

Ranojutarnja tuča nad južnim dijelom Jadrana

Karaula, Lovro

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:041311>

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](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Lovro Karaula

**RANOJUTARNJA TUČA NAD JUŽNIM
DIJELOM JADRANA**

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

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

Lovro Karaula

Diplomski rad

Ranojutarnja tuča nad južnim dijelom Jadrana

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

Neposredna voditeljica: dr. sc. Barbara Malečić

Zagreb, 2024.

Prvo se želim iskreno zahvaliti svojoj mentorici, izv. prof. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak na ideji, stručnoj podršci i vodstvu tijekom pisanja diplomskog rada.

Duboko se zahvaljujem dr. sc. Barbari Malečić na simulacijama korištenima u ovome radu te, zajedno s mag. phys.-geophys. Karlom Jambrošić, na strpljenju i pomoći koju su mi pružale od početka pisanja ovog rada.

Zahvaljujem se i stručnom osoblju DHMZ-a na ustupljenim meteorološkim podacima te dr. sc. Damjanu Jeliću na podacima o tuči te podacima o munjama iz LINET mreže.

Na kraju, najviše zahvaljujem roditeljima, bratu i sestri na neizmjerljivoj podršci i strpljenju kroz sve godine studija. Bez vas ovo ne bi bilo moguće.

Sažetak

U ovom je radu korišten meteorološki model WRF-HAILCAST s fokusom na analizi slučajeva ranojutarnje tuče na južnom Jadranu. Ovo je područje specifično po tome što je tuča češća zimi i nema poslijepodnevnog maksimuma kao što je osobina dnevnih hodova tuče nad kontinentom. Suprotno tome, ističe se jutarnji maksimum u hladnijem dijelu godine. Mehanizmi koji dovode do konvekcije su stoga drukčiji od onih na kontinentu i potrebno je daljnje ispitivanje uzroka konvekcije u ovim uvjetima. Cilj ovoga rada je provesti numeričke simulacije nekoliko odabranih slučajeva zimske konvekcije na južnom Jadranu te procijeniti uspješnost modela u simuliranju tuče i odabranih meteoroloških parametara. U svrhu analize događaja, korištene su sinoptičke karte te radiosondažna mjerenja na meteorološkoj postaji Zadar - Zemunik. Dobiveni rezultati modelski su tada uspoređeni s izmjerenim podacima iz mreže prizemnih meteoroloških postaja DHMZ-a. Uz to, modelirani potencijal razvoja munja (LPI) uspoređen je s izmjerenim podacima udara munja iz LINET mreže, a provedena je i dekompozicija skala strujanja polja vjetra pomoću Barnesovog filtra kako bi se dobila bolja informacija o utjecaju pojedinih skala u ukupnom strujanju vjetra. Rezultati pokazuju da model podcjenjuje veličinu zrna tuče, ali precjenjuje prostornu pokrivenost tučom. Također, model jako dobro prognozira temperaturu i tlak, no pokazuje slabije rezultate u prognozi relativne vlažnosti. Unatoč tome, model je dao dobre rezultate i uspješno je simulirao meteorološke uvjete koji su doveli do razvoja konvekcije i tuče u svim promatranim slučajevima.

Early morning hail in south Adriatic

Abstract

In this study, the WRF-HAILCAST model was used with focus on analysing the cases of early morning hail in the south Adriatic. This area is specific for the fact that hailstorm occur more often in the winter period, but with no afternoon maximum in the diurnal course like it appears for the hailstorms over the continent. Contrary, the early morning maximum stands out in the colder part of the year. Mechanisms that lead to convection are then different than the ones in the continent and more investigation is needed to find the causes of convection in these conditions. The goal of this study is to carry out numerical simulations for a select few cases of winter convection in the southern Adriatic and evaluate the success of the model in simulating hail and the selected meteorological parameters. For this analysis, the study uses synoptic charts and radiosounding profiles from station Zadar - Zemunik. The obtained results were then compared to the measured data from the Croatian Meteorological and Hydrological Service's network of surface stations. Moreover, the calculated potential of lightning activity (LPI) was compared to the measured data of lightning activity from the LINET network and the study carries out the scale decomposition of the wind flow field using the Barnes filter to obtain better information on the effect of the individual scales in the total wind flow field. The results show that the model underestimates the size of the hail, but overestimates the spatial distribution of the simulated hail. Also, the model predicts the temperature and air pressure data very well, but it shows poor results in predicting the relative humidity data. Despite that, the model gave good results and it successfully simulated the meteorological conditions that led to the development of convection and hail in all observed cases.

