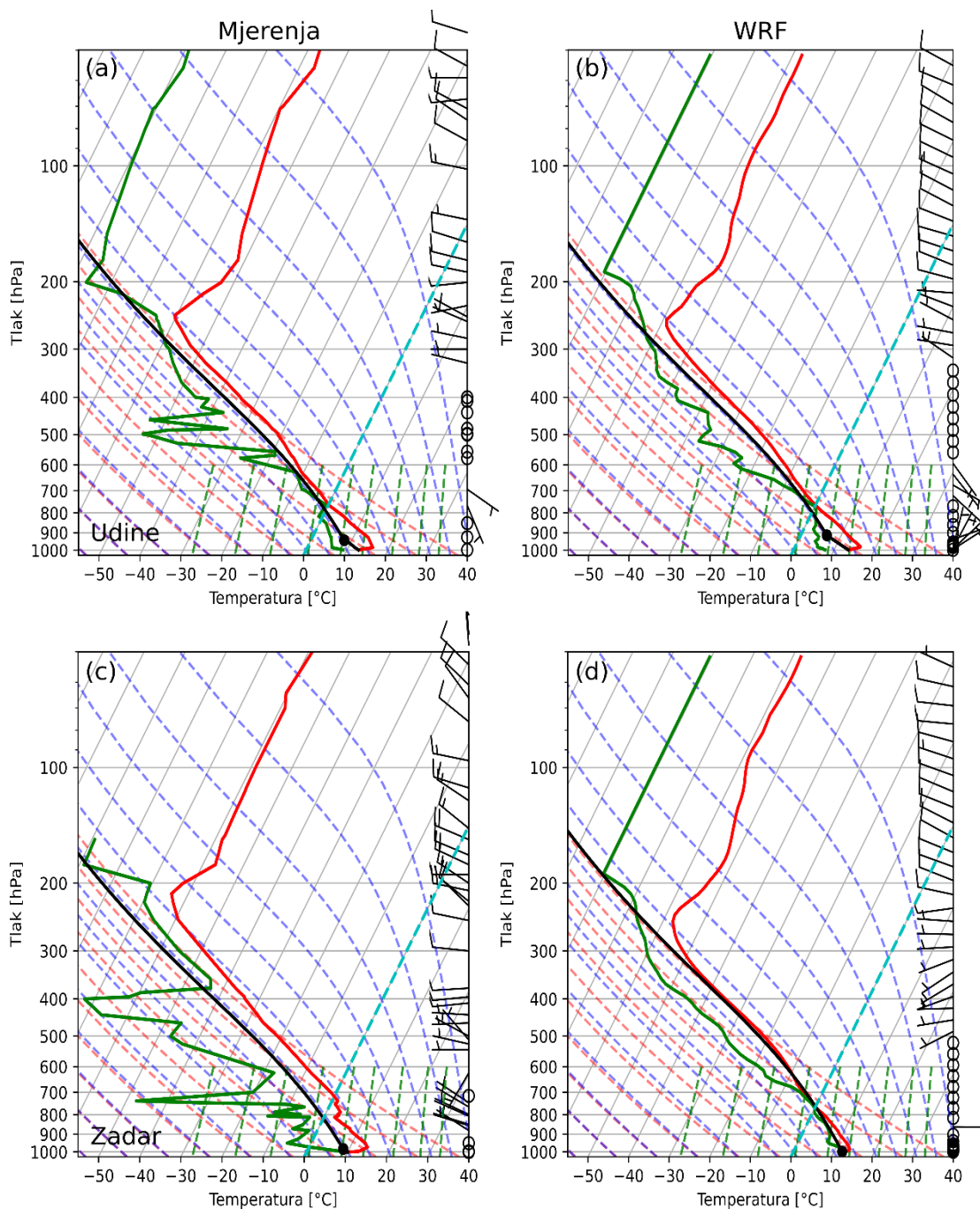
Na dan 02. svibnja 2014. područje središnje Europe pod utjecajem je visinske doline koja se spušta od sjevera kontinenta pa do obala Afrike (Slika 3.39). U jutarnjim satima 02. svibnja 2014. zatvara se Genovska ciklona koja se u narednim satima premješta prema jugoistoku uz zapadnu obalu Italije. Tijekom narednih sati područje od interesa pod utjecajem je prednje strane Genovske ciklone rezultirajući pretežito slabim jugoistočnim strujanjem. Jugoistočno strujanje pogoduje advekciji toplog i vlažnog zraka sa Sredozemlja čime nastaju povoljni uvjeti za pojavu duboke konvekcije. Važno je naglasiti da se u 00 i 06 UTC 02. svibnja 2014. nad područjem Istre ne uočavaju izraženi gradijenti u polju prizemnog tlaka zraka.

Vertikalni profil atmosfere u Udinama 02. svibnja 2014. u 00 UTC otkriva mirne uvjete – duž cijele atmosfere prevladava slab vjetar uz slabu promjenu smjera vjetra po visini što ukazuje na slabo smicanje vjetra (Slika 3.40). Mirni uvjeti pogoduju stvaranju niskih oblaka na 770 hPa plohi. Uočava se jak deficit rosišta ( $T-T_d$ ) iznad plohe 550 hPa. Vrijednost K indeksa ( $KI = 26.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ukazuje na mogućnost nastanka grmljavinskog nevremena, dok nulta vrijednost CAPE ( $CAPE = 0 \text{ J kg}^{-1}$ ) i indeksa podizanja ( $LI = 2.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ) pokazuju da se u ponoć konvekcija već počela razvijati. Slični uvjeti prisutni su i u Zadru

02. svibnja 2014. u 00 UTC gdje se uočava slab vjetar duž cijele atmosfere uz slabu promjenu



**Slika 3.39.** Sinoptička analiza geopotencijalne visine (gpdam) apsolutne topografije izobarne plohe 700 hPa, AT700 hPa, i temperature zraka (°C) na izobarnoj plohi 700 hPa, 02 svibnja 2014. u (a) 00 UTC (c) 06 UTC. Ekvivalentna potencijalna temperatura na 700 hPa izobarnoj plohi, vjetar na 700 hPa izobarnoj plohi te tlak na srednjoj morskoj razini, 02 svibnja 2014. u (b) 00 UTC (d) 06 UTC. Prizemna dijagnostička analiza za 02 svibnja 2014. u (e) 00 UTC i (f) 06 UTC (Izvor: [www1.wetter3.de](http://www1.wetter3.de)).



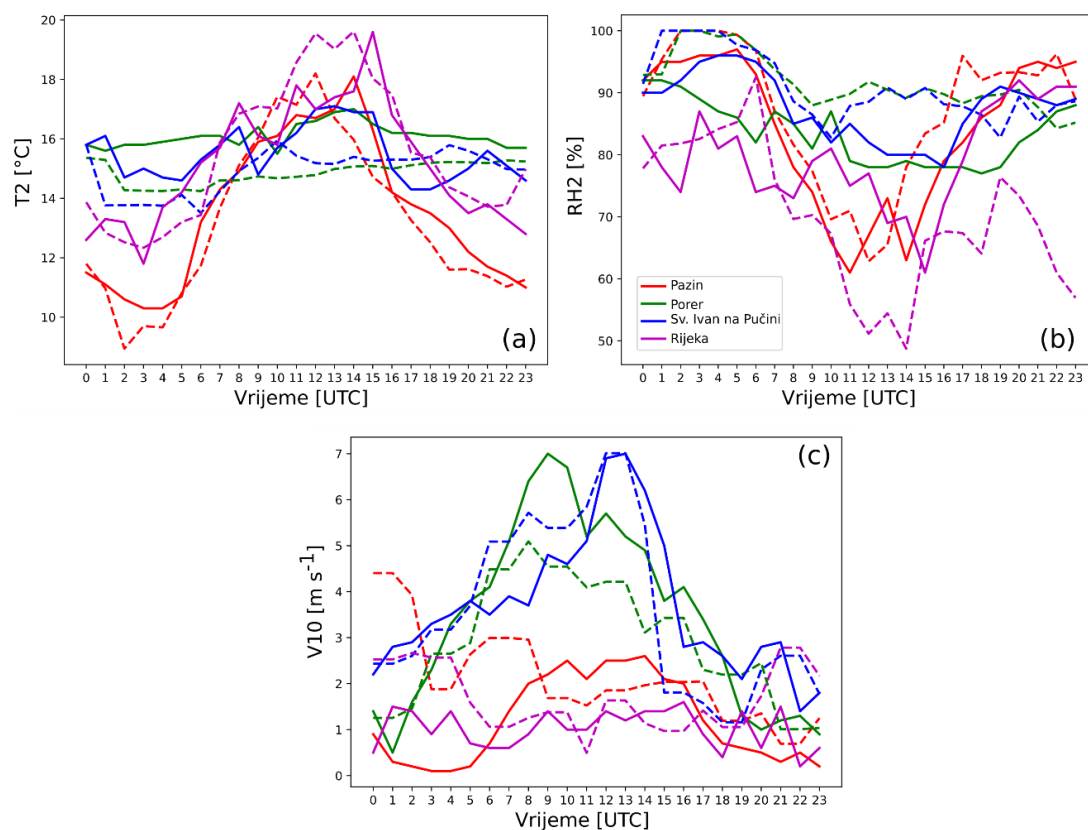
**Slika 3.40.** Vertikalni profil atmosfere u 00 UTC, 02. svibnja 2014. dobiven (a, c) radiosondažnim mjerenjima nad Udinama (a) i Zadrom (c) te (b, d) simuliran modelom WRF nad Udinama (b) i nad Zadrom (d). Crvena linija predstavlja vertikalni profil temperature, zelena linija predstavlja vertikalni profil temperature rosišta. Crna linija prikazuje vertikalnu putanju prizemne nezasićene česti.

smjera vjetrova. Vertikalni profil atmosfere u Zadru otkriva slabo jugozapadno strujanje u području između 900 i 700 hPa uz izraženi deficit rosišta. Za razliku od mjerenja model WRF ukazuje da je proces konvekcije već započeo te da je razvoj konvekcije na tom području uranio u odnosu na mjerenja. Vrijednost termodinamičkih indeksa ukazuje na



mogućnost razvoja grmljavinskog nevremena ( $KI = 31.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $CAPE = 123.3 \text{ J kg}^{-1}$ ,  $LI = -0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Kada usporedimo simulirane i izmjerene vertikalne profile, vidimo da je model bio uspješan u reprodukciji vertikalnog profila temperature, ali nije uspio reproducirati deficit rosišta vidljiv u vertikalnim profilima na obje lokacije u terminima radiosondaža. Model dobro reproducira slabo visinsko strujanje, a u samom prizemnom sloju ukazuje na slab sjeveroistočni vjetar. Model je dobro simulirao prizemne temperaturne inverzije i nivo smrzavanja na 760 hPa u Udinama. Prizemna inverzija temperature u Zadru nije reproducirana u modelu što može biti posljedica ranije konvekcije u modelu. Dodatno, model simulira niže vrijednosti temperature zraka duž cijelog vertikalnog profila u Zadru.



**Slika 3.41.** Simulirane (isprekidane linije) i izmjerene (pune linije) satne vrijednosti (a) temperature na 2 m, (b) relativne vlažnosti na 2 m i (c) satnih srednjaka vjetra na 10 m visine iznad tla na četiri meteorološke postaje: Pazin, Porer, Sv. Ivan na Pučini i Rijeka (boje) iz područja Istre i Kvarnera tijekom 02. svibnja 2014.

Analizirajući satne vrijednosti prizemnih mjerenja na četiri odabrane lokacije (Slika 3.41), uočava se signal dnevnog zagrijavanja kopna u vrijednostima temperature i

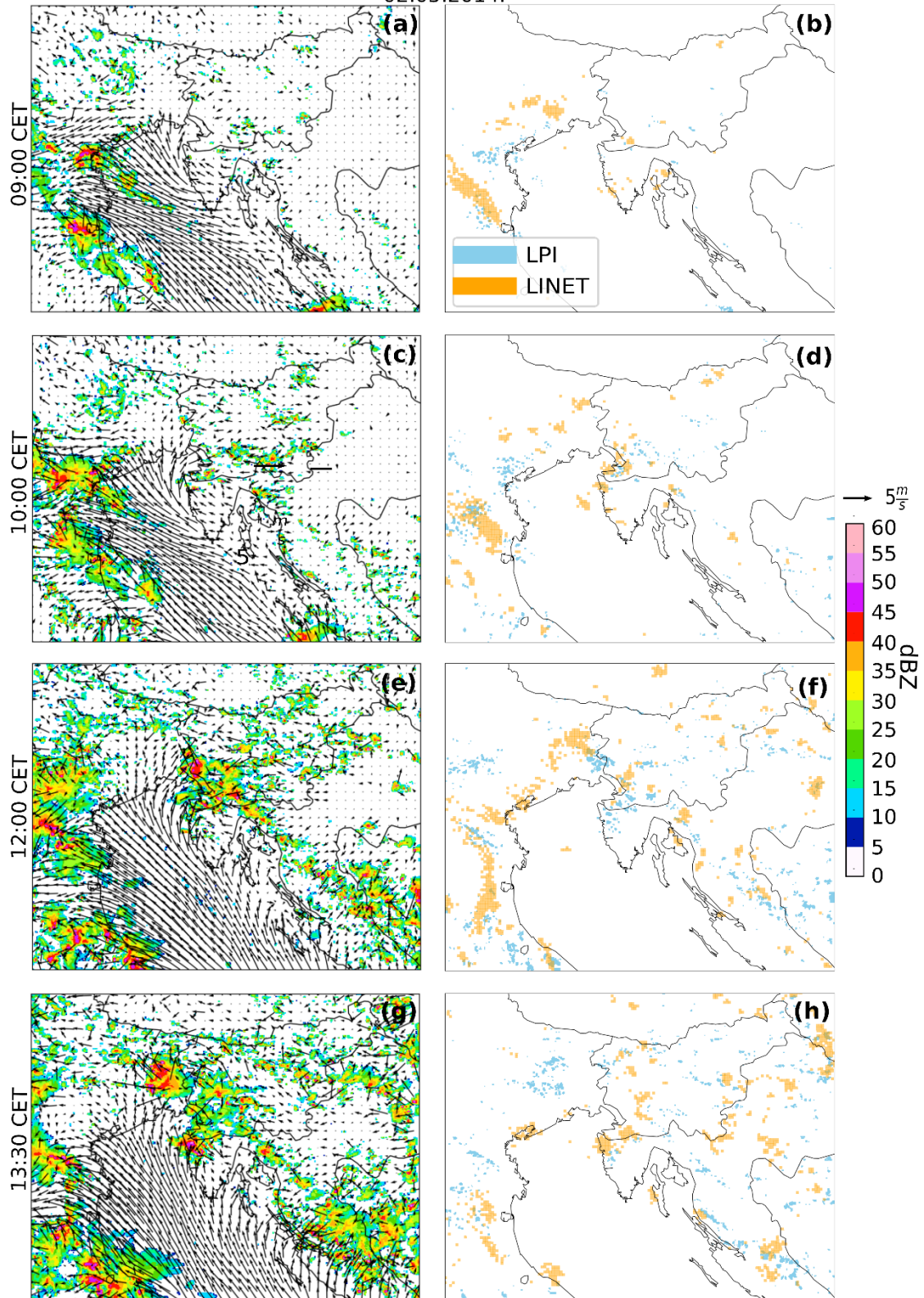


relativne vlažnosti na 2 m na postajama Pazin i Rijeka uz manje vrijednosti srednje satne brzine vjetra. S druge strane, na postajama Porer i Sv. Ivan na Pučini, signal dnevnog ciklusa zagrijavanja izostaje jer se radi o vrlo maloj kopnenoj površini. Međutim zbog manjeg trenja na ovim postajama se uočavaju veće vrijednosti srednje brzine vjetra. Kako ove postaje pokazuju više vrijednosti temperature, relativne vlažnosti, ali i srednjih brzina vjetra tijekom noćnih i ranojutarnjih sati, može se zaključiti da su ove postaje pod većim utjecajem jugoistočnog strujanja koje donosi relativno topao i vlažan zrak nad područjem od interesa. Uzimajući u obzir da su upravo ove postaje smještene duž zapadne obale Istre, veći utjecaj jugoistočnog strujanja upravo na ove postaje nije iznenađujući. Uspoređujući simulirane i izmjerene vrijednosti, uočava se generalno dobro slaganje između mjerenja uz određena odstupanja, ovisno o ontenzitetu i lokaciji.

Prema modeliranim poljima, u jutarnjim satima 02. svibnja 2014. nad Jadranskim morem puše vjetar iz smjera jugoistoka čija brzina postupno raste naznačujući približavanje ciklone i donoseći vlažan zrak nad područje od interesa, ali i hraneći konvektivne ćelije koje dolaze iz smjera sjeveroistočne Italije (Slika 3.42). U sljedećim satima nad Istom se razvijaju kratkotrajne konvektivne ćelije uz zapadnu obalu i sjeverni dio Istre. Relativno slabi gradijenti prizemnog tlaka zraka omogućuju razvoj termički generiranog vjetra zbog razlike u zagrijanosti kopno-more. Na tom području događa se lokalna konvergencija u polju strujanja između obalnih (burina) i naobalnih smjerova vjetra. Do podneva razlika temperature u korist je kopna (ono je toplije od mora za oko 5 °C) te se na sinoptičko jugoistočno strujanje superponiraju termički generirana strujanja vidljiva u području Tršćanskog zaljeva i zapadne obale Istre. Strujanjem vjetra uz zapadnu obalu Istre i prema Tršćanskom zaljevu, nastavlja se održavanje linije konvergencije u polju strujanja koja rezultira u održavanju procesa nastanka konvektivnih ćelija nad sjeverozapadom Istre. Ove konvektivne ćelije prelaze preko istarskog poluotoka te lokalno postižu vrijednosti preko 50 dBZ ukazujući na potencijal za pojavom tuče.

Uspoređujući simulirani i izmjereni trag aktivnosti munja, možemo zaključiti da je model uspješno reproducirao opaženu evoluciju konvekcije uz određena odstupanja u prostoru i vremenu. Sve u svemu, model je uspio reproducirati sporadično pojavljivanje konvektivnih ćelija u režimu slabih gradijenata tlaka zraka i u širem dijelu Hrvatske.

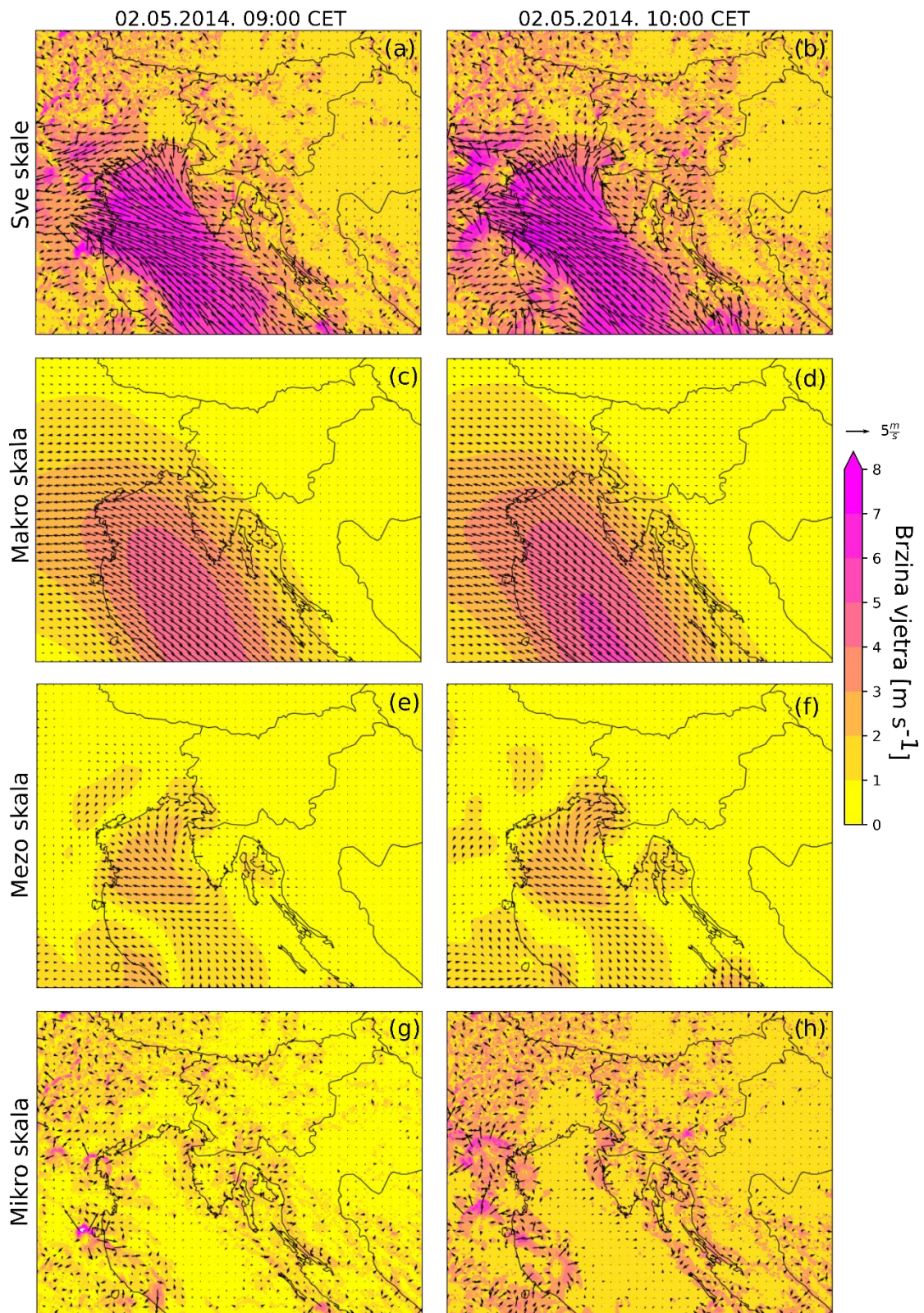
02.05.2014.



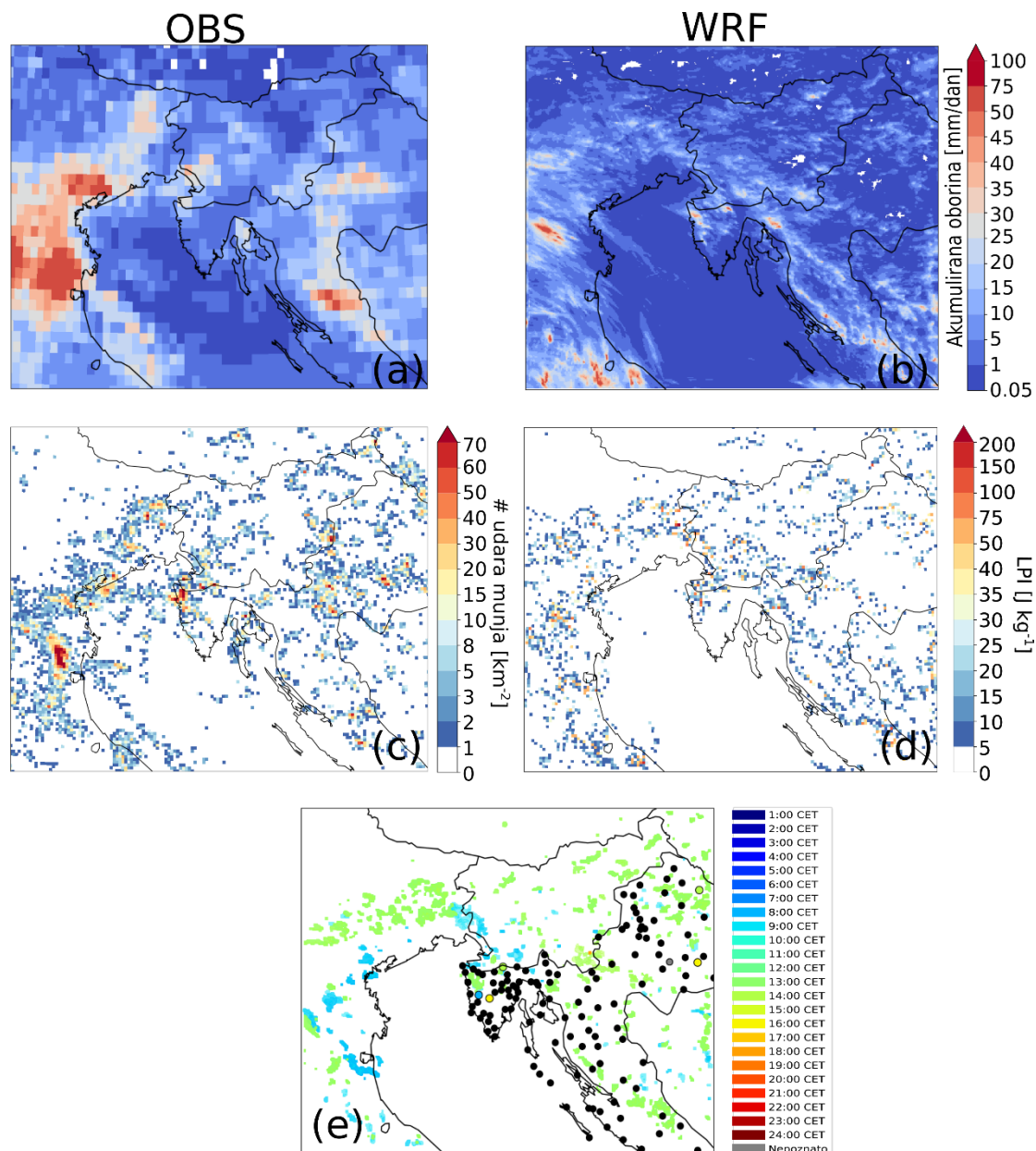
**Slika 3.42.** (lijevo) Simulirani maksimalni intenzitet refleksivnosti oblaka (dBZ) i polje vjetra ( $\text{m s}^{-1}$ ) na 10 m visine iznad tla te (desno) trag simulirane (plavo) i izmjerene (smeđe) aktivnosti munja u posljednjih sat vremena za 02. svibnja 2014. u (a, b) 09 CET, (c, d) 10 CET, (e, f) 12 CET, (g, h) 13 CET.

Prilikom pojave ranojutarnje tuče 02. svibnja 2014. godine uočen je sinoptički utjecaj Genovske ciklone i visinske doline u vidu pretežito jugoistočnih strujanja nad područjem od interesa. Ipak, jugoistočno strujanje uvjetovano raspodjelom tlaka na sinoptičkoj skali, modificirano je lokalnim uvjetima. Kako bismo lakše razlučili doprinos lokalnih uvjeta na rezultanto strujanje, provedena je dekompozicija skala koristeći Barnesov filter (Slika 3.43). Dekompozicija polja potvrđuje izraženu prisutnost velike skale u vidu jugoistočnog strujanja pretežito iznad mora. Sam iznos brzine vjetra kreće se oko  $5-6 \text{ m s}^{-1}$  (nad otvorenim morem) što čini oko 60-65 % ukupnog strujanja za koji je odgovorna sinoptička skala. Međutim, zahvaljujući lokalnim efektima razlike zagrijanosti kopna i mora, na sinoptičko strujanje su superponirana termički generirana strujanja koja jugoistočno strujanje zakreću prema kopnu, uz zapadnu obalu Istre i na područje Tršćanskog zaljeva. Mezoskalni udio se procjenjuje na oko 25 % ukupne brzine vjetra. Na zakretanje strujanja, osim mezoskalnih utjecaja u vidu kopnenjaka/smorca, bitan efekt ima i specifičan oblik Tršćanskog zaljeva i zapadne obale Istre koji dodatno modificiraju strujanje (mikro skala) u smislu divergencije/konvergencije strujanja te pospješuju stvaranje konvektivnih ćelija. Osim na granicama kopno-more, mikro skala općenito doprinosi u ovom slučaju u iznosu oko 10 %. Međutim sporadično i mjestimice njen udio je veći te je izražen u područjima s kompleksnom topografijom ili u području generiranja fronti udara vjetra (engl. *gust front*) koje se razvijaju ispod postojećih konvektivnih ćelija. Mehanizam nastanka novih ćelija kao rezultat kolizije fronti udara vjetra i termički generiranih fronti (npr. fronti smorca /kopnenjaka) predstavlja jedan od najčešćih uzroka nastanka (neorganiziranih) lokalnih konvektivnih ćelija (npr. Carbone i sur., 2000.; Crook, 2001.) uočenih i nad područjem sjevernog Jadrana (Poljak i sur., 2014.). Nadalje, studije Heiblum i sur. (2011.) te Mazón i Pino (2013.) pokazale su da konvergencije u prizemnom polju strujanja izazvane kopnenjakom i sinoptičkim vjetrom blizu obale kao i konvergencija uslijed trenja te visoki planinski grebeni/lanci imaju značajne učinke na stvaranje noćne/ranojutarnje konvekcije i oborine nad morem u Sredozemlju. U ovom slučaju mezoskalni utjecaj odnosno lokalni efekt u povoljnom sinoptičkom okruženju u smislu smjera vjetra i dotoka vlažnog zraka igra važnu ulogu u generiranju ranojutarnje konvekcije.





**Slika 3.43.** Dekompozicija ukupnog vjetra na 10 m (a, b) na komponente koje odgovaraju (c, d) makro, (e, f) mezo i (g, h) mikro skali 02. svibnja 2010. za dva termina: (lijevi stupac) 09 CET i (desni stupac) 10 CET.



**Slika 3.44.** Dnevna akumulirana količina oborine za razdoblje 02. svibnja 2014. u 00UTC do 03. svibnja 2014. u 00 UTC dobivena (a) produktom IMERG i (b) modelom WRF. (c) Dnevna suma broja udara munja i (d) dnevni maksimum LPI-ja. (e) Osjenčano područje označuje područje gdje je tuča simulirana unutar 24 h, a različite boje ukazuju na termin kada je tuča simulirana. Crne točke označuju područja meteoroloških postaja dok obojane točke predstavljaju meteorološke postaje na kojima je opažena tuča. Boje ukazuju na vrijeme opažanja tuče.

Konačno uspoređujući simulirane i izmjerene dnevne akumulacije oborine i munja, vidimo da je model reproducirao opća prostorna obilježja tuče i munja, ali s manjim intenzitetom u odnosu na mjerenja (Slika 3.44). Uspoređujući rezultate simulirane i opažene tuče, možemo zaključiti da je model uspješan u simulaciji opažene tuče uz određene lažne alarme koji se djelomično mogu pripisati ograničenoj prostornoj

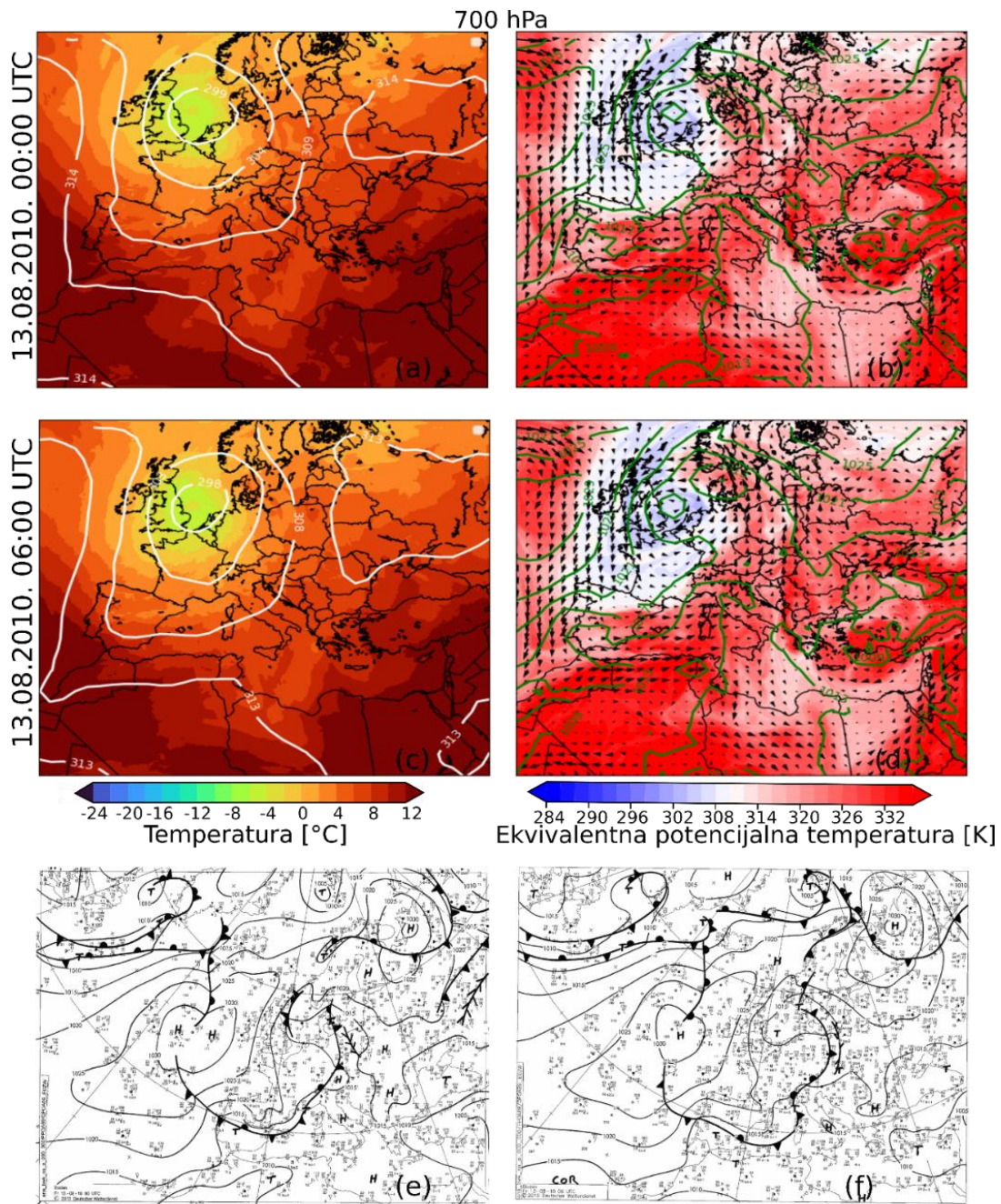
informaciji o pojavi tuče. Model nije uspio reproducirati opaženu poslijepodnevnu tuču (tijekom sat vremena od 16 do 17 UTC) u unutrašnjosti Istre. Poslijepodnevna tuča u kontinentalnoj Hrvatskoj je reproducirana u modelu, ali s prostornim odmakom.

### *3.3.5. Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja 13. kolovoza 2010.*

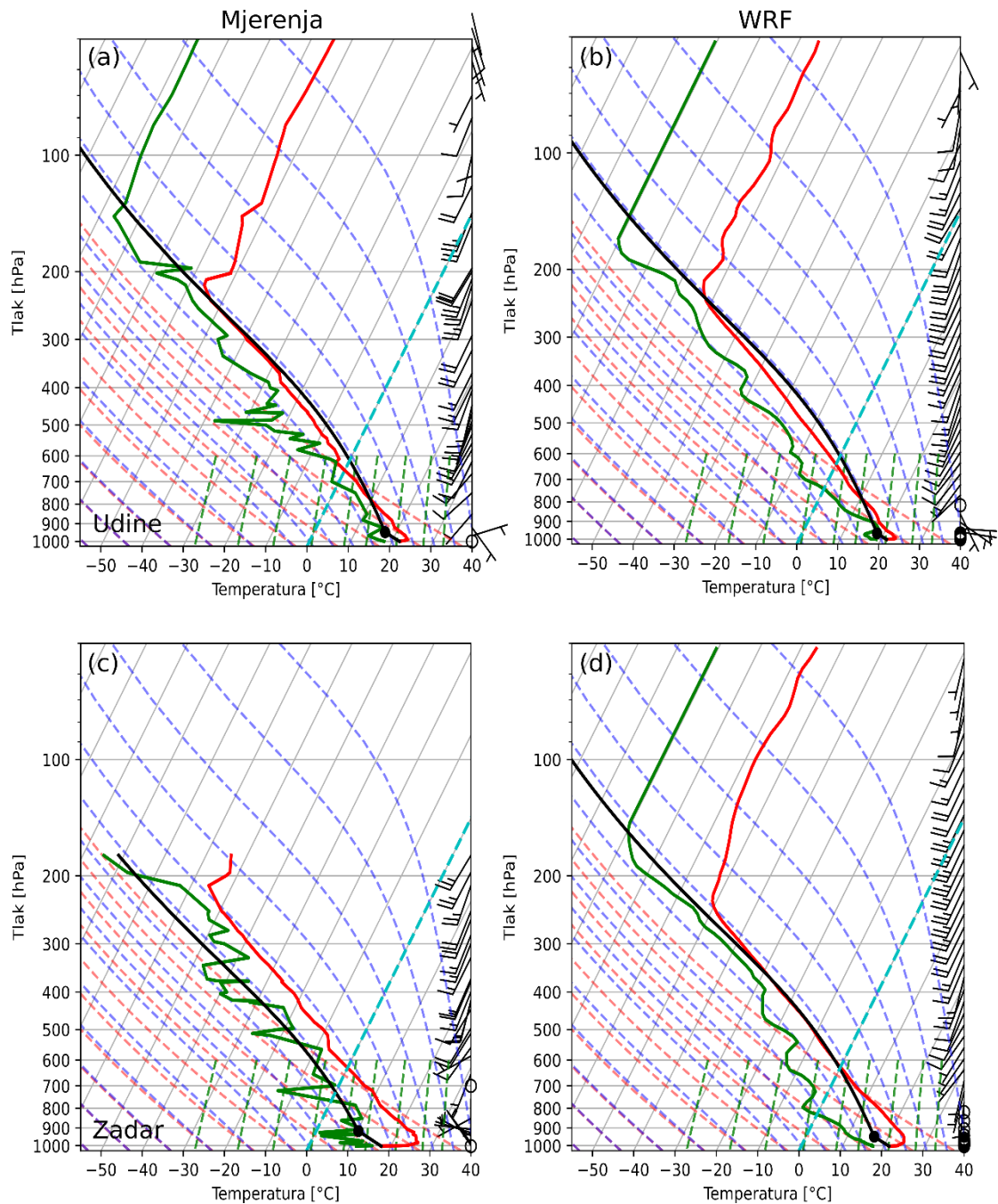
Tijekom 13. kolovoza 2010. Europa je bila pod utjecajem duboke ciklone s centrom iznad Sjevernog mora čija se frontalni sustav proteže područjem zapadne Europe (Slika 3.45). Tijekom narednih sati jača i centar niskog tlaka zraka u Genovskom zaljevu, a hladna fronta povezana s ovim sustavom pomaknula se istočno, prema Jadranskom moru i hrvatskoj obali. Ovakav raspored baričkih sustava povezan je s relativno slabim jugozapadnim visinskim strujanjem nad hrvatskom obalom koje donosi vlažan i relativno nestabilan zrak na područje od interesa.

Visinski profil atmosfere u Udinama 13. kolovoza 2010. u 00 UTC otkriva skoro mirne uvjete pri tlu (Slika 3.46). Po visini vjetar zakreće od istočno-jugoistočnih prema jugozapadnim smjerovima iznad 850 hPa ukazujući na znatno smicanje vjetra po visini. Termodinamički indeksi nestabilnosti ukazuju na potencijal razvoja mjestimičnih konvektivnih sustava ( $KI = 27.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $CAPE = 17.8 \text{ Jkg}^{-1}$ ,  $LI = 2.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ). U ovom terminu, do stvaranja oblaka dolazi na 620 hPa plohi. Istovremeno, na srednjem dijelu Jadrana, nestabilnost atmosfere na području Zadra vidljiva je u vrijednostima termodinamičkih indeksa nestabilnosti ( $KI = 29.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $CAPE = 447.9 \text{ Jkg}^{-1}$ ,  $LI = -1.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Vrijednost indeksa podizanja ( $LI = -1.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ukazuje na slabu vjerojatnost konvektivne aktivnosti uz postojanje odgovarajućeg mehanizma podizanja (npr. dolazak hladne fronte i efekt dnevnog zagrijavanja). Uspoređujući simulirani i opaženi vertikalni profil atmosfere u Udinama 13. kolovoza 2010. u 00 UTC možemo uočiti da je model uspješno reproducirao vertikalni profil vjetra s izraženim vertikalnim smicanjem te vertikalni profil temperature i temperature rosišta. Slično kao i kod prethodnog slučaja, model nije uspio reproducirati izražen deficit rosišta uočen u sloju između 600 hPa i 450 hPa plohe.