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. Konvekcija	1
1.2. Tuča	3
1.3. Dosadašnja istraživanja	4
1.4. Motivacija i cilj istraživanja	11
2. Podaci i metode	12
2.1. Opis domene	12
2.2. Podaci i odabrani slučajevi	13
2.2.1. Prizemna mjerenja	13
2.2.2. Mjerenja tuče	15
2.2.3. Munje	16
2.2.4. Odabrani slučajevi	18
2.3. Numerički modelski sustav WRF	18
2.3.1. Opća obilježja	18
2.3.2. Indeks potencijalnog razvoja munja - LPI	21
2.3.3. HAILCAST	21
2.3.4. Metoda dekompozicije skala	22
2.3.5. Standardni parametri za evaluaciju mjerenja kod usporedbe s rezultatima modela	23
3. Rezultati i diskusija	24
3.1. Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja (S1) iz 21.10.2011.	24
3.2. Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja (S2) iz 13.1.2016.	33
3.3. Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja (S3) iz 27.2.2016.	41
3.4. Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja (S4) iz 21.3.2018.	49
4. Zaključak	59
Literatura	61
Popis kratica	65

1. Uvod

1.1. Konvekcija

Konvekcija je vertikalni transport topline i vlage u više slojeve atmosfere koji nastaje zbog razlika u temperaturi i gustoći zraka te često rezultira nastajanjem kumulusnih oblaka, ali i nastajanjem većih ili manjih olujnih sustava. Od ključne je važnosti za prijenos energije od toplijih prema hladnijim krajevima na Zemlji gdje dolazi do velikih temperaturnih razlika. Kako su glavni uvjeti konvekcije visoka količina temperature i vlage, od velike je važnosti, i najčešća, u tropskim krajevima, dok je u polarnim krajevima rijetka. Razlikujemo nekoliko tipova konvekcije; slobodnu, prisilnu i frontalnu, ali također i plitku, duboku i suhu konvekciju.

Slobodna konvekcija je najčešća te nastaje Sunčevim zagrijavanjem Zemljine površine čime zrak blizu površine postaje topliji i rjeđi od okolnog te se počinje dizati. Prisilna konvekcija nastaje kada vlažni zrak svojim strujanjem naiđe na prepreku kao što su planine. Zrak nema izbora, nego se dizati uz prepreku, dok ne postane hladniji od okoline. Frontalnu konvekciju povezujemo s dizanjem toplog i vlažnog zraka uz toplu frontu koja je obično u obliku klina, dok se kod hladne fronte očekivani suprotni klin deformira zbog trenja uz podlogu.

Nadalje, suha konvekcija podrazumijeva dizanje suhog zraka te ne rezultira nastajanjem oblaka zbog nedovoljnog sadržaja vlage u atmosferi. Plitka ili duboka konvekcija govore o tome koliko se visoko podiže vlažni i topao zrak s površine. Za plitke konvekcije zrak se ne diže visoko te se brzo hladi čime dolazi do razvoja kumulusa male ili srednje razvijenosti, dok duboka konvekcija podiže vlažan zrak u visoke slojeve troposfere, nekada i do donjih slojeva stratosfere, tijekom razvoja kumulonimbusa.