**Slika 3.45.** Sinoptička analiza geopotencijalne visine (gpdam) apsolutne topografije izobarne plohe 700 hPa, AT700 hPa, i temperature zraka (°C) na izobarnoj plohi 700 hPa, 13. kolovoza 2010. u (a) 00 UTC (c) 06 UTC. Ekvivalentna potencijalna temperatura na 700 hPa izobarnoj plohi, vjetar na 700 hPa izobarnoj plohi te tlak na srednjoj morskoj razini, 13. kolovoza 2010. u (b) 00 UTC (d) 06 UTC. Prizemna dijagnostička analiza za 13. kolovoza 2010. u (e) 00 UTC i (f) 06 UTC (Izvor: [www1.wetter3.de](http://www1.wetter3.de)).

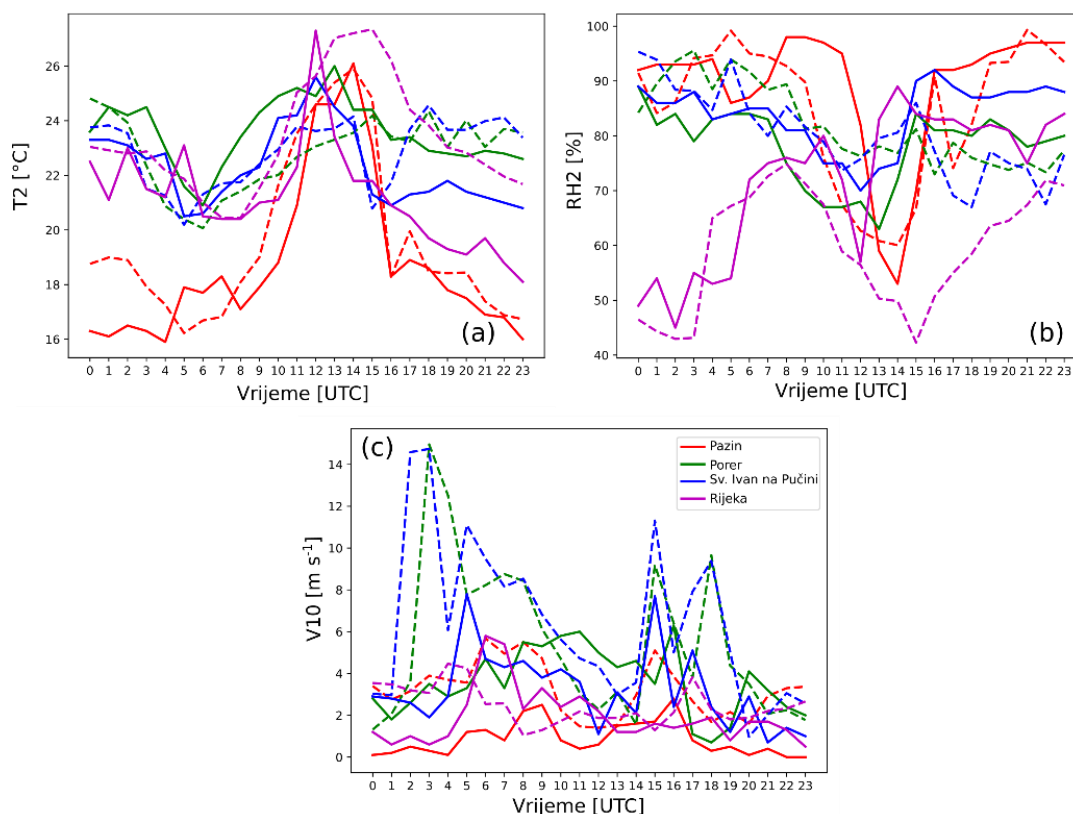


**Slika 3.46.** Vertikalni profil atmosfere u 00 UTC, 13. kolovoza 2010. dobiven (a, c) radiosondažnim mjerenjima nad Udinama (a) i Zadrom (c) te (b, d) simuliran modelom WRF nad Udinama (b) i nad Zadrom (d). Crvena linija predstavlja vertikalni profil temperature, zelena linija predstavlja vertikalni profil temperature rosišta. Crna linija prikazuje vertikalnu putanju prizemne nezasićene česti.

Analizirajući satne vrijednosti prizemnih mjerenja na četiri odabrane lokacije (Slika 3.47), uočava se signal dnevnog zagrijavanja kopna u vrijednostima temperature i relativne vlažnosti na 2 m na svim postajama. Na priobalnim postajama (Porer, Sv. Ivan na Pučini, Rijeka) uočavaju se veće vrijednosti temperature i relativne vlažnosti u



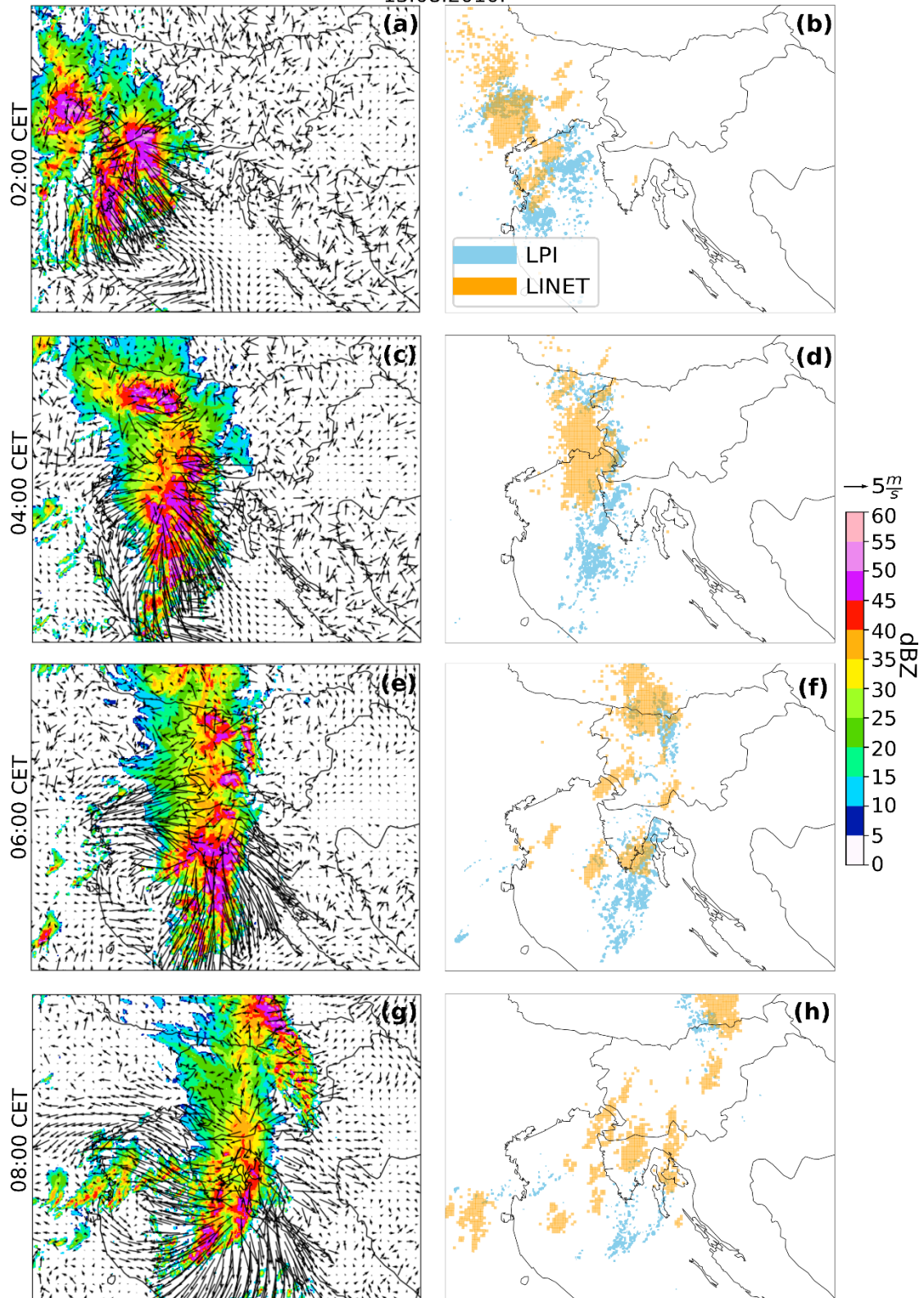
usporedbi s izmjerenim vrijednostima na kontinentalnoj postaji Pazin. Uspoređujući simulirane vrijednosti temperature i relativne vlažnosti uočeno je relativno dobro slaganje za sve postaje. Uočava se izraženo odstupanje u simuliranim vrijednostima temperature zraka i relativne vlažnosti na postaji Rijeka u popodnevним satima. Uspoređujući simulirane i izmjerene satne srednjake vjetra, model precjenjuje brzine vjetra najviše tijekom noćnih sati na priobalnim postajama, Porer i Sv. Ivan na Pučini.



**Slika 3.47.** Simulirane (isprekidane linije) i izmjerene (pune linije) satne vrijednosti (a) temperature na 2 m, (b) relativne vlažnosti na 2 m i (c) satnih srednjaka vjetra na 10 m visine iznad tla na četiri meteorološke postaje (boje) iz područja Istre i Kvarnera tijekom 13. kolovoza 2010.

Prema modeliranim poljima (Slika 3.48), u večernjim satima 12. kolovoza 2010. nad Jadranom prevladava jugozapadno prizemno strujanje donoseći topao i vlažan zrak sa Sredozemlja. Oko ponoći uočava se pristizanje konvektivnih ćelija iz smjera istočne obale Italije. Dolazak konvektivnih ćelija uvjetovan je zapadnim premještanjem hladne fronte preko područja Italije. Ispred fronte, stvara se linija konvergencije koja počinje jačati prelaskom preko Jadranskog mora te konačno zahvaća područje Istre. Na području

13.08.2010.



**Slika 3.48.** (lijevo) Simulirani maksimalni intenzitet refleksivnosti oblaka (dBZ) i polje vjeta ( $\text{m s}^{-1}$ ) na 10 m visine iznad tla te (desno) trag simulirane (plavo) i izmjerene (smeđe) aktivnosti munja u posljednjih sat vremena za 13. kolovoza 2010. u (a, b) 02 CET, (c, d) 04 CET, (e, f) 06 CET, (g, h) 08 CET.

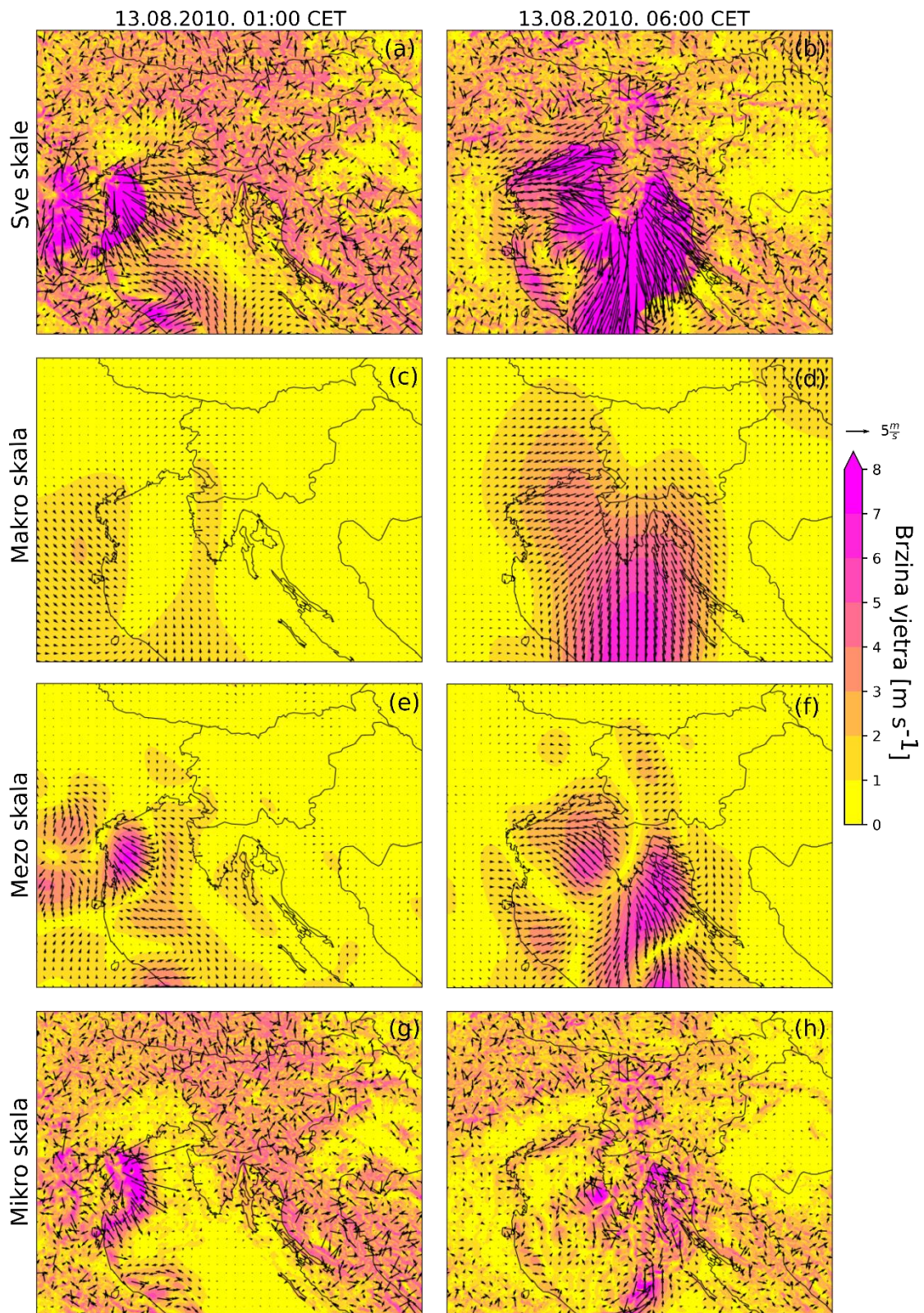
Istre razvijaju se konvektivne ćelije sa simuliranim maksimalnim radarskim odzivima većim od 55 dBZ ukazujući na mogućnost pojave tuče.

Usporedba simuliranog i izmjerenog traga aktivnosti munja, ukazuje na uspješnu reprodukciju opaženog razvoja konvekcije uz određena odstupanja u prostoru i vremenu. Naime, simulirane konvektivne ćelije zahvaćaju područje nešto južnije od opaženih. Dodatno, model nije uspio reproducirati produljenu konvektivnu aktivnost nad širim područjem Istre i Kvarnera od 08 UTC do 12 UTC. Opisana prostorna i vremenska odstupanja u simulaciji konvekcije očekivana su pojava prilikom analize rezultata modela na kilometarskoj skali. Unatoč tome, čak i uz određena vremenska i prostorna odstupanja simulirane i opažene konvekcije, simulacija modela još uvijek se može smatrati korisnom.

Pojavu ranojutarnje tuče 13. kolovoza 2010. godine uvjetovao je prolazak hladne s povezanom linijom konvergencije koja je na putu do Istre ojačala prolazeći Jadransko more. Provedbom dekompozicije skala (Slika 3.49) otkriveno je da u ukupnom polju strujanja najveću prisutnost imaju upravo fronte udara vjetra nastale kao rezultat vrlo intenzivne zone konvergencije. Ponovno, uočava se zakretanje strujanja uzrokovano lokalnim uvjetima, prvenstveno kompleksom orografijom.

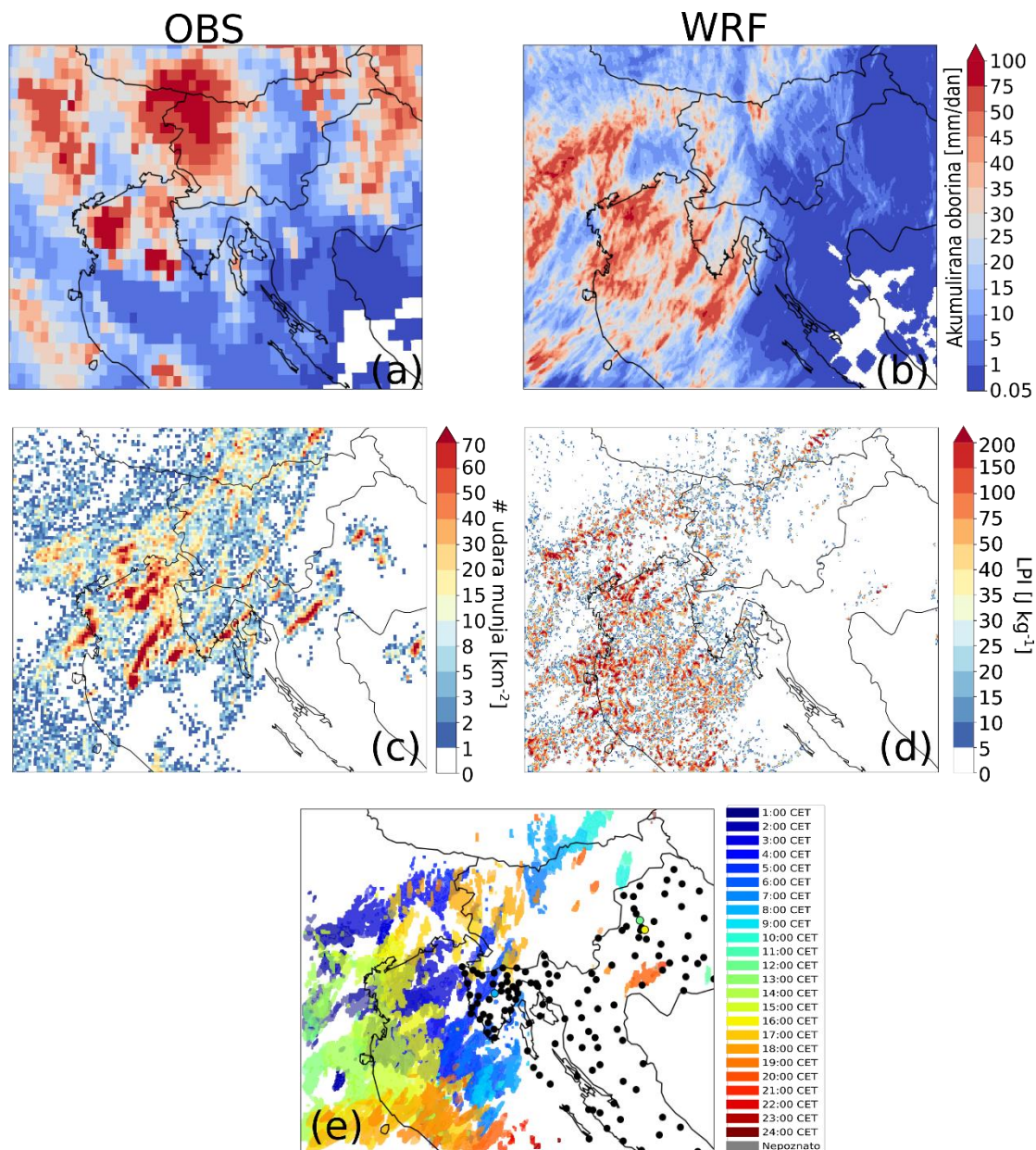
Konačno uspoređujući simulirane i izmjerene dnevne akumulacije oborine i munja, vidimo da je model reproducirao opće prostorne karakteristike oborine i munja, ali je simulirana konvekcija pomaknuta južnije (Slika 3.50). Uspoređujući rezultate simulirane i opažene tuče, možemo zaključiti da je model uspješan u simulaciji opažene tuče, ali određeni lažni alarmi još uvijek postoje. Slično kao i u prethodnom slučaju, model nije uspio u potpunosti reproducirati konvekciju s tučom opaženu u unutrašnjosti Hrvatske. Modelski rezultati ukazuju na postojanje konvekcije na području oko Karlovca tijekom popodnevnih sati, ali ne i u sjeverozapadnom dijelu Hrvatske.





**Slika 3.49.** Dekompozicija ukupnog vjetra na 10 m (a, b) na komponente koje odgovaraju (c, d) makro, (e, f) mezo i (g, h) mikro skali 13.8.2010. za dva termina: (lijevi stupac) 01 CET i (desni stupac) 06 CET.





**Slika 3.50.** Dnevna akumulirana količina oborine za razdoblje 13. kolovoza 2010. 00UTC – 14. kolovoza 2010. 00 UTC dobivena (a) produktom IMERG i (b) modelom WRF. (c) Dnevna suma broja udara munja i (d) dnevni maksimum LPI-a. (e) Područje osjenčano plavom označuje područje gdje je tuča simulirana unutar 24 h. Plave točke označuju područja meteoroloških postaja dok crvene točke označuju meteorološke postaje na kojima je opažena tuča.

### 3.3.6. Sažetak rezultata

U ovom dijelu istraživanja analizirana je pojava ranojutarnje tuče nad područjem Istre. U tu svrhu provedena je tipizacija vremena za sve slučajeve tuče u periodu od 04 do 10 CET iznad Istre. Tipizacija vremena otkriva da se ranojutarnja tuča javlja uglavnom u situacijama s jakim sinoptičkim forsiranjem i pretežno je povezana s ciklonalnim utjecajem. Na temelju rezultata tipizacije vremena odabrana su tri slučaja tuče za simulacije koji odgovaraju tipovima vremena donja, prednja i gornja strana ciklone.

Cilj ove analize bio je analizirati sinoptičke, mezoskalne i lokalne uvjete prisutne prilikom pojave ranojutarnje tuče iznad Istre te procijeniti u kojoj mjeri WRF model uz HAILCAST i LPI dijagnostike može reproducirati opažene karakteristike tuče i munja. Kako bi nastala snažna duboka mokra konvekcija, povezana s pojavom tuče i munja, potrebno je nekoliko uvjeta. Ti uvjeti mogu se sažeti kao:

- (i) dovoljna količina vlage u nižim slojevima atmosfere,
- (ii) promjena temperature zraka po vertikali takva da uzrokuje nestabilnosti česti zraka te
- (iii) mehanizam koji uzrokuje početno podizanje česti zraka i dozvoljava joj iskorištavanje raspoložive konvektivne energije.

Uz navedene uvjete, da bi nastala organizirana konvekcija (s više konvektivnih oblaka/ćelija na okupu i dužeg trajanja), neophodan je još jedan uvjet, a to je smicanje vjetra. Dakle, tijekom ovog dijela istraživanja analizirani su čimbenici koji dovode do uspostavljanja ovih uvjeta te konačno razvoja duboke konvekcije s tučom i munjama.

Prvi slučaj, 31. svibnja 2010. događa se pod utjecajem donje strane ciklone. Tijekom ovog slučaja, Istra je pod utjecajem duboke ciklone nad srednjom Europom rezultirajući visinskim zapadnim, sjeverozapadnim strujanjima nad područjem od interesa. Prije jačanja prizemnog sjeverozapadnog strujanja, Istra je pod utjecajem jugoistočnog strujanja koje donosi topao i vlažan zrak zadovoljavajući uvjet (i). Jačanjem sjeverozapadnog strujanja pristiže relativno hladan zrak nad početno toplu i vlažnu podlogu zadovoljavajući uvjet (ii). Jugozapadno strujanje sa sjeverozapadnim strujanjem nad područjem istočne obale Italije zatvara mezociklonu koja se pomiče zapadno, prema području Istre i Kvarnera omogućujući podizanje česti i stvaranje konvektivnih ćelija. Prisustvo izraženog smicanja i smjera i brzine vjetra doprinosi jačanju organizirane konvekcije. Ovakvi uvjeti rezultiraju pojavom tuče i munja nad istarskim područjem. Termodinamički indeksi dobiveni radiosondažnim mjerenjima neposredno prije pojave

tuče, ne ukazuju na izražen potencijal atmosfere za pojavom tuče ističući kako je tijekom ovog slučaja pojava konvekcije bila uvjetovana dinamičkim forsiranjem (dolazak hladne fronte sa sjeverozapada uvjetovan sinoptičkim forsiranjem).

Drugi slučaj, 02. svibnja 2014. događa se pod utjecajem prednje strane ciklone. Tijekom ovog slučaja područje od interesa pod utjecajem je Genovske ciklone rezultirajući pretežito slabim jugoistočnim strujanjem. Jugoistočno strujanje pogoduje advekciji relativno toplog i vlažnog zraka sa Sredozemlja zadovoljavajući uvjet (i) i (ii). Ovaj slučaj uvjetovan je relativno slabim gradijentima tlaka zraka koji dopuštaju razvoj termički generiranih strujanja. Termički generirana strujanja superponiraju se na sinoptičko jugoistočno strujanje kojeg zakreću prema obali. Osim termičkih efekata, lokalni efekti kao oblik obale i orografija također zakreću sinoptički uvjetovano jugoistočno strujanje. Spoj ovih doprinosa vodi konvergenciji zraka u Tršćanskom zaljevu čime nastaju sporadične i mjestimične konvektivne ćelije te se zadovoljava uvjet (iii). Tijekom ovog slučaja, nije opaženo značajno smicanje brzine i smjera vjetra po visini. Stoga ne dolazi do pojave organizirane konvekcije, već se tijekom dana nad širem području od interesa sporadično pojavljuju kratkotrajne i mjestimične konvektivne ćelije. Osim sinoptičkih uvjeta, tijekom ovog slučaja uočava se umjerena prisutnost lokalnih procesa i mezoskale u rezultatnom strujanju.

Treći slučaj, 13. kolovoza 2010. događa se pod utjecajem frontalnog sustava duboke ciklone s centrom iznad Sjevernog mora. U večernjim satima prethodnog dana nad područjem od interesa prevladava jugozapadno strujanje donoseći topao i vlažan zrak sa Sredozemlja i zadovoljavajući uvjet (i). Tijekom narednih sati uočava se premiještane hladne fronte preko područja Italije stvarajući liniju konvergencije ispred fronte. Prelaskom linije konvergencije preko relativno toplog i vlažnog Jadranskog mora, linija konvergencije jača. Ovime se ujedno zadovoljavaju uvjeti (ii) i (iii). Nailaskom linije konvergencije nad područje Istre, uočava se izražena aktivnost munja te pojava tuče. Dodatno, radiosondažna mjerenja tijekom ovog slučaja ukazuju na značajno smicanje brzine i smjera vjetra po visini što pridonosi stvaranju organizirane konvekcije.

Sve u svemu, tijekom analiziranih slučaja tuče, bili su prisutni svi uvjeti za razvoj duboke konvekcije te ih je model relativno dobro reproducirao. Uspoređujući simulirana polja oborine, munja i tuče s mjerenjima, možemo zaključiti da je model bio relativno uspješan u simulaciji opažene konvekcije i njezinih efekata. Naravno, određena odstupanja postoje, ovisno o lokaciji i slučaju. Čak štoviše, model je bio uspješan u reprodukciji vremenske evolucije konvekcije ukazujući na potencijal prognoze ovakvih

slučaja u operativnom smislu. Ova analiza ističe kako su za pojavu ranojutarnje konvekcije iznad Istre uglavnom povezana jaka sinoptička forsiranja, ali i uz jaka sinoptička forsiranja, mezoskalni i lokalni uvjeti mogu imati bitnu ulogu u formaciji zona konvergencije.

Dakle, tijekom svih analiziranih slučajeva tuče prisutni su sinoptički, mezo i lokalni uvjeti. Prema rezultatima prethodnih analiza (Jelić i sur., 2020.; Blašković i sur., 2023.), u kontinentalnoj Hrvatskoj primjećujemo da tuča najčešće nastaje tijekom popodnevnih sati, što se može povezati s termičkim efektima. S druge strane, u Istri primjećujemo ravnomjerniji dnevni raspored tuče, gdje je termički utjecaj manje izražen, s pretežno sinoptičkim utjecajem koji je dalje modificiran mezoskalnim i mikroskalnim uvjeti. Ove bi hipoteze trebalo ispitati u budućim analizama fokusiranim na usporedbu dinamičkih i termalnih efekata tijekom pojave tuče u kontinentalnoj i obalnoj Hrvatskoj.



## 4. Zaključak

Posljednjih se nekoliko godina u velikoj mjeri raspravlja o klimi i klimatskim promjenama uz koje se nerijetko vežu i intenzivni meteorološki događaji. U neke od njih se mogu ubrojiti tuča i munje kao jedan od produkata olujnog vremena koji mogu biti povezani sa značajnim ekonomskim gubitcima. Iako relativno česte pojave na našem području prema klimatološkim analizama, još uvijek predstavljaju izuzetno izazovan fenomen za prognozu pomoću numeričkih modela. Ovo proizlazi iz činjenice da procesi odgovorni za formaciju tuče i munja unutar olujnog oblaka još uvijek nisu u potpunosti poznati. Kako je tuča izuzetno lokalna pojava, jedan od najvećih izazova prilikom analize obilježja tuče jest nedostatak izravnih mjerenja tuče na tlu.

Predstavljena doktorska disertacija predstavlja analizu mogućnosti nedavno razvijenih dijagnostičkih alata za numeričku simulaciju tuče i munja, točnije HAILCAST i LPI. Ovi dijagnostički alati korišteni su po prvi put nad Hrvatskom, ali i širom Alpsko-jadranskom regijom. Štoviše, numeričke simulacije tuče evaluirane su, po prvi puta, pomoću izravnih mjerenja tuče na tlu. Provedena je sustavna analiza i evaluacija rezultata i u režimu kratkoročne prognoze vremena, ali i u režimu klimatskih simulacija. Provedeno doktorsko istraživanje predstavlja važan znanstveni doprinos poboljšanju vremenskih prognoza i klimatskih simulacija ekstremnog vremena s naglaskom na tuču i munje kroz:

- i. Detaljnu statističku i dinamičku evaluaciju simuliranih atmosferskih uvjeta prisutnih tijekom odabranih slučajeva tuče nad širim Alpsko-jadranskim područjem. Kvantificiranje uspješnosti trenutnih mezoskalnih numeričkih modela u simulaciji prisutnih atmosferskih uvjeta tijekom odabranih epizoda tuče. Ovo ujedno predstavlja i nadopunu dosadašnjim istraživanjima olujnog vremena te specifično tuče i munja nad Hrvatskom.
- ii. Detaljnu statističku i dinamičku evaluaciju uspješnosti dijagnostičkih alata za simulaciju tuče i munja nad širim Alpsko-jadranskim područjem. Provedena je analiza prednosti/mane odabranih dijagnostičkih alata te ispitivanje osjetljivosti rezultata na odabir mezoskalnog modela i postavki unutar jednog modela. Ovo predstavlja prvi pokušaj u Hrvatskoj, i jedan od rijetkih u Europi,

iskorištavanja dijagnostičkih alata kao što su HAILCAST i LPI u svrhu simulacije opaženih karakteristika tuče i munja te njihovu sustavnu i detaljnu evaluaciju.

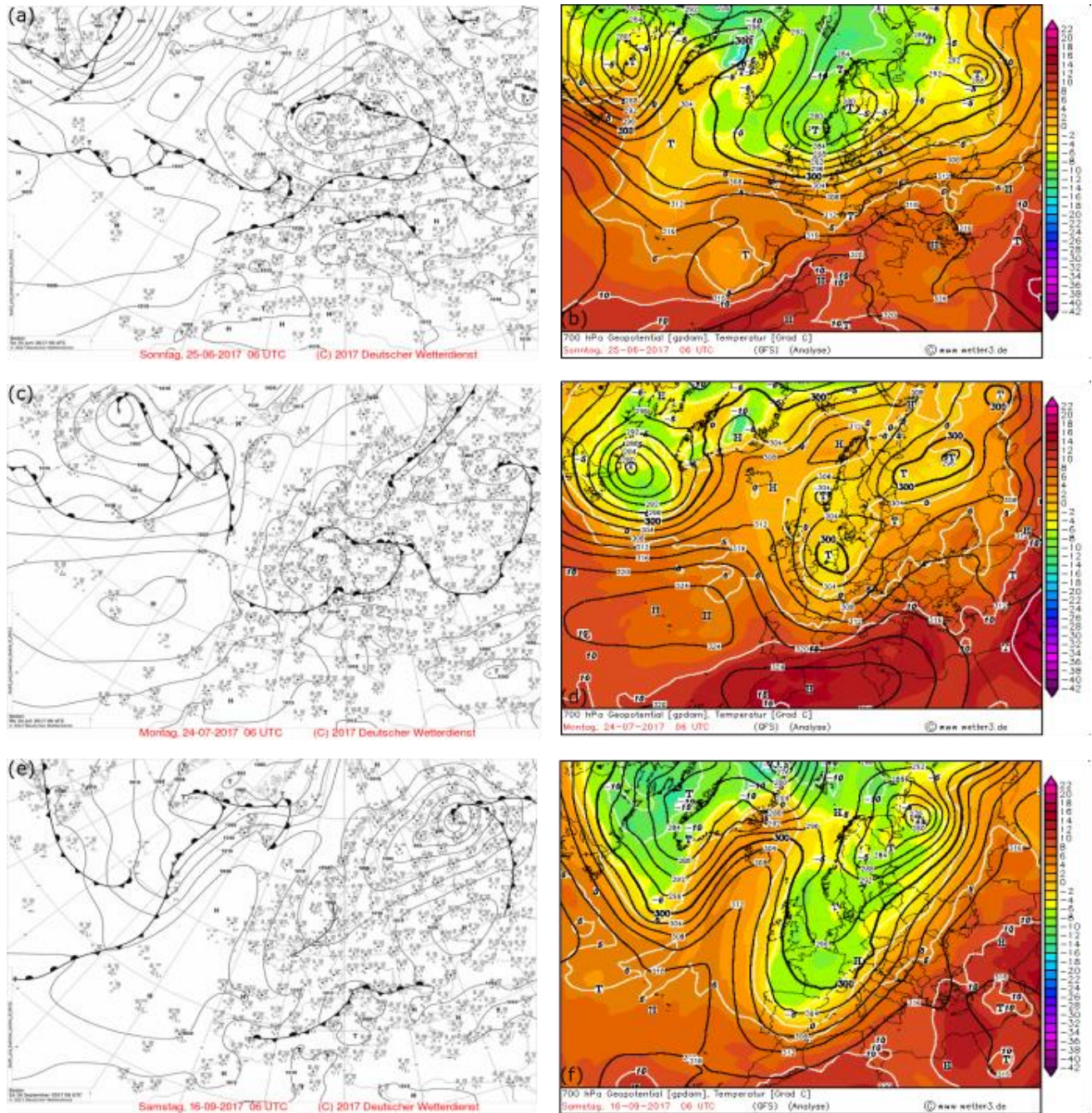
- iii. Detaljnu analizu atmosferskih uvjeta prisutnih tijekom ranojutarnje konvekcije, s naglaskom na tuču, iznad Istre. Statistička i dinamička evaluacija mezoskalnog numeričkog modela u simulaciji atmosferskih uvjeta prisutnih prilikom pojave ranojutarnje tuče uz evaluaciju dijagnostičkih alata u simulaciji tuče i munja. Ovo izravno doprinosi razumijevanju uvjeta u kojima se javlja ranojutarnja tuča u Istri što rezultira boljim prognozama ranojutarnje konvekcije.

Prema tome glavni rezultati dobiveni unutar predstavljenog doktorskog istraživanja mogu se sažeti kao:

- i. Trenutni mezoskalni modeli mogu vjerodostojno reproducirati atmosferske uvjete prisutne prilikom pojave tuče u Hrvatskoj, ali i u široj Alpsko-jadranskoj regiji.
- ii. Dijagnostički alati za simulaciju tuče i munja pokazuju obećavajuće rezultate u simulaciji opaženih karakteristika tuče i munja iznad Hrvatske, ali i šire Alpsko-jadranske regije. Odabrani dijagnostički alati uspješni su u simulaciji prostornih karakteristika i intenziteta opažene aktivnosti munja. Slično, utvrđena je dobra uspješnost u simulaciji prostornih karakteristika tuče izmjerenih radarskim produktima iz Švicarske te mreže tučomjera iz Hrvatske. Varijabilnost rezultata u odabiru mezoskalnog modela i postavki unutar jednog modela ukazuje na benefit korištenja multimodelskog i/ili multifizičkog ansambla pri simulaciji ovih događaja.
- iii. Utvrđeno je da se ranojutarnja tuča iznad Istre većinom javlja u ciklonalnim vremenskim tipovima. Osim sinoptičkih uvjeta, za nastanak konvekcije i tuče, bitnu ulogu predstavljaju i mezoskalni, ali i lokalni uvjeti. Trenutni modeli pokazuju dobru uspješnost u simulaciji odabranih događaja.

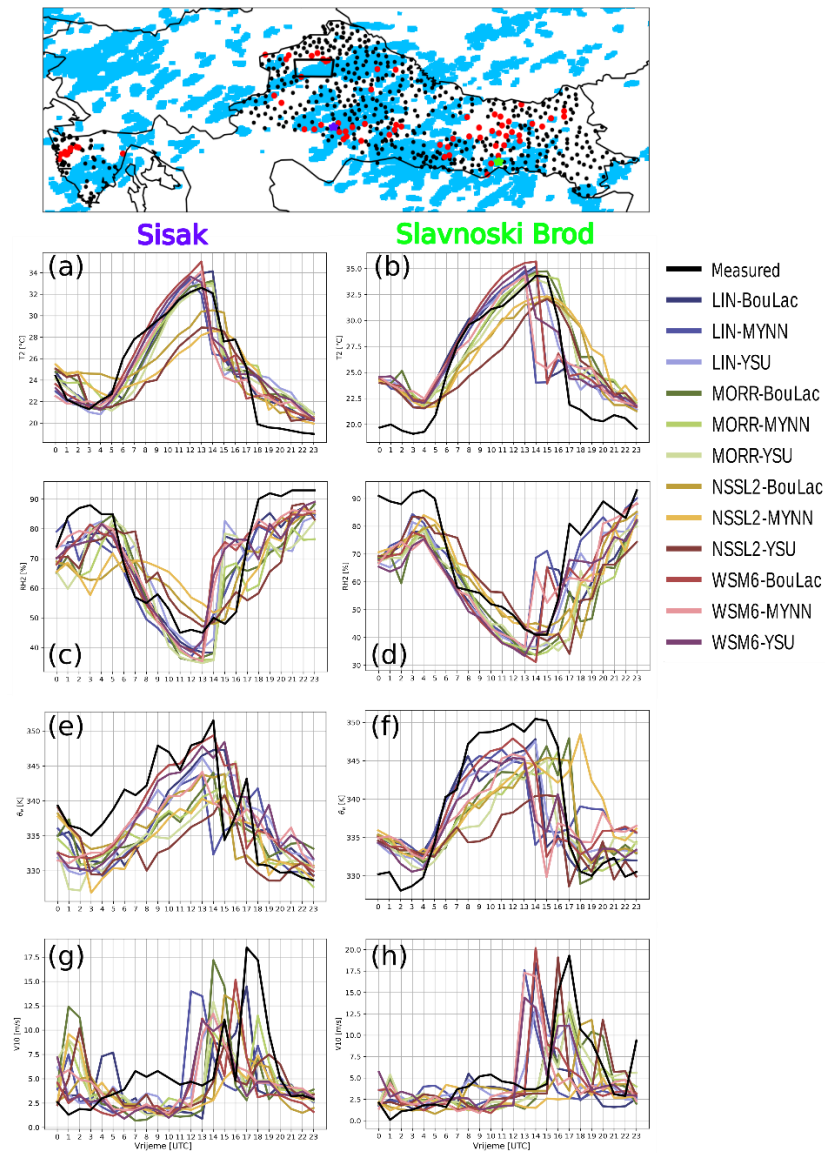
Dobiveni rezultati su obećavajući te ukazuju da bi analizirani dijagnostički alati mogli biti vrijedan doprinos operativnoj prognozi tuče, ali i klimatskoj ocjeni pojave tuče i munja u sadašnjoj i budućoj klimi. Ovo izravno doprinosi poboljšanju prognoza tuče i munja za javnost, ali i specifične korisnike (npr. energetske sektor, promet ili poljoprivredu). S druge strane, dobiveni rezultati otvaraju mogućnost za analizu učestalosti i obilježja tuče u budućoj klimi što izravno doprinosi stvaranju budućih planova prilagodbe klimatskim promjenama.