Kumulonimbus (Cb) je golem i gust oblak jakog vertikalnog i horizontalnog razvoja s podnicom koja je obično ispod 2 km (čime spada u nisku naoblaku), dok mu vrh može preći i 10 km, a u ekstremnim slučajevima doći i do stratosfere. Podnica je najčešće jako tamna te dolazi s malim rascijepanim oblacima, dok mu je vrh ravan i često se širi u obliku nakovnja ili perjanice. Uzrok tome je statistički stabilna stratosfera koja ne dopušta velike vertikalne brzine čime izaziva jaku divergenciju strujanja u području tropopauze ili neposredno ispod.

Po obliku Cb oblake dijelimo na dvije vrste (slika 1.1.):

- *Kumulonimbus calvus* - Cb cal
- *Kumulonimbus cappilatus* - Cb cap

Dok Cb cal (slika 1.1a) na svome vrhu ima nejasne i spljoštene dijelove bez jasnog oblika i oštih rubova, Cb cap (slika 1.1b) na svome vrhu ima oštre, jasno vidljive vlaknaste strukture, često u obliku nakovnja. Kako je najvećeg vertikalnog razvoja i najveće količine energije, Cb je jedini oblak u kojemu se javlja intenzivna oborina kao što je pljusak. Često je popraćen munjama i grmljavinom, tučom i/ili jakim udarima vjetera. Isto tako, Cb oblaci važni su za opću cirkulaciju atmosfere zbog prijenosa topline i vlage u visoke dijelove troposfere i niske dijelove stratosfere, na kemijski sastav troposferskog zraka i na električna svojstva cijele atmosfere.



Slika 1.1. Vrste Kumulonimbusa; (a) calvus; *Cb cal*, (b) cappilatus; *Cb cap* (izvor: <https://cloudatlas.wmo.int/en/search-image-gallery.html>)

Kako bi došlo do jakog razvoja konvekcije, a time i do oblaka Cb-a, moraju postojati sljedeći uvjeti u atmosferi (Cotton i sur., 2010.):

- dovoljna vlažnost zraka u nižoj troposferi,
- statička nestabilnost atmosfere,
- mehanizam podizanja zraka do nivoa slobodne konvekcije.

Svaki od ovih uvjeta je važan za nastanak i duljinu trajanja konvekcija, a višak jednog uvjeta može nadomjestiti manjak drugog uvjeta. Primjer toga je konvekcija u hladnijem dijelu godine proučavana u ovome radu kada prizemna temperatura nije visoka pa statička nestabilnost nije nužno velika, no uz jako vanjsko forsiranje, npr. prolazak ciklone, može doći do razvoja konvekcije.

Čest čija je relativna vlažnost manja od 100 % u statički stabilnoj atmosferi može biti potaknuta na gibanje nekim vanjskim forsiranjem, tj. mehanizmom podizanja. Neka od čestih forsiranja su orografija, obalna cirkulacija zraka, fronte, ali i dovoljno zagrijana podloga. Mogu također biti i zbog konvergencije u prizemnom sloju ispred sinoptičke fronte, odnosno fronte smorca ili kopnenjaka. Zastupljenost ovih početnih uzroka nastanka konvekcije ovisi o geografskom području, ali i o dobu godine.

Ako je forsiranje dovoljno jako, čest se diže do nivoa kondenzacije LCL (engl. *Lifting Condensation Level*) nakon čega dolazi do kondenzacije česti i oslobađanja njezine latentne topline. Daljnjim podizanjem čest dolazi do nivoa slobodne konvekcije LFC (engl. *Level of Free Convection*) gdje postaje toplija i lakša od okolnog zraka te se diže i bez forsiranja sve do ravnotežnog nivoa EL (engl. *Equilibrium Level*) (Holton, 2004.). U slučajevima posebno jakih uzlaznih gibanja u razvijenim konvektivnim olujama, čest može i probiti ravnotežni nivo, što prepoznajemo kao "*Overshooting Top*", tj. premašujući vrh (Mikuš i Strelec Mahović, 2013.).