# Dodatak A



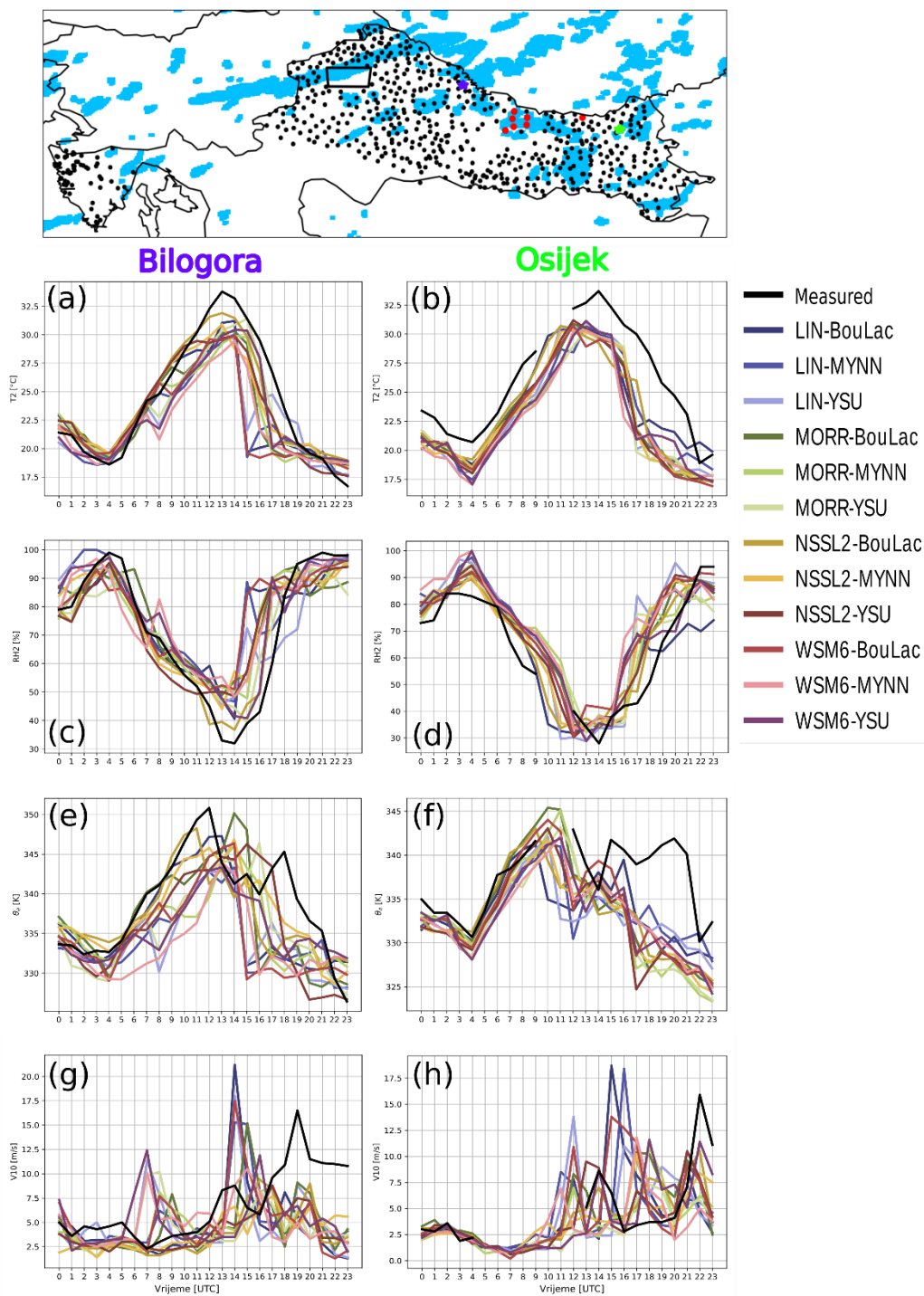
Slika A1. Prizemna i visinska situacija za slučaj (a, b) 25.6.2017., (c, d) 24.7.2017. i (e, f) 16.9.2017. Prikazana je prizemna analiza te visinska polja temperature i geopotencijala na 700 hPa te prizemnog tlaka zraka. Preuzeto s [www.wetter3.de](http://www.wetter3.de).

# Dodatak B

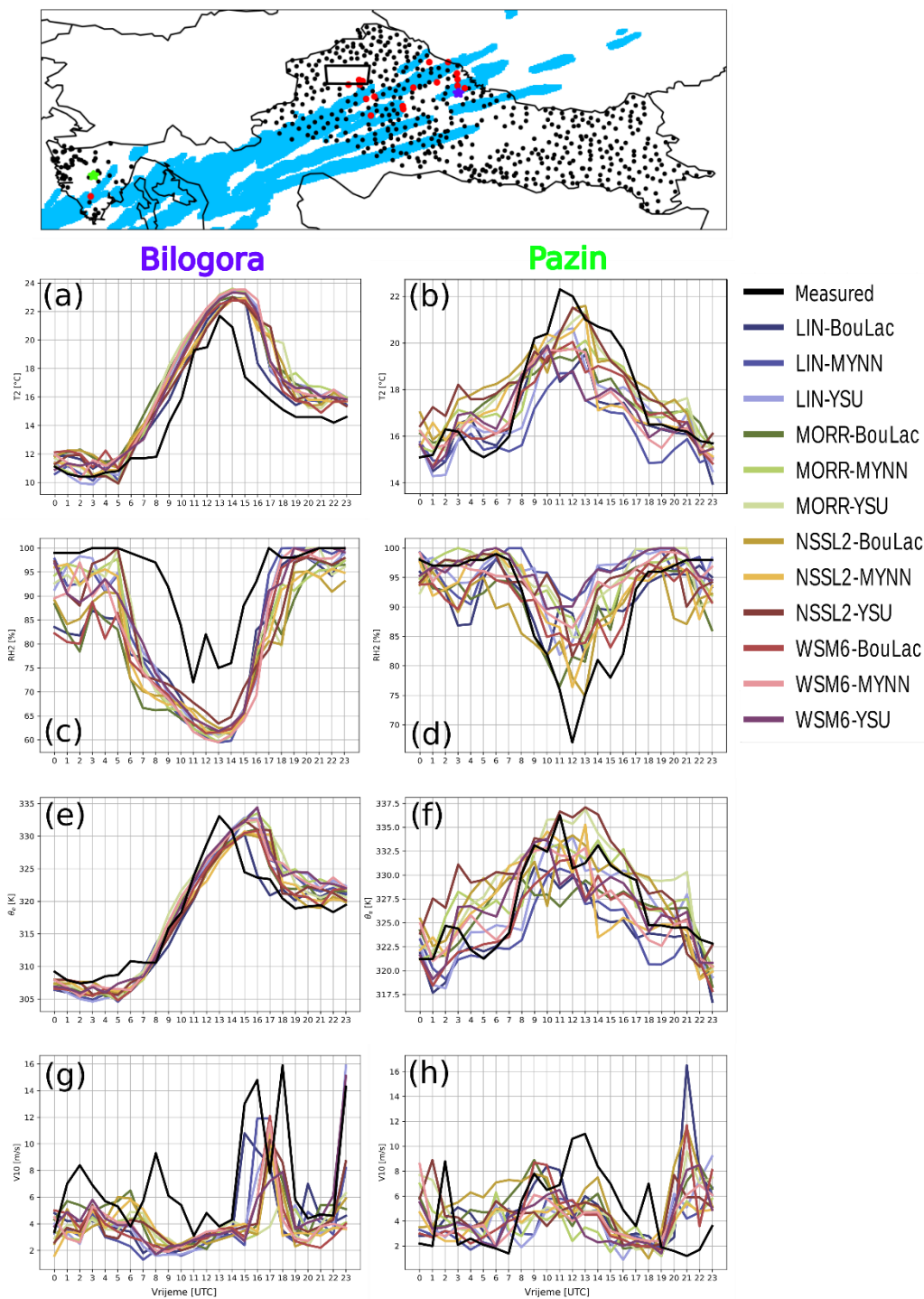


Slika B1. Vremenski nizovi prizemnih mjerenja na odabranim postajama za slučaj 25. lipnja 2017. Gornja slika prikazuje područja u kojima je tuča simulirana u rasponu od 24 sata označena plavom bojom za LIN-BouLac člana ansambla. Crne točke predstavljaju položaj tučomjera, dok su oni tučomjeri koji su registrirali tuču označeni crvenim točkama. Ljubičaste i zelene zvjezdice označavaju položaje analiziranih automatskih meteoroloških postaja Sisak i Slavonski Brod. Slike prikazuju satne vrijednosti temperature na 2 m (a), (b); 2 m relativna vlažnost (c), (d); 2 m ekvivalentne potencijalne temperature (e), (f) i satnih maksimuma brzine vjetera na 10 m (g), (h). Prikazani su i simulirani i izmjereni vremenski nizovi.



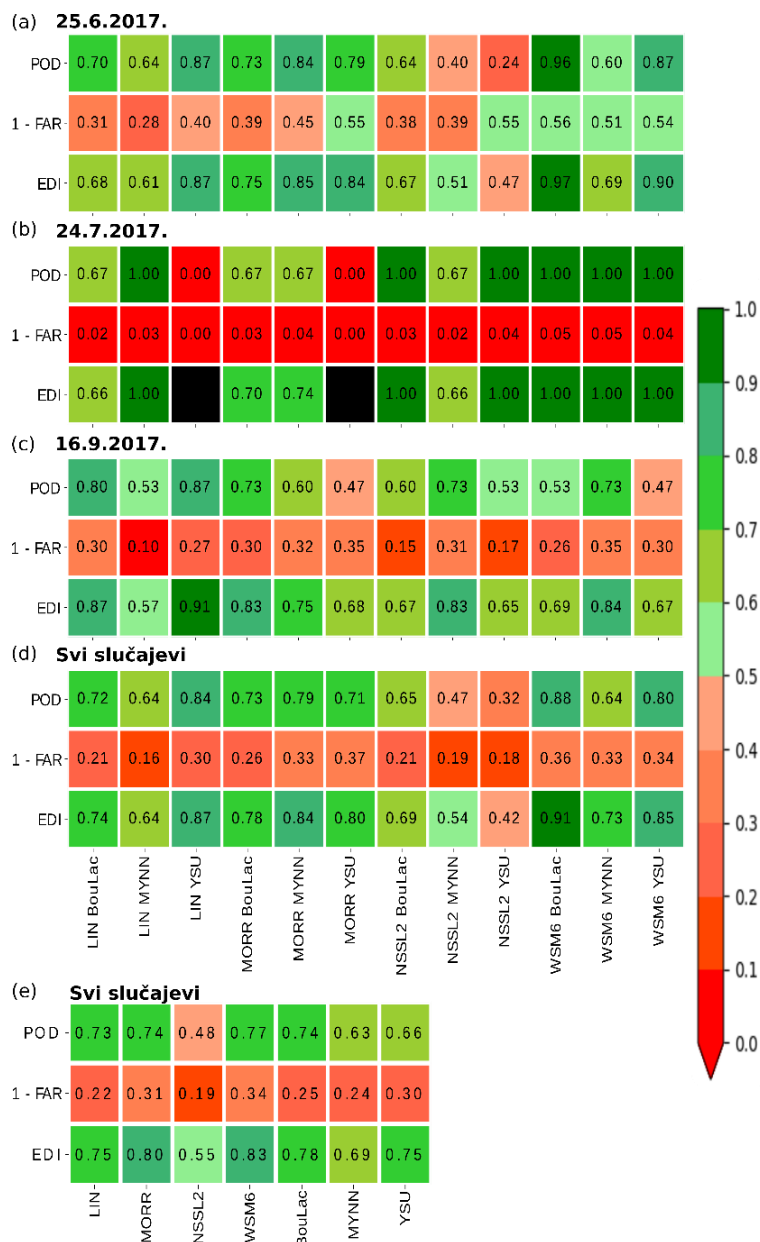


Slika B2. Vremenski nizovi prizemnih mjerenja na odabranim postajama za slučaj 27. srpnja 2017. Gornja slika prikazuje područja u kojima je tuča simulirana u rasponu od 24 sata označena plavom bojom za LIN-BouLac člana ansambla. Crne točke predstavljaju položaj tučomjera, dok su oni tučomjeri koji su registrirali tuču označeni crvenim točkama. Ljubičaste i zelene zvjezdice označavaju položaje analiziranih automatskih meteoroloških postaja Bilogora i Osijek. Slike prikazuju satne vrijednosti temperature na 2 m (a), (b); 2 m relativna vlažnost (c), (d); 2 m ekvivalentne potencijalne temperature (e), (f) i satnih maksimuma brzine vjetra na 10 m (g), (h). Prikazani su i simulirani i izmjereni vremenski nizovi.

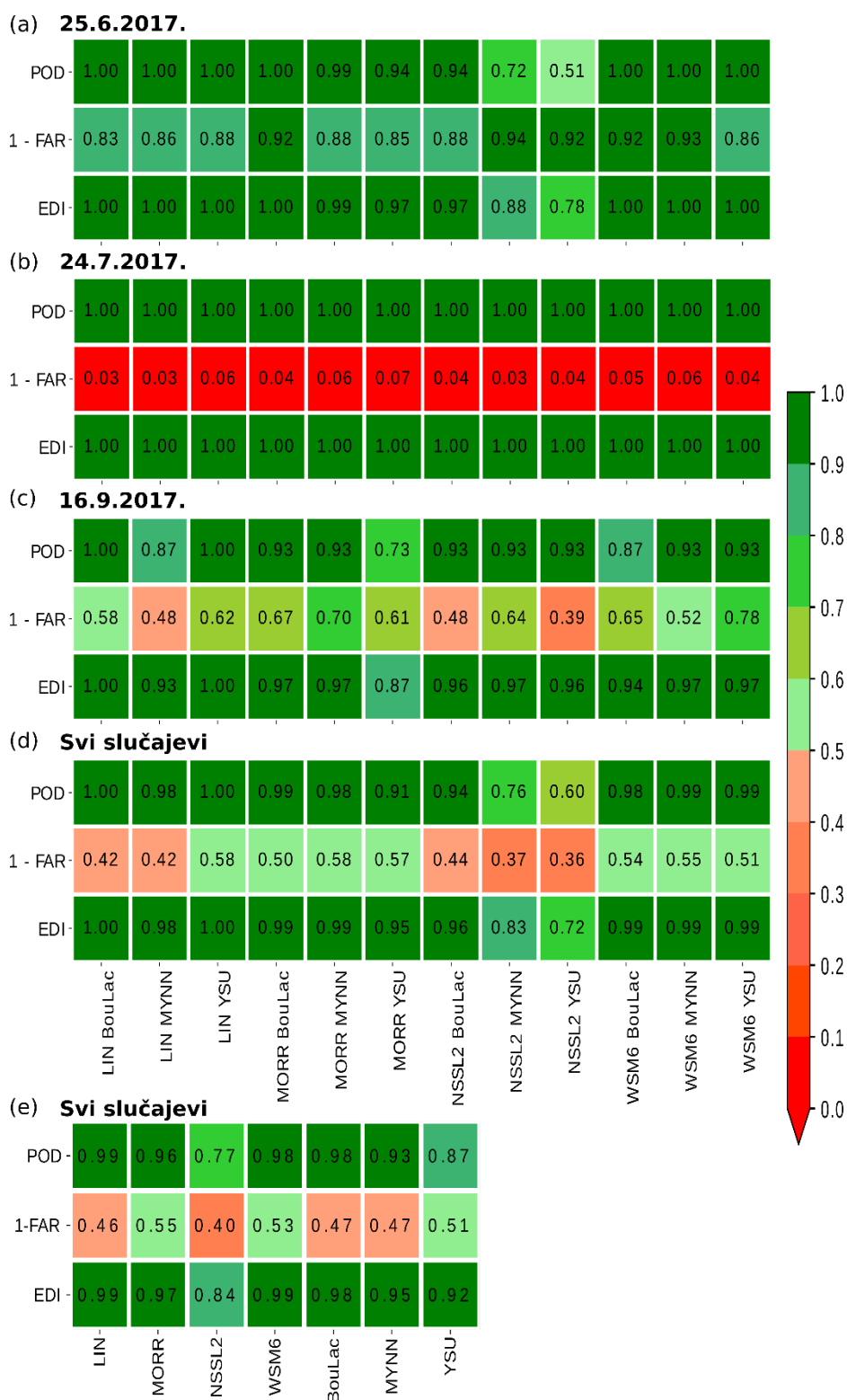


Slika B3. Vremenski nizovi prizemnih mjerenja na odabranim postajama za slučaj 27. srpnja 2017. Gornja slika prikazuje područja u kojima je tuča simulirana u rasponu od 24 sata označena plavom bojom za LIN-BouLac člana ansambla. Crne točke predstavljaju položaj tučomjera, dok su oni tučomjeri koji su registrirali tuču označeni crvenim točkama. Ljubičaste i zelene zvjezdice označavaju položaje analiziranih automatskih meteoroloških postaja Bilogora i Pazin. Slike prikazuju satne vrijednosti temperature na 2 m (a), (b); 2 m relativna vlažnost (c), (d); 2 m ekvivalentne potencijalne temperature (e), (f) i satnih maksimuma brzine vjetra na 10 m (g), (h). Prikazani su i simulirani i izmjereni vremenski nizovi.

# Dodatak C



Slika C1. Dijagrami uspješnosti za sve članove ansambla za (a) 25. lipnja 2017., (b) 24. srpnja 2017. i (c) 16. rujna 2017., (d) sve analizirane slučajeve i (e) svaku shemu parametrizacije u svim razmatranim slučajevima za prozor verifikacije radijusa 6 km. Dane su vrijednosti kategoričkih metrika uspješnosti vjerojatnosti otkrivanja (POD), 1 - omjer lažnih alarma (1-FAR) i indeksa ekstremne ovisnosti (EDI). Ljestvica boja označava najbolju (zeleno) i najlošiju (crveno) uspješnost.



Slika C2. Dijagrami uspješnosti za sve članove ansambla za (a) 25. lipnja 2017., (b) 24. srpnja 2017. i (c) 16. rujna 2017., (d) sve analizirane slučajeve i (e) svaku shemu parametrizacije u svim razmatranim slučajevima za prozor verifikacije radijusa 6 km. Dane su vrijednosti kategoričkih metrika uspješnosti vjerojatnosti otkrivanja (POD), 1 - omjer lažnih alarma (1-FAR) i indeksa ekstremne ovisnosti (EDI). Ljestvica boja označava najbolju (zeleno) i najlošiju (crveno) uspješnost.



# Dodatak D

Indeksi nestabilnosti korišteni u ovom radu mogu se sažeti kao:

- Indeks podizanja (engl. *Lifted index*, LI) mjeri je stabilnosti atmosfere, a predstavlja temperaturnu razliku između zraka koji se vertikalno podiže adijabatski (bez izmjene topline s okolinom) i okolnog zraka na određenoj visini. Negativne vrijednosti LI ukazuju na nestabilnu atmosferu, dok pozitivne vrijednosti ukazuju na stabilnu atmosferu. Tipične vrijednosti LI dane su u Tablici C1.
- K indeks (KI) je mjera atmosferske nestabilnosti koja uzima u obzir temperaturu, relativnu vlagu i termalne karakteristike atmosfere. Niže vrijednosti KI obično ukazuju na veću nestabilnost i mogućnost razvoja grmljavinskih oblaka. Tipične vrijednosti dane su u Tablici C1.
- Konvektivna raspoloživa potencijalna energija (engl. *Convective available potential energy*, CAPE) je mjera energije dostupne za konvektivni razvoj oblaka. Ovaj indeks ukazuje na mogućnost intenzivnog razvoja olujnih oblaka.

**Tablica C1** Opis indeksa nestabilnosti korištenih u radu.

Indeks nestabilnosti	Oznaka i vrijednost indeksa	Stanje atmosfere
Indeks podizanja (engl. <i>Lifted index</i> , LI)	$LI \geq 0$	Stabilno, uz mogućnost slabe konvekcije uz jako dizanje
	$-3 < LI < 3$	Granično nestabilno
	$-6 < LI < -3$	Umjereno nestabilno
	$-9 < LI < -6$	Jako nestabilno
	$LI \leq -9$	Ekstremno nestabilno
K indeks (KI)	$KI < 20$	Stabilno
	$20 \leq KI \leq 30$	Moguće grmljavinsko nevrijeme
	$KI > 30$	Velika vjerojatnost za grmljavinsko nevrijeme
	$KI = 40$	Najbolji potencijal za grmljavinsko nevrijeme
Konvektivna raspoloživa potencijalna energija (engl. <i>Convective available potential energy</i> , CAPE)	$CAPE < 0$	Stabilno
	$0 \leq CAPE < 1000$	Granično nestabilno
	$1000 \leq CAPE < 2500$	Umjereno nestabilno
	$2500 \leq CAPE < 3500$	Jako nestabilno
	$CAPE > 3500$	Ekstremno nestabilno

# Popis literature

- Abatzoglou, J. T., & Williams, A. P. (2016). Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *113*(42), 11770–11775. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1607171113/-DCSUPPLEMENTAL>
- Adams-Selin, R. D., Clark, A. J., Melick, C. J., Dembek, S. R., Jirak, I. L., & Ziegler, C. L. (2019). Evolution of WRF-HAILCAST during the 2014-16 NOAA/Hazardous Weather Testbed Spring Forecasting Experiments. *Weather and Forecasting*, *34*(1), 61–79. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0024.1>
- Adams-Selin, R. D., & Ziegler, C. L. (2016). Forecasting hail using a one-dimensional hail growth model within WRF. *Monthly Weather Review*, *144*(12), 4919–4939. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0027.1>
- Allen, D. J., & Pickering, K. E. (2002). Evaluation of lightning flash rate parameterizations for use in a global chemical transport model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *107*(D23), ACH 15-1-ACH 15-21. <https://doi.org/10.1029/2002JD002066>
- Allen, J. T., Giammanco, I. M., Kumjian, M. R., Jurgen Punge, H., Zhang, Q., Groenemeijer, P., Kunz, M., & Ortega, K. (2020). Understanding Hail in the Earth System. In *Reviews of Geophysics* (Vol. 58, Issue 1). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1029/2019RG000665>
- Altaratz, O. (2005). Simulation of the electrification of winter thunderclouds using the three-dimensional Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) model: Single cloud simulations. *Journal of Geophysical Research*, *110*(D20), D20205. <https://doi.org/10.1029/2004JD005616>
- Baldauf, M., Seifert, A., Förstner, J., Majewski, D., Raschendorfer, M., & Reinhardt, T. (2011). Operational Convective-Scale Numerical Weather Prediction with the COSMO Model: Description and Sensitivities. *Monthly Weather Review*, *139*(12), 3887–3905. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-10-05013.1>
- Baldi, M., Ciardini, V., Dalu, J. D., De Filippis, T., Maracchi, G., & Dalu, G. (2014). Hail occurrence in Italy: Towards a national database and climatology. *Atmospheric Research*, *138*, 268–277. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2013.11.012>
- Ban, N., Caillaud, C., Coppola, E., Pichelli, E., Sobolowski, S., Adinolfi, M., Ahrens, B., Alias, A., Anders, I., Bastin, S., Belušić, D., Berthou, S., Brisson, E., Cardoso, R. M., Chan, S. C., Christensen, O. B., Fernández, J., Fita, L., Frisius, T., ... Zander, M. J. (2021). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, part I: evaluation of precipitation. *Climate Dynamics*, *57*(1–2), 275–302. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05708-w>
- Ban, N., Schmidli, J., & Schär, C. (2014). Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *119*(13), 7889–7907. <https://doi.org/10.1002/2014JD021478>
- Ban, N., Schmidli, J., & Schär, C. (2015). Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster? *Geophysical Research Letters*, *42*(4), 1165–1172.

<https://doi.org/10.1002/2014GL062588>

- Barnes, S. L. (1973). *Mesoscale objective map analysis using weighted time-series observations*. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/17647>
- Barthe, C., Chong, M., Pinty, J. P., Bovalo, C., & Escobar, J. (2012). CELLS v1.0: Updated and parallelized version of an electrical scheme to simulate multiple electrified clouds and flashes over large domains. *Geoscientific Model Development*, 5(1), 167–184. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-167-2012>
- Barthe, C., & Pinty, J.-P. (2007). Simulation of a supercellular storm using a three-dimensional mesoscale model with an explicit lightning flash scheme. *Journal of Geophysical Research*, 112(D6), D06210. <https://doi.org/10.1029/2006JD007484>
- Bechtold, P., Semane, N., Lopez, P., Chaboureau, J. P., Beljaars, A., & Bormann, N. (2014). Representing equilibrium and nonequilibrium convection in large-scale models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71(2), 734–753. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0163.1>
- Belušić, A., Prtenjak, M. T., Güttler, I., Ban, N., Leutwyler, D., & Schär, C. (2018). Near-surface wind variability over the broader Adriatic region: insights from an ensemble of regional climate models. *Climate Dynamics*, 50(11–12), 4455–4480. <https://doi.org/10.1007/S00382-017-3885-5>
- Berthet, C., Dessens, J., & Sanchez, J. L. (2011). Regional and yearly variations of hail frequency and intensity in France. *Atmospheric Research*, 100(4), 391–400. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2010.10.008>
- Betz, H. D., Schmidt, K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W. P., Defer, E., Dziewit, Z., & Konarski, J. (2009). LINET-An international lightning detection network in Europe. *Atmospheric Research*, 91(2–4), 564–573. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.06.012>
- Blašković, L., Jelić, D., Malečić, B., Omazić, B., Guttler, I., & Telišman Prtenjak, M. (n.d.). Trend analysis and climatology of hail in Croatia. *Atmospheric Research*.
- Bougeault, P., & Lacarrere, P. (1989). Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model. *Monthly Weather Review*, 117(8), 1872–1890. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1872:POOITI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1872:POOITI>2.0.CO;2)
- Brimelow, J. C., Reuter, G. W., & Poolman, E. R. (2002a). Modeling maximum hail size in Alberta thunderstorms. *Weather and Forecasting*, 17(5), 1048–1062. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2002\)017<1048:MMHSIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2002)017<1048:MMHSIA>2.0.CO;2)
- Brimelow, J. C., Reuter, G. W., & Poolman, E. R. (2002b). Modeling maximum hail size in Alberta thunderstorms. *Weather and Forecasting*, 17(5), 1048–1062. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2002\)017<1048:MMHSIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2002)017<1048:MMHSIA>2.0.CO;2)
- 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* 2021, 1, 1–15. <https://doi.org/10.1007/S00382-021-05791-Z>
- Brisson, E., Brendel, C., Herzog, S., Ahrens, B., Brisson, E., Brendel, C., Herzog, S., & Ahrens, B. (2018). Lagrangian evaluation of convective shower characteristics in a convection-permitting model;Lagrangian evaluation of convective shower characteristics in a convection-permitting model. *MetZe*, 27(1), 59–66. <https://doi.org/10.1127/METZ/2017/0817>

- Brisson, E., Demuzere, M., & Van Lipzig, N. P. M. (2016). Modelling strategies for performing convection-permitting climate simulations. *Meteorologische Zeitschrift*, 25(2), 149–163. <https://doi.org/10.1127/METZ/2015/0598>
- Brisson, E., Van Weverberg, K., Demuzere, M., Devis, A., Saeed, S., Stengel, M., & van Lipzig, N. P. M. (2016). How well can a convection-permitting climate model reproduce decadal statistics of precipitation, temperature and cloud characteristics? *Climate Dynamics*, 47(9–10), 3043–3061. <https://doi.org/10.1007/S00382-016-3012-Z>
- Brown, T. M., Pogorzelski, W. H., & Giammanco, I. M. (2015). Evaluating hail damage using property insurance claims data. *Weather, Climate, and Society*, 7(3), 197–210. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-15-0011.1>
- Carbone, R. E., Wilson, J. W., Keenan, T. D., & Hacker, J. M. (2000). Tropical island convection in the absence of significant topography.: Part I: Life cycle of diurnally forced convection. *Monthly Weather Review*, 128(10), 3459–3480. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128)
- Carte, A. E., & Kidder, R. E. (1966). Transvaal hailstones. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 92(393), 382–391. <https://doi.org/10.1002/QJ.49709239307>
- Changnon, S. A. (2009). Increasing major hail losses in the U.S. *Climatic Change*, 96(1), 161–166. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9597-z>
- Chen, S.-H., & Sun, W.-Y. (2002). A One-dimensional Time Dependent Cloud Model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 80(1), 99–118.
- Clark, P., Roberts, N., Lean, H., Ballard, S. P., & Charlton-Perez, C. (2016). Convection-permitting models: a step-change in rainfall forecasting. *Meteorological Applications*, 23(2), 165–181. <https://doi.org/10.1002/MET.1538>
- Cohen, A. E., Cavallo, S. M., Coniglio, M. C., & Brooks, H. E. (2015). A review of planetary boundary layer parameterization schemes and their sensitivity in simulating southeastern U.S. cold season severe weather environments. *Weather and Forecasting*, 30(3), 591–612. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-14-00105.1>
- Coniglio, M. C. (2012). Verification of RUC 0–1-h Forecasts and SPC Mesoscale Analyses Using VORTEX2 Soundings. *Weather and Forecasting*, 27(3), 667–683. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-11-00096.1>
- Crook, A. (2001). Understanding Hector: The dynamics of island thunderstorms. *Monthly Weather Review*, 1550–1563. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129)
- Curran, E. B., Holle, R. L., & Lopez, R. E. (2000). Lightning casualties and damages in the United States from 1959 to 1994. *Journal of Climate*, 13(19), 3448–3464. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<3448:LCADIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<3448:LCADIT>2.0.CO;2)
- Czernecki, B., Taszarek, M., Marosz, M., Półrolniczak, M., Kolendowicz, L., Wyszogrodzki, A., & Szturc, J. (2019). Application of machine learning to large hail prediction - The importance of radar reflectivity, lightning occurrence and convective parameters derived from ERA5. *Atmospheric Research*, 227, 249–262. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.05.010>
- Dalezios, N. R., Loukas, A., & Bampzelis, D. (2002). Universal kriging of hail impact energy in Greece. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27(23–24), 1039–1043. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00137-7](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00137-7)
- Davis, C. A., Brown, B., & Bullock, R. (2006). Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Application to convective rain systems. *Monthly Weather Review*, 134(7), 1785–1795.

<https://doi.org/10.1175/MWR3146.1>

- Dessens, J. (1998). A physical evaluation of a hail suppression project with silver iodide ground burners in southwestern France. *Journal of Applied Meteorology*, 37(12), 1588–1599. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1998\)037<1588:APEOAH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1998)037<1588:APEOAH>2.0.CO;2)
- Dowdy, A. J., Fromm, M. D., & McCarthy, N. (2017). Pyrocumulonimbus lightning and fire ignition on Black Saturday in southeast Australia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(14), 7342–7354. <https://doi.org/10.1002/2017JD026577>
- 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(20), 3077–3107. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2)
- Ebert, E. E. (2008). Fuzzy verification of high-resolution gridded forecasts: A review and proposed framework. *Meteorological Applications*, 15(1), 51–64. <https://doi.org/10.1002/met.25>
- Farnell, C., Rigo, T., & Pineda, N. (2017). Lightning jump as a nowcast predictor: Application to severe weather events in Catalonia. *Atmospheric Research*, 183, 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.08.021>
- Farnell, C., Rigo, T., & Pineda, N. (2018). Exploring radar and lightning variables associated with the Lightning Jump. Can we predict the size of the hail? *Atmospheric Research*, 202, 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.019>
- Fawbush, E. J., & Miller, R. C. (1953). A Method for Forecasting Hailstone Size at the Earth's Surface\*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 34(6), 235–244. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-34.6.235>
- Federer, B., Schmid, W., & Waldvogel, A. (1978). The Design of Grossversuch IV, a Randomized Hail Suppression Experiment in Switzerland. *Atmosphere-Ocean*, 16(1), 6–16. <https://doi.org/10.1080/07055900.1978.9649009>
- Federer, B., Thalmann, B., & Jouzel, J. (1982). Stable Isotopes in Hailstones. Part II: Embryo and Hailstone Growth in Different Storms in. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 39(6), 1336–1355. [https://journals.ametsoc.org/view/journals/atmsoc/39/6/1520-0469\\_1982\\_039\\_1336\\_sihipi\\_2\\_0\\_co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/atmsoc/39/6/1520-0469_1982_039_1336_sihipi_2_0_co_2.xml)
- 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(5), 699–713. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-10-05030.1>
- Fierro, A. O., Mansell, E. R., Macgorman, D. R., & Ziegler, C. L. (2013). The implementation of an explicit charging and discharge lightning scheme within the wrf-arw model: Benchmark simulations of a continental squall line, a tropical cyclone, and a winter storm. *Monthly Weather Review*, 141(7), 2390–2415. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00278.1>
- Finney, D. L., Doherty, R. M., Wild, O., Huntrieser, H., Pumphrey, H. C., & Blyth, A. M. (2014). Using cloud ice flux to parametrise large-scale lightning. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(23), 12665–12682. <https://doi.org/10.5194/acp-14-12665-2014>
- Fiori, E., Comellas, A., Molini, L., Rebora, N., Siccardi, F., Gochis, D. J., Tanelli, S., & Parodi, A. (2014a). Analysis and hindcast simulations of an extreme rainfall event in the Mediterranean area: The Genoa 2011 case. *Atmospheric Research*, 138(December 2013), 13–29. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.10.007>

- Fiori, E., Comellas, A., Molini, L., Rebora, N., Siccardi, F., Gochis, D. J., Tanelli, S., & Parodi, A. (2014b). Analysis and hindcast simulations of an extreme rainfall event in the Mediterranean area: The Genoa 2011 case. *Atmospheric Research*, *138*, 13–29. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.10.007>
- Foote, G. A., Krauss, T. W., & Makitov, V. (2005). Hail metrics using convectional Radar. In *Proceedings of the 16th Conference on Planned and Inadvertent Weather Modification*.
- Fowler, H. J., Ali, H., Allan, R. P., Ban, N., Barbero, R., Berg, P., Blenkinsop, S., Cabi, N. S., Chan, S., Dale, M., Dunn, R. J. H., Ekström, M., Evans, J. P., Fosser, G., Golding, B., Guerreiro, S. B., Hegerl, G. C., Kahraman, A., Kendon, E. J., ... Whitford, A. (2021). Towards advancing scientific knowledge of climate change impacts on short-duration rainfall extremes. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *379*(2195). <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0542>
- Franc, B., Filipović-Grčić, B., & Milardić, V. (2016). Lightning overvoltage performance of 110 kV air-insulated substation. *Electric Power Systems Research*, *138*, 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.12.002>
- Gagne, D. J., McGovern, A., Haupt, S. E., Sobash, R. A., Williams, J. K., & Xue, M. (2017). Storm-based probabilistic hail forecasting with machine learning applied to convection-allowing ensembles. *Weather and Forecasting*, *32*(5), 1819–1840. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-17-0010.1>
- Germann, U., Boscacci, M., Gabella, M., & Sartori, M. (2015). *Radar design for prediction in the Swiss Alps*.
- Giaiotti, D., Nordio, S., & Stel, F. (2003). The climatology of hail in the plain of Friuli Venezia Giulia. *Atmospheric Research*, *67–68*, 247–259. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(03\)00084-X](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(03)00084-X)
- Heiblum, R. H., Koren, I., & Altaratz, O. (2011). Analyzing coastal precipitation using TRMM observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *11*(24), 13201–13217. <https://doi.org/10.5194/ACP-11-13201-2011>
- Helsdon, J. H., Wu, G., & Farley, R. D. (1992). An intracloud lightning parameterization scheme for a storm electrification model. *Journal of Geophysical Research*, *97*(D5), 5865. <https://doi.org/10.1029/92JD00077>
- Hentgen, L., Ban, N., Kröner, N., Leutwyler, D., & Schär, C. (2019). Clouds in Convection-Resolving Climate Simulations Over Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *124*(7), 3849–3870. <https://doi.org/10.1029/2018JD030150>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *146*(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Heymsfield, A. J. (1983). Case Study of a Hailstorm in Colorado. Part IV: Graupel and Hail Growth Mechanisms Deduced through Particle Trajectory Calculations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *40*(6), 1482–1509. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1983\)040](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1983)040)
- Heymsfield, A. J., & Musil, D. J. (1982). Case Study of a Hailstorm in Colorado. Part II: Particle Growth Processes at Mid-Levels Deduced from in-situ Measurements. *Cover Journal of the Atmospheric Sciences Journal of the Atmospheric Sciences*, *39*(12), 2847–2866. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/39/12/1520->

- Holle, R. L., López, R. E., & Navarro, B. C. (2005). Deaths, Injuries, and Damages from Lightning in the United States in the 1890s in Comparison with the 1990s. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 44(10), 1563–1573. <https://doi.org/10.1175/JAM2287.1>
- Hong, S., & Lim, J. (2006). The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *Undefined*.
- Hong, S. Y., Noh, Y., & Dudhia, J. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318–2341. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Horvath, K., Koracin, D., Vellore, R., Jiang, J., & Belu, R. (2012). Sub-kilometer dynamical downscaling of near-surface winds in complex terrain using WRF and MM5 mesoscale models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117(11). <https://doi.org/10.1029/2012JD017432>
- Horvath, K., Šepić, J., & Telišman Prtenjak, M. (2019). Atmospheric Forcing Conducive for the Adriatic 25 June 2014 Meteotsunami Event. In *Meteorology and Climatology of the Mediterranean and Black Seas* (pp. 97–117). Birkhäuser, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-11958-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-11958-4_7)
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Kidd, C., Nelkin, E. J., Sorooshian, S., Tan, J., & Xie, P. (2019). *NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) Prepared for: Global Precipitation Measurement (GPM) National Aeronautics and Space Administration (NASA)*. [https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/imce/times\\_allsat.jpg](https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/imce/times_allsat.jpg)
- Javor, V., Stoimenov, L., Džaković, N., Dinkić, N., Javor, D., & Betz, H. D. (2018). LINETGIS analysis of lightning flash density in Serbia based on ten years data. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 15(2), 201–211. <https://doi.org/10.2298/SJEE1802201J>
- Jelić, D. (2022). *Obilježja tuče u sadašnjim i budućim klimatskim uvjetima na području Hrvatske* [Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno matematički fakultet]. <https://dr.nsk.hr/islandora/object/pmf%3A11507>
- Jelić, D., Megyeri, O. A., Malečić, B., Belušić Vozila, A., Strelec Mahović, N., & Telišman Prtenjak, M. (2020a). Hail Climatology Along the Northeastern Adriatic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(23). <https://doi.org/10.1029/2020JD032749>
- Jelić, D., Megyeri, O. A., Malečić, B., Belušić Vozila, A., Strelec Mahović, N., & Telišman Prtenjak, M. (2020b). Hail Climatology Along the Northeastern Adriatic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(23). <https://doi.org/10.1029/2020JD032749>
- Jelić, D., Prtenjak, M. T., Malečić, B., Vozila, A. B., Megyeri, O. A., & Renko, T. (2021). A New Approach for the Analysis of Deep Convective Events: Thunderstorm Intensity Index. *Atmosphere 2021*, Vol. 12, Page 908, 12(7), 908. <https://doi.org/10.3390/ATMOS12070908>
- Jewell, R., & Brimelow, J. (2009). Evaluation of Alberta hail growth model using severe hail proximity soundings from the United States. *Weather and Forecasting*, 24(6), 1592–1609. <https://doi.org/10.1175/2009WAF2222230.1>
- Jirak, I. L., Coniglio, M., Clark, A. J., Correia, J., Knopfmeier, K. H., Melick, C. J., Weiss, S. J., Kain, J. S., Xue, M., Kong, F., Thomas, K. W., Brewster, K., Wang, Y., Jung, Y., & Willington, S. (n.d.). *AN OVERVIEW OF THE 2014 NOAA HAZARDOUS WEATHER TESTBED SPRING FORECASTING EXPERIMENT*. Retrieved April 14, 2021, from