Dobra mjera za prognozu koliko će se jako razviti konvektivni sustav je količina raspoložive konvektivne potencijalne energije u atmosferi, CAPE (engl. *Convective Available Potential Energy*). CAPE nam pokazuje koliku maksimalnu energiju može dobiti konvektivni sustav od uzgona i otpuštanja latentne topline pri kondenzaciji vodene pare za zadane atmosferske uvjete. Definiran je kao:

$$CAPE = \int_{z_{LFC}}^{z_{EL}} g \left(\frac{T_{v,parcel} - T_{v,env}}{T_{v,env}} \right) dz \quad \left[\frac{J}{kg} \right], \quad (1.1.)$$

gdje su g akceleracija sile teže, T_v virtualna temperatura, tj. temperatura koju bi imao suhi zrak kada bi mu gustoća i tlak bili jednaki gustoći i tlaku vlažnog zraka. Ako promatramo termodinamički dijagram, CAPE je površina na grafu omeđena krivuljama temperature česti zraka i temperature okoline između visina LFC i EL, a ta je površina proporcionalna energiji. Valja naglasiti da CAPE pokazuje maksimalnu količinu energije dostupnu konvektivnom sustavu, ali prava energija je najčešće manja. Trenje u tome također ima velik utjecaj. Može se promatrati i MU-CAPE (engl. *Most Unstable CAPE*), koji promatra vrijednost CAPE-a za najnestabilniju čest.

Još jedna korisna mjera za promatranje konvekcije je konvektivna inhibicija, CIN (engl. *Convective Inhibition*). Čest koja se podiže do visine LFC-a hladnija je od svoje okoline pa je potrebno utrošiti rad kako bi se nadvladao negativni uzgon nastao zbog razlike u temperaturi česti i okoline. Taj je rad CIN, a definiran je kao negativan CAPE u granicama između visine podizanja česti i visine LFC:

$$CIN = - \int_z^{z_{LFC}} g \left(\frac{T_{v,parcel} - T_{v,env}}{T_{v,env}} \right) dz \quad \left[\frac{J}{kg} \right], \quad (1.2.)$$

Promatramo li termodinamički dijagram, CIN je površina između temperature česti i temperature okoline od tla do visine LFC. Unatoč tome što je jednadžba za računanje CIN-a jednaka negativnoj jednadžbi za računanje CAPE-a, CIN nije isto što i negativan CAPE. CAPE nam daje informaciju o maksimalnoj količini energije dostupnoj česti pri podizanju, dok CIN daje informaciju o energiji potrebnoj za podizanje česti do visine LFC, tj. predstavlja energetska barijeru za početak konvekcije. Iz ovih razloga CAPE smatramo mjerom nestabilnosti, a CIN mjerom stabilnosti atmosfere.

1.2. Tuča

Tuča je vrsta krute oborine sastavljena od čestica leda većih od 5 mm u promjeru. Zrna tuče mogu biti prozirna ili neprozirna, a oblik im je najčešće nepravilan iako mogu biti i kuglasta. Do tuče dolazi uslijed jakih grmljavinskih oluja i uvijek kao pljusak. Definicija tuče podrazumijeva led promjera barem 5 mm (slika 1.2a), no ona može poprimiti i znatno veće dimenzije (slika 1.2b, c). Tako velikom tučom smatramo onu čiji promjer prelazi 2 cm, a vrlo velikom onu s promjerom većim od 5 cm (npr., Pučik i sur. 2019.), dok je npr. najveća zabilježena tuča u Europi imala promjer od 19 cm (25. srpnja 2023., Italija, slika 1.2c). Zbog toga može poprimiti veliku masu, a time i veliku kinetičku energiju pri padu iz oblaka i izazvati ogromne štete. Tuča može nastati u manjim olujnim sustavima kao što je jednoćelijski kumulonimbus, ali tada je često sitna. Velika tuča se skoro uvijek pojavljuje u velikim konvektivnim sustavima, u višćelijskim i superćelijskim kumulonimbusima. Zbog toga što nastaje u tako kompleksnim i organiziranim sustavima, tuča se kretanjem kroz oblak može i nasumce taliti i ponovno zaledivati u veće komade leda, sastavljene od mnoštva manjih individualnih zrna (slika 1.2b).