[http://hwt.nssl.noaa.gov/Spring\\_2014/HWT\\_SFE\\_2014](http://hwt.nssl.noaa.gov/Spring_2014/HWT_SFE_2014)

- Joe, P., Burgess, D., Potts, R., Keenan, T., Stumpf, G., & Treloar, A. (2004). The S2K severe weather detection algorithms and their performance. *Weather and Forecasting*, 19(1), 43–63. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2004\)019<0043:TSSWDA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2004)019<0043:TSSWDA>2.0.CO;2)
- Johns, R. H., & Doswell, C. A. (1992). Severe Local Storms Forecasting. *Weather and Forecasting*, 7(4), 588–612. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1992\)007<0588:slsf>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1992)007<0588:slsf>2.0.co;2)
- Jurković, P. M., Mahović, N. S., & Počakal, D. (2015). Lightning, overshooting top and hail characteristics for strong convective storms in Central Europe. *Atmospheric Research*, 161–162, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.03.020>
- Kain, J. S., & Kain, J. (2004). The Kain - Fritsch convective parameterization: An update. *Journal of Applied Meteorology*, 43(1), 170–181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2)
- Kain, J. S., Weiss, S. J., Bright, D. R., Baldwin, M. E., Levit, J. J., Carbin, G. W., Schwartz, C. S., Weisman, M. L., Droegemeier, K. K., Weber, D., & Thomas, K. W. (2008). Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP. *Weather and Forecasting*, 100804092600065. <https://doi.org/10.1175/2008waf2007106.1>
- 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(2), 167–181. <https://doi.org/10.1175/WAF906.1>
- Kanata, J., Ametani, A., & Yamamoto, K. (2012). Threats of lightning current through an electric vehicle. *2012 31st International Conference on Lightning Protection, ICLP 2012*. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2012.6344299>
- Kehler-Poljak, G., Prtenjak, M. T., Kvakić, M., Šariri, K., & Večenaj, Ž. (2017). Interaction of Sea Breeze and Deep Convection over the Northeastern Adriatic Coast: An Analysis of Sensitivity Experiments Using a High-Resolution Mesoscale Model. *Pure and Applied Geophysics* 2017 174:11, 174(11), 4197–4224. <https://doi.org/10.1007/S00024-017-1607-X>
- Kehler-Poljak, G., Telišman Prtenjak, M., Kvakić, M., Šariri, K., & Večenaj, Ž. (2017). Interaction of Sea Breeze and Deep Convection over the Northeastern Adriatic Coast: An Analysis of Sensitivity Experiments Using a High-Resolution Mesoscale Model. *Pure and Applied Geophysics*, 174(11), 4197–4224. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1607-x>
- Keller, M., Fuhrer, O., Schmidli, J., Stengel, M., Stöckli, R., & Schär, C. (2016). Evaluation of convection-resolving models using satellite data: The diurnal cycle of summer convection over the Alps. *Meteorologische Zeitschrift*, 25(2), 165–179. <https://doi.org/10.1127/METZ/2015/0715>
- Klasa, C., Arpagaus, M., Walser, A., & Wernli, H. (2018). An evaluation of the convection-permitting ensemble COSMO-E for three contrasting precipitation events in Switzerland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(712), 744–764. <https://doi.org/10.1002/QJ.3245>
- 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*, 1990–2000. [https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/32/10/1520-0469\\_1975\\_032\\_1990\\_ratvod\\_2\\_0\\_co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/32/10/1520-0469_1975_032_1990_ratvod_2_0_co_2.xml)

- Kotinis-Zambakas, S. . (1989). Average Spatial Patterns of Hail Days in Greece. *Journal of Climate*, 2, 508–511. <https://www.semanticscholar.org/paper/Average-Spatial-Patterns-of-Hail-Days-in-Greece-Kotinis-Zambakas/eee727b2bf8e81bc07e71d597be9114fa095d3dd>
- Kunz, M., Blahak, U., Handwerker, J., Schmidberger, M., Punge, H. J., Mohr, S., Fluck, E., & Bedka, K. M. (2018). The severe hailstorm in southwest Germany on 28 July 2013: characteristics, impacts and meteorological conditions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(710), 231–250. <https://doi.org/10.1002/qj.3197>
- Lagasio, M., Parodi, A., Procopio, R., Rachidi, F., & Fiori, E. (2017a). Lightning potential index performances in multimicrophysical cloud-resolving simulations of a back-building mesoscale convective system: The Genoa 2014 event. *Journal of Geophysical Research*, 122(8), 4238–4257. <https://doi.org/10.1002/2016JD026115>
- Lagasio, M., Parodi, A., Procopio, R., Rachidi, F., & Fiori, E. (2017b). Lightning potential index performances in multimicrophysical cloud-resolving simulations of a back-building mesoscale convective system: The Genoa 2014 event. In *Journal of Geophysical Research* (Vol. 122, Issue 8, pp. 4238–4257). <https://doi.org/10.1002/2016JD026115>
- Latham, D., & Williams, E. (2001). Lightning and Forest Fires. *Forest Fires*, 375–418. <https://doi.org/10.1016/B978-012386660-8/50013-1>
- Lavin-Gullon, A., Fernandez, J., Bastin, S., Cardoso, R. M., Fita, L., Giannaros, T. M., Goergen, K., Gutierrez, J. M., Kartsios, S., Katragkou, E., Lorenz, T., Milovac, J., Soares, P. M. M., Sobolowski, S., & Warrach-Sagi, K. (2021). Internal variability versus multi-physics uncertainty in a regional climate model. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E656–E671. <https://doi.org/10.1002/joc.6717>
- Lee, J. Y., & Collins, G. J. (2017). Risk analysis of lightning effects in aircraft systems. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/AERO.2017.7943671>
- Leutwyler, D., Lüthi, D., Ban, N., Fuhrer, O., & Schär, C. (2017). Evaluation of the convection-resolving climate modeling approach on continental scales. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(10), 5237–5258. <https://doi.org/10.1002/2016JD026013>
- Lin, Y. L., Farley, R. D., & Orville, H. D. (1983). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Climate & Applied Meteorology*, 22(6), 1065–1092. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2)
- Lopez, P. (2016). A Lightning Parameterization for the ECMWF Integrated Forecasting System. *Monthly Weather Review*, 144(9), 3057–3075. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0026.1>
- Lynn, B. H., & Yair, Y. Y. (2008). Lightning Power Index: A new tool for predicting the lightning density and the potential for extreme rainfall. In *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 10).
- MacGorman, D. R., Straka, J. M., & Ziegler, C. L. (2001). A lightning parameterization for numerical cloud models. *Journal of Applied Meteorology*, 40(3), 459–478. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<0459:ALPFNC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<0459:ALPFNC>2.0.CO;2)
- Malečić, B., Prtenjak, M. T., Horvath, K., Jelić, D., Jurković, P. M., Ćorko, K., & Mahović, N. S. (2022). Performance of HAILCAST and the Lightning Potential Index in simulating hailstorms in Croatia in a mesoscale model – Sensitivity to the PBL and microphysics parameterization schemes. *Atmospheric Research*, 272(March), 106143. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106143>
- Mansell, E. R. (2005). Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm. *Journal of Geophysical Research*, 110(D12), D12101.

<https://doi.org/10.1029/2004JD005287>

- Mansell, E. R., Ziegler, C. L., & Bruning, E. C. (2010). Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(1), 171–194. <https://doi.org/10.1175/2009JAS2965.1>
- Manzato, A. (2008). A verification of numerical model forecasts for sounding-derived indices above Udine, northeast Italy. *Weather and Forecasting*, 23(3), 477–495. <https://doi.org/10.1175/2007WAF2007018.1>
- Manzato, A. (2012). Hail in Northeast Italy: Climatology and Bivariate Analysis with the Sounding-Derived Indices. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(3), 449–467. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-10-05012.1>
- Manzato, A. (2013). Hail in Northeast Italy: A neural network ensemble forecast using sounding-derived indices. *Weather and Forecasting*, 28(1), 3–28. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-12-00034.1>
- Manzato, A., Pucillo, A., & Cicogna, A. (2018). Improving ECMWF-based 6-hours maximum rain using instability indices and neural networks. *Atmospheric Research*, 217, 184–197. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.10.020>
- Manzato, A., Riva, V., Tiesi, A., & Marcello Miglietta, M. (2020). Observational analysis and simulations of a severe hailstorm in northeastern Italy. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(732), 3587–3611. <https://doi.org/10.1002/qj.3886>
- Marzban, C., & Witt, A. (2001). A Bayesian neural network for severe-hail size prediction. *Weather and Forecasting*, 16(5), 600–610. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2001\)016<0600:ABNNFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2001)016<0600:ABNNFS>2.0.CO;2)
- Mazón, J., & Pino, D. (2013). The role of sea-land air thermal difference, shape of the coastline and sea surface temperature in the nocturnal offshore convection. *Tellus*, 65, 20027. <https://doi.org/10.3402/TELLUSA.V65I0.20027>
- 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. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2011.09.016>
- Milovac, J., Warrach-Sagi, K., Behrendt, A., Späth, F., Ingwersen, J., & Wulfmeyer, V. (2016). Investigation of PBL schemes combining the WRF model simulations with scanning water vapor differential absorption lidar measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(2), 624–649. <https://doi.org/10.1002/2015JD023927>
- 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(14), 16663–16682. <https://doi.org/10.1029/97jd00237>
- Moore, J. T., & Pino, J. P. (1990). An Interactive Method for Estimating Maximum Hailstone Size from Forecast Soundings. *Weather and Forecasting*, 5(3), 508–525. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1990\)005<0508:aimfem>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1990)005<0508:aimfem>2.0.co;2)
- Morel, S. (2014). *Verification of radar-based hail detection algorithms with insurance loss data in Switzerland*. 83.
- MORGAN, G. M. (1972). On the Growth of Large Hail in: Monthly Weather Review Volume 100 Issue 3 (1972). *Cover Monthly Weather Review Monthly Weather Review*, 100(3), 196–205.

[https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/100/3/1520-0493\\_1972\\_100\\_0196\\_otgolh\\_2\\_3\\_co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/100/3/1520-0493_1972_100_0196_otgolh_2_3_co_2.xml)

- Morrison, H., Thompson, G., & Tatarskii, V. (2009). Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes. *Monthly Weather Review*, 137(3), 991–1007. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2556.1>
- Murphy, A. H. (1988). Skill Scores Based on the Mean Square Error and Their Relationships to the Correlation Coefficient. *Monthly Weather Review*, 116(12), 2417–2424. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116)
- Musil, D. J., Heymsfield, A. J., & Smith, P. L. (1986). Microphysical Characteristics of a Well-Developed Weak Echo Region in a High Plains Supercell Thunderstorm. *Cover Journal of Applied Meteorology and Climatology Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1037–1051. [https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/25/7/1520-0450\\_1986\\_025\\_1037\\_mcoawd\\_2\\_0\\_co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/25/7/1520-0450_1986_025_1037_mcoawd_2_0_co_2.xml)
- 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(2), 397–407. <https://doi.org/10.1007/s10546-005-9030-8>
- Nelson, S. P. (1983). The influence of storm flow structure on hail growth. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 40(8), 1965–1983. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1983\)040<1965:TIOSFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1983)040<1965:TIOSFS>2.0.CO;2)
- Nisi, L., Martius, O., Hering, A., Kunz, M., & Germann, U. (2016). Spatial and temporal distribution of hailstorms in the Alpine region: A long-term, high resolution, radar-based analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(697), 1590–1604. <https://doi.org/10.1002/qj.2771>
- Orlić, M., Belušić, D., Janeković, I., & Pasarić, M. (2010). Fresh evidence relating the great Adriatic surge of 21 June 1978 to mesoscale atmospheric forcing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C6), 6011. <https://doi.org/10.1029/2009JC005777>
- Park, S. H., Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Fowler, L. D., & Duda, M. G. (2013). Evaluation of global atmospheric solvers using extensions of the jablonowski and williamson baroclinic wave test case. *Monthly Weather Review*, 141(9), 3116–3129. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00096.1>
- Peirce, C. S. (1884). The numerical measure of the success of predictions. *Science*, 4(93), 453–454. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.NS-4.93.453-A>
- Penzar, B., Penzar, I., & Orlić, M. (2001). *Weather and Climate of the Croatian Adriatics*.
- Philippe Lopez. (2018). Promising results for lightning predictions | ECMWF. In *ECMWF Newsletter 155* (pp. 14–19). doi:10.21957/plz731tyg2
- Pichelli, E., Coppola, E., Sobolowski, S., Ban, N., Giorgi, F., Stocchi, P., Alias, A., Belušić, D., Berthou, S., Caillaud, C., Cardoso, R. M., Chan, S., Christensen, O. B., Dobler, A., de Vries, H., Goergen, K., Kendon, E. J., Keuler, K., Lenderink, G., ... Vergara-Temprado, J. (2021). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution part 2: historical and future simulations of precipitation. *Climate Dynamics*, 56(11–12), 3581–3602. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05657-4>
- Pinty, J. P., & Barthe, C. (2008). Ensemble simulation of the lightning flash variability in a 3D cloud model with parameterization of cloud electrification and lightning flashes. *Monthly Weather*

- Review, 136(1), 380–387. <https://doi.org/10.1175/2007MWR2186.1>
- Pocakal, D. (2011). Hailpad data analysis for the continental part of Croatia. *Meteorologische Zeitschrift*, 20(4), 441–447. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/0263>
- 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(15), 5646–5658. <https://doi.org/10.1002/joc.5769>
- Počakal, D., Večenaj, Ž., & Štalec, J. (2009a). Hail characteristics of different regions in continental part of Croatia based on influence of orography. *Atmospheric Research*, 93(1–3), 516–525. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2008.10.017>
- Počakal, D., Večenaj, Ž., & Štalec, J. (2009b). Hail characteristics of different regions in continental part of Croatia based on influence of orography. *Atmospheric Research*, 93(1–3), 516–525. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.10.017>
- Poljak, G., Prtenjak, M. T., Kvakić, M., Strelec Mahovič, N., & Babić, K. (2014). Wind patterns associated with the development of daytime thunderstorms over Istria. *Annales Geophysicae*, 32(4), 401–420. <https://doi.org/10.5194/angeo-32-401-2014>
- Poljak, G., Prtenjak, M. T., Kvakić, M., Strelec Mahovič, N., Babić, K., Poljak, G., Prtenjak, M. T., Kvakić, M., Strelec Mahovič, N., & Babić, K. (2014). Wind patterns associated with the development of daytime thunderstorms over Istria. *AnGeo*, 32(4), 401–420. <https://doi.org/10.5194/ANGEO-32-401-2014>
- 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*.
- Prein, A. F., Holland, G. J., Rasmussen, R. M., Done, J., Ikeda, K., Clark, M. P., & Liu, C. H. (2013). Importance of Regional Climate Model Grid Spacing for the Simulation of Heavy Precipitation in the Colorado Headwaters. *Journal of Climate*, 26(13), 4848–4857. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00727.1>
- Púčik, T., Castellano, C., Groenemeijer, P., Kühne, T., Rädler, A. T., Antonescu, B., & Faust, E. (2019). Large hail incidence and its economic and societal impacts across Europe. *Monthly Weather Review*, 147(11), 3901–3916. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0204.1>
- Punge, H. J., Bedka, K. M., Kunz, M., & Werner, A. (2014). A new physically based stochastic event catalog for hail in Europe. *Natural Hazards*, 73(3), 1625–1645. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1161-0>
- Punge, H. J., & Kunz, M. (2016). Hail observations and hailstorm characteristics in Europe: A review. *Atmospheric Research*, 176–177, 159–184. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.012>
- Rachidi, F., Rubinstein, M., Montanyà, J., Bermúdez, J. L., Sola, R. R., Solà, G., & Korovkin, N. (2008). A review of current issues in lightning protection of new-generation wind-turbine blades. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6), 2489–2496. <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.896443>
- Rakov, V. A. (2013). The Physics of Lightning. *Surveys in Geophysics*, 34(6), 701–729. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9230-6>
- Raupach, T. H., Martius, O., Allen, J. T., Kunz, M., Lasher-Trapp, S., Mohr, S., Rasmussen, K. L., Trapp, R. J., & Zhang, Q. (n.d.). The effects of climate change on hailstorms. *Nature Reviews Earth & Environment*. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00133-9>

- Raupach, T. H., Martius, O., Allen, J. T., Kunz, M., Lasher-Trapp, S., Mohr, S., Rasmussen, K. L., Trapp, R. J., & Zhang, Q. (2021). The effects of climate change on hailstorms. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(3), 213–226. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00133-9>
- Raupach, T. H., Martynov, A., Nisi, L., Hering, A., Barton, Y., & Martius, O. (2021). Object-based analysis of simulated thunderstorms in Switzerland: application and validation of automated thunderstorm tracking on simulation data. *Geoscientific Model Development Discussions*, May, 1–29. <https://doi.org/10.5194/gmd-2021-105>
- Reinhardt, T., & Seifert, A. (2006). A Three-Category Ice Scheme For LMK. *COSMONewsletter*, 6, 115–120.
- Renko, T., Ivušić, S., Telišman Prtenjak, M., Šoljan, V., & Horvat, I. (2018). Waterspout Forecasting Method Over the Eastern Adriatic Using a High-Resolution Numerical Weather Model. *Pure and Applied Geophysics*, 175(11), 3759–3778. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1833-x>
- Ritter, B., & Geleyn, J. F. (1992). A Comprehensive Radiation Scheme for Numerical Weather Prediction Models with Potential Applications in Climate Simulations. *Monthly Weather Review*, 120, 303–325.
- 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(6211), 851–854. <https://doi.org/10.1126/science.1259100>
- Santos, J. A., & Belo-Pereira, M. (2018). A comprehensive analysis of hail events in Portugal: Climatology and consistency with atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*, 39(1), 188–205. <https://doi.org/10.1002/JOC.5794>
- Saunders, C. (2008). Charge separation mechanisms in clouds. *Space Science Reviews*, 137(1–4), 335–353. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9345-0>
- Schär, C., Fuhrer, O., Arteaga, A., Ban, N., Charpiloz, C., Di Girolamo, S., Hentgen, L., Hoeffler, T., Lapillonne, X., Leutwyler, D., Osterried, K., Panosetti, D., Rüdisühli, S., Schlemmer, L., Schulthess, T. C., Sprenger, M., Ubbiali, S., & Wernli, H. (2020). Kilometer-Scale Climate Models: Prospects and Challenges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(5), E567–E587. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0167.1>
- Schuster, S. S., Blong, R. J., Leigh, R. J., & McAneney, K. J. (2005). Characteristics of the 14 April 1999 Sydney hailstorm based on ground observations, weather radar, insurance data and emergency calls. *Natural Hazards and Earth System Science*, 5(5), 613–620. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-613-2005>
- Šepić, J., Vilibić, I., & Belušić, D. (2009). Source of the 2007 Ist meteotsunami (Adriatic Sea). *J. Geophys. Res.*, 114, 3016. <https://doi.org/10.1029/2008JC005092>
- Sioutas, M., Meaden, T., & Webb, J. D. C. (2009). Hail frequency, distribution and intensity in Northern Greece. *Atmospheric Research*, 93(1–3), 526–533. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2008.09.023>
- Skamarock, C., Klemp, B., Dudhia, J., Gill, O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, G., Duda, G., Barker, D., & Huang, X. (2019). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. *NCAR Technical Notes*. <https://doi.org/10.5065/1DFH-6P97>
- Skamarock, W. C. (2004). Evaluating Mesoscale NWP Models Using Kinetic Energy Spectra. *Monthly Weather Review*, 132(12), 3019–3032. <https://doi.org/10.1175/MWR2830.1>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang,