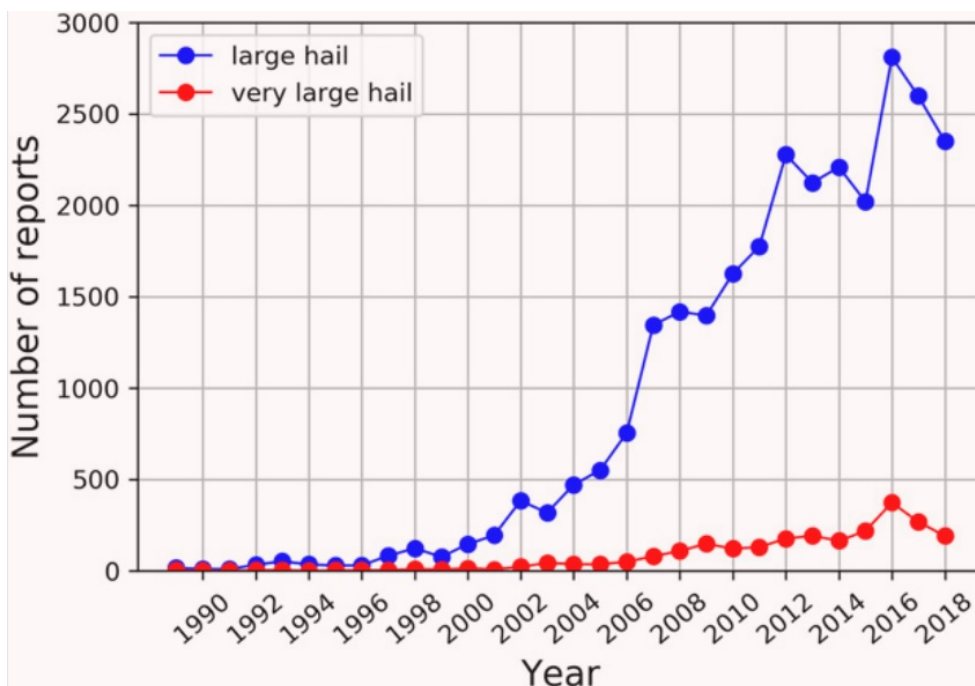


Slika 1.2. (a) Sitnija tuča, (b) veliki komadi tuče sastavljeni od mnoštva manjih zrna, (c) najveće izmjereno zrno tuče u Europi promjera 19 cm, Italija, 25. srpnja 2023. (izvor: <https://www.essl.org/cms/european-severe-weather-database/>)

1.3. Dosadašnja istraživanja

Izvori prikupljanja podataka o tuči su različiti, a temelje se na više pristupa. Motrenja odnosno mjerenja provode profesionalni motritelji koji ili opažaju tuču i upisuju u dnev-

nike motrenja ili očitavaju tučomjere (npr., Blašković i sur., 2023.). Dobrovoljni izvjestitelji/volonteri također dojavljuju događaje o pojavi tuče u European Severe Storms Laboratory gdje se potom kreira baza podataka ESWD (engl. *European Severe Weather Database*) (Pučik i sur., 2019.). Ipak često izostaje kontinuitet mjerenja na određenim lokacijama. Informacije o pojavi tuče mogu se prikupljati posredno pomoću daljinskih mjerenja satelitskog (npr., Punge i sur., 2017.), odnosno radarskog tipa (npr., Stržinar i Skok, 2018.) ili putem pojave munja (npr., Jelić i sur., 2020.). Još jedan (često posredan) način prikupljanja informacija o pojavi tuče jesu podaci osiguravajućih društava (kroz prijavljene štete) i iz medija (Vinet 2001; Tuovinen i sur., 2009). Svi pristupi su pokriveni u recentnoj znanstvenoj literaturi.



Slika 1.3. Broj izvješća