- W., & Powers, J. G. (2008). *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*.
- Smith, P. L., & Waldvogel, A. (1989). On Determinations of Maximum Hailstone Sizes from Hallpad Observations. *Journal of Applied Meteorology*, 28(1), 71–76. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1989\)028<0071:odomhs>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1989)028<0071:odomhs>2.0.co;2)
- Sokol, Z., & Minářová, J. (2020). Impact of 1- and 2-moment cloud microphysics and horizontal resolution on lightning Potential Index within COSMO NWP model. *Atmospheric Research*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104862>
- Svabik, O. (1989). Review of meteorological aspects on hail defense activities in Austria. *Theoretical and Applied Climatology* 1989 40:4, 40(4), 247–254. <https://doi.org/10.1007/BF00865975>
- Takacs, L. L. (1985). A two-step scheme for the advection equation with minimized dissipation and dispersion errors - NASA Technical Reports Server (NTRS). *Monthly Weather Review* , 113(0027–0644). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19850060031>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 106(D7), 7183–7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Thornton, J. A., Virts, K. S., Holzworth, R. H., & Mitchell, T. P. (2017). Lightning enhancement over major oceanic shipping lanes. *Geophysical Research Letters*, 44(17), 9102–9111. <https://doi.org/10.1002/2017GL074982>
- Tiedtke, M. (1989). A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Monthly Weather Review*, 117(8), 1779–1800. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2)
- Tiesi, A., LastNameMazzà, S., Conte, D., Ricchi, A., Baldini, L., Montopoli, M., Picciotti, E., Vulpiani, G., Ferretti, R., & Miglietta, M. M. (2022). Numerical Simulation of a Giant-Hail-Bearing Mediterranean Supercell in the Adriatic Sea. *Atmosphere* 2022, Vol. 13, Page 1219, 13(8), 1219. <https://doi.org/10.3390/ATMOS13081219>
- Trefalt, S., Martynov, A., Barras, H., Besic, N., Hering, A. M., Lenggenhager, S., Noti, P., Röthlisberger, M., Schemm, S., Germann, U., & Martius, O. (2018). A severe hail storm in complex topography in Switzerland - Observations and processes. *Atmospheric Research*, 209, 76–94. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.03.007>
- Tsenova, B. D., & Mitzeva, R. P. (2009). New parameterization of non-inductive charge transfer based on previous laboratory experiments. *Atmospheric Research*, 91(1), 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.07.001>
- Tuovinen, J. P., Punkka, A. J., Rauhala, J., Hohti, H., & Schultz, D. M. (2009). Climatology of severe hail in Finland: 1930-2006. *Monthly Weather Review*, 137(7), 2238–2249. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2707.1>
- Uman, M. A. (1987). *The lightning discharge*. 377.
- van den Broeke, M. S., Schultz, D. M., Johns, R. H., Evans, J. S., & Hales, J. E. (2005). Cloud-to-ground lightning production in strongly forced, low-instability, convective lines associated with damaging wind. *Weather and Forecasting*, 20(4), 517–530. <https://doi.org/10.1175/WAF876.1>
- Waldvogel, A., Federer, B., & Grimm, P. (1979). Criteria for detection of hail cells. *Journal of Applied Meteorology*, 18(12), 1521–1525. <https://doi.org/10.1175/1520->



0450(1979)018<1521:CFTDOH>2.0.CO;2

- Weisman, M. L., Skamarock, W. C., & Klemp, J. B. (1997). The resolution dependence of explicitly modeled convective systems. *Monthly Weather Review*, *125*(4), 527–548. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<0527:TRDOEM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<0527:TRDOEM>2.0.CO;2)
- Wernli, H., Paulat, M., Hagen, M., & Frei, C. (2008). SAL - A novel quality measure for the verification of quantitative precipitation forecasts. *Monthly Weather Review*, *136*(11), 4470–4487. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2415.1>
- Willemse, S., & Furger, M. (2016). *From weather observations to atmospheric and climate sciences in Switzerland. Celebrating 100 years of the Swiss Society of Meteorology.*
- Witt, A., Eilts, M. D., Stumpf, G. J., Johnson, J. T., Mitchell, E. D., & Thomas, K. W. (1998). An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D. *Weather and Forecasting*, *13*(2), 286–303. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<0286:AEHDAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<0286:AEHDAF>2.0.CO;2)
- Xu, X., Xue, M., Wang, Y., & Huang, H. (2017). Mechanisms of secondary convection within a Mei-Yu frontal mesoscale convective system in eastern China. *Journal of Geophysical Research*, *122*(1), 47–64. <https://doi.org/10.1002/2016JD026017>
- Yair, Y., Lynn, B., Price, C., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Morin, E., Mugnai, A., & Del Carmen Llasat, M. (2010). Predicting the potential for lightning activity in Mediterranean storms based on the Weather Research and Forecasting (WRF) model dynamic and microphysical fields. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *115*(4). <https://doi.org/10.1029/2008JD010868>
- Zeman, C., Wedi, N. P., Dueben, P. D., Ban, N., & Schär, C. (2021). Model intercomparison of COSMO 5.0 and IFS 45r1 at kilometer-scale grid spacing. *Geosci. Model Dev*, *14*, 1–23. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-1-2021>
- Ziegler, C. L., Ray, P. S., & Knight, N. C. (1983). Hail Growth in an Oklahoma Multicell Storm. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *40*(7), 1768–1791. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1983\)040](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1983)040)

# Životopis

Barbara Malečić

Rođena sam u Zaboku, 25.12.1994.

Zvanje: magistra fizike-geofizike

U svibnju 2019. godine zapošljam se na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu kao asistent iz područja prirodnih znanosti na projektu SWALDRIC („*Severe Weather over the Alpine-Adriatic region*“) financiranog iz hrvatsko-švicarskog programa suradnje. Doktorski studij fizike smjer geofizike upisujem u studenom 2019. godine na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Tijekom doktorskog studija ostvarila sam važne suradnje sa znanstvenicima međunarodnih institucija te sam bila koautorica na njih 8 i to 7 objavljenih radova i jedan koji je u zadnjoj fazi objavljivanja i to kao prvi autor na njih dva (članci pod brojem 1 i 4). Tijekom lipnja i srpnja 2022. godine boravila sam na ETH sveučilištu u Zürichu prilikom čega je produbljena suradnja sa suradnicima na SWALDRIC projektu. Svoje rezultate predstavila sam na znanstvenim međunarodnim skupovima tijekom kojih sam osobno prezentirala 2 postera i 6 usmenih izlaganja od ukupno 20 konferencijskih izlaganja kao koautor.

Primljene nagrade i priznanja:

- (i) Rektorova nagrada 2017. godine.
- (ii) Nagrada Hrvatskog meteorološkog društva za najbolji diplomski rad iz područja meteorologije i klimatologije 2019. godine.
- (iii) Dobivena stipendija za sudjelovanje na radionici nextGEMS projekta u Beču.

U radu sa studentima (Karol Ćorko, 2019.; Anna-Maria Križanac, 2020.) sudjelujem u izradi diplomskih radova od kojih sam na jednom neposredni voditelj.

Volonterka sam na projektu KvarnerExtrem Hrvatskog meteorološkog društva.

Tijekom svog doktorskog studija, bavim se promocijom znanosti sudjelovanjem na manifestacijama Europska noć istraživača, Dan i noć PMF-a i Smotra Sveučilišta u Zagrebu.

Osim istraživačke aktivnosti članica sam Hrvatskog meteorološkog društva i Europske geofizičke unije.

# Lista publikacija

## Izvorni znanstveni i pregledni radovi u CC časopisima

Neobjavljeni radovi u postupku:

1. Brown, P.G., McCausland, P.J.A., Hildebrand, A.R., Hanton, L.T.J., Eckart, L.M., Busemann, H., Krietsch, D., Maden, C., Welten, K., Caffee, M.W., Laubenstein, M., Vida, D., Ciceri, F., Silber, E., Herd, C.D.K., Hill, P., Devillepoix, H., Sansom, E.K., Cupák, M., Anderson, S., Flemming, R.L., Nelson, A.J., Mazur, M., Moser, D.E., Cooke, W.J., Hladiuk, D., **Malečić, B.**, Telišman Prtenjak, M., Nowell, R. (The Golden Meteorite Consortium) (2023.): The Golden Meteorite Fall: Fireball Trajectory, Orbit and Characterization. *Meteoritics and Planetary Science* (prihvaćen za objavljivanje) (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)

Objavljeno:

1. **Malečić, Barbara**; Cui, Ruoyi; Demory, Marie-Estelle; Horvath, Kristian; Jelic, Damjan; Schär, Christoph; Telišman Prtenjak, Maja; Velasquez, Patricio; Ban, Nikolina: Simulating Hail and Lightning over the Alpine Adriatic Region - A model Intercomparison Study. (2023.) // *Journal of geophysical research. Atmospheres*, u tisku, DOI: 10.1002/essoar.10512594.1 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)
2. Blašković, Lucija; Jelić, Damjan; **Malečić, Barbara**; Omazić, Branimir; Güttler, Ivan; Telišman Prtenjak, Maja: Trend analysis and climatology of hail in Croatia. (2023.) *Atmospheric Research* (prihvaćen za objavljivanje), (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)
3. Tomašević Čavlina, Ivana; Cheung, Kevin; Vučetić, Višnja; Fox-Hughes, Paul; Horvath, Kristian; Telišman Prtenjak, Maja; Beggs, Paul J.; **Malečić, Barbara**; Milić, Velimir: The 2017 Split wildfire in Croatia: Evolution and the role of meteorological conditions. (2022.) // *Natural hazards and earth system sciences*, 22, 3143-3165 doi:10.5194/nhess-2022-116 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)
4. **Malečić, Barbara**; Telišman Prtenjak, Maja; Horvath, Kristian; Jelić, Damjan; Mikuš Jurković, Petra; Ćorko, Karol; Strelec Mahović, Nataša: Performance of HAILCAST and the Lightning Potential Index in simulating hailstorms in Croatia in a mesoscale model – Sensitivity to the PBL and microphysics parameterization schemes. (2022.) //

*Atmospheric Research*, 272, 106143, doi:10.1016/j.atmosres.2022.106143  
(međunarodna recenzija, članak, znanstveni)

5. Večenaj, Željko; **Malečić, Barbara**; Grisogono, Branko: Estimation of Turbulent Triplet Covariances for Bora Flows. (2021.) // *Fluids*, 6, 12; 452, 14 doi:10.3390/fluids6120452 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)
6. Jelić, Damjan; Telišman Prtenjak, Maja; **Malečić, Barbara**; Belušić Vozila, Andreina; Megyeri, Otilia Anna; Renko, Tanja: A new approach for the analysis of deep convective events: Thunderstorm Intensity Index. (2021.) // *Atmosphere*, 12, 7; 908, 28 doi:10.3390/atmos12070908 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)
7. Jelić, Damjan; Megyeri, Otilia Anna; **Malečić, Barbara**; Belušić Vozila, Andreina; Strelec Mahović, Nataša; Telišman Prtenjak, Maja: Hail climatology along the northeastern Adriatic. (2020.) // *Journal of geophysical research. Atmospheres*, 125, 23; e2020JD032749, 17 doi.org/10.1029/2020JD032749 (međunarodna recenzija, članak, znanstveni)

## Sažetci sa skupova

1. Telišman Prtenjak, Maja; Blašković, Lucija; Jelić, Damjan; **Malečić, Barbara**; Omazić, Branimir : Trend analysis and climatology of hail in Croatia // 9th International Conference on Meteorology and Climatology of the Mediterranean. Genova, Italija, 2023. (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
2. Jelić, Damjan; Telišman Prtenjak, Maja; **Malečić, Barbara**; Renko, Tanja: INTRODUCTION TO NEW THUNDERSTORM INTENSITY INDEX (TSII). // Knjiga sažetaka, MI8, Zagreb, Hrvatska, 2022. str. 24-24 (predavanje, sažetak, znanstveni)
3. Blašković, Lucija; Jelić, Damjan; **Malečić, Barbara**; Omazić, Branimir; Telišman Prtenjak, Maja: Characteristics of hail in the Croatian coastal part of the Adriatic. // European Geosciences Union, Beč, Austrija, 2022. (predavanje, međunarodna recenzija, neobjavljeni rad, znanstveni)
4. **Malečić, Barbara**; Cui, Ruoyi; Jelić, Damjan; Horvath, Kristian; Telišman Prtenjak, Maja; Ban, Nikolina; Demory, Marie-Estelle; Mikuš Jurković, Petra; Strelec Mahović, Nataša; Schär, Christoph: Performance of HAILCAST and lightning potential index coupled with WRF and COSMO in convection-permitting simulations of hailstorms over the Alpine-Adriatic region. // European Geophysical Union General Assembly 2022, Beč, Austrija, 2022. (predavanje, međunarodna recenzija, neobjavljeni rad, znanstveni)
5. Blašković, Lucija; Jelić, Damjan; **Malečić, Barbara**; Omazić, Branimir; Telišman Prtenjak, Maja: National hail climatology of Croatia. // EMS 2022, Bonn, Njemačka, 2022. (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

6. **Malečić, Barbara**; Cui, Ruoyi; Jelić, Damjan; Telišman Prtenjak, Maja; Horvath, Kristian; Ban, Nikolina; Demory, Marie-Estelle; Mikuš Jurković, Petra; Strelec Mahović, Nataša; Schär, Christoph: Convection-permitting simulations of hailstorms and lightning activity over the Alpine-Adriatic region using COSMO and WRF models. // Meteorološki izazovi 8, Zagreb, Hrvatska, 2022. (predavanje, međunarodna recenzija, neobjavljeni rad, znanstveni)
7. Blašković, Lucija; Jelić, Damjan; **Malečić, Barbara**; Omazić, Branimir; Telišman Prtenjak, Maja: Characteristics of hail on the Croatian Adriatic coast. // Meteorološki izazovi 8 - Zrak koji udišemo zrak, koji prognoziramo / Challenges in meteorology 8 - The air we breathe, the air we forecast, Zagreb, Hrvatska, 2022. str. 1-1 (predavanje, domaća recenzija, sažetak, znanstveni)
8. **Malečić, Barbara**; Jelić, Damjan; Blašković, Lucija; Križanac, Anna-Maria; Horvath, Kristian; Telišman Prtenjak, Maja: Triggering and evolution of early morning hail over the Croatian coast – convection-permitting modeling study. // EMS Annual Meeting 2022, Bonn, Njemačka, 2022. (poster, recenziran, neobjavljeni rad, znanstveni)
9. Jelić, Damjan; **Malečić, Barbara**; Telišman Prtenjak, Maja; Belušić Vozila, Andreina; Renko, Tanja; Megyeri, Otilia Anna: Inspection of new thunderstorm intensity index. // EGU General Assembly 2021, Beč, 2021. EGU21-16163, 1 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
10. Jelić, Damjan; **Malečić, Barbara**; Telišman Prtenjak, Maja; Renko, Tanja; Megyeri, Otilia Anna; Belušić Vozila, Andreina: Potential uses of new Thunderstorm Intensity Index. // 3rd European Hail Workshop, Online skup (njemačka), 2021. na., 1 (poster, neobjavljeni rad, znanstveni)
11. **Malečić, Barbara**; Jelić, Damjan; Horvath, Kristian; Strelec Mahović, Nataša; Mikuš Jurković, Petra; Babić, Karmen; Telišman Prtenjak, Maja: Performance of HAILCAST and Lightning Potential Index in simulating hail events over Croatia – sensitivity to microphysics and PBL parameterization schemes. // 3rd European Hail Workshop, Karlsruhe, Njemačka, 2021. (predavanje, međunarodna recenzija, pp prezentacija, ostalo)
12. **Malečić, Barbara**; Jelić, Damjan; Telišman Prtenjak, Maja; Horvath, Kristian; Strelec Mahović, Nataša; Mikuš Jurković, Petra: Lightning Potential Index performance in convection-permitting simulations of hail events in Croatia – sensitivity to microphysics and PBL schemes. // 8th International Conference on Meteorology and Climatology of the Mediterranean, Virtualno, 2021. (predavanje, neobjavljeni rad, znanstveni)
13. **Malečić, Barbara**; Jelić, Damjan; Horvath, Kristian; Babić, Karmen; Telišman Prtenjak, Maja; Strelec Mahović, Nataša; Mikuš Jurković, Petra: Simulation of hail events with the WRF - HAILCAST model - sensitivity to microphysics and PBL parameterization schemes.

// EGU 2020, Beč, Austrija, 2020. str. 1-1 (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

14. (SWALDRIC) Damjan Jelić, **Barbara Malečić**, Barbara Vodarić Šurija, Maja Telišman Prtenjak: Estimation of hail using lightning vs radar data, Case study of 25 June 2017. // Meteorološki izazovi 7, Zagreb, Hrvatska, 2020. (predavanje, neobjavljeni rad, znanstveni)
15. **Malečić, Barbara**; Jelić, Damjan; Horvath, Kristian; Strelec Mahović, Nataša; Mikuš Jurković, Petra; Babić, Karmen; Telišman Prtenjak, Maja: Application of the WRF-HAILCAST model to the Croatian area – sensitivity to PBL schemes. // Meteorološki izazovi 7, Zagreb, Hrvatska, 2020. (predavanje, domaća recenzija, pp prezentacija, znanstveni)
16. Jelić, Damjan; **Malečić, Barbara**; Vodarić Šurija, Barbara; Mikuš Jurković, Petra; Telišman Prtenjak, Maja; Strelec Mahović, Nataša: Estimation of hail occurrence from satellite, lightning and radar data in Croatia. // EGU 2020, Beč, Austrija, 2020. str. 1-1 (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
17. (SWALDRIC) Schär, Christoph; Telišman Prtenjak, Maja; Fuhrer, Oliver; Grisogono, Branko; Strelec Mahović, Nataša; Ban, Nikolina; Güttler, Ivan; Horvath, Kristian; Večenaj, Željko; Babić, Karmen i sur.: The SWALDRIC project. // 5th PannEx Workshop, Novi Sad, Srbija, 2019. (poster, međunarodna recenzija, neobjavljeni rad, znanstveni)
18. Ćorko, Karol; **Malečić, Barbara**; Jelić, Damjan; Horvath, Kristian; Strelec Mahović, Nataša; Mikuš Jurković, Petra; Telišman Prtenjak, Maja: Analysis of modeled hail parameters obtained by numerical mesoscale WRF-HAILCAST model. // The EMS Annual Meeting 2019, Kopenhagen, Danska, 2019. str. 1-1 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
19. **Malečić, Barbara**; Ćorko, Karol; Jelić, Damjan; Horvath, Kristian; Strelec Mahović, Nataša; Mikuš Jurković, Petra; Telišman Prtenjak, Maja: Analysis of the WRF-HAILCAST model applied to the Croatian area. // European Conference on Severe Storms, Krakow, Poljska, 2019. (poster, međunarodna recenzija, neobjavljeni rad, znanstveni)
20. Jelić, Damjan; Telišman Prtenjak, Maja; Skok, Gregor; **Malečić, Barbara**: Capabilities of Eulerian based lightning jump algorithm. // 10th European Conference on Severe Storms, Krakow, Poljska, 2019. (poster, neobjavljeni rad, znanstveni)

## Ocjenski radovi

Anna-Maria Križanac/neposredni voditelj

Analiza uzroka noćne i ranojutarnje duboke konvekcije nad sjeveroistočnim Jadranom., 2020., diplomski rad, diplomski, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb, Hrvatska

Malečić, Barbara -diplomski

Procjena triplet kovarijanci turbulencije za buru., 2019., diplomski rad, diplomski, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb. (<https://www.bib.irb.hr/1109792>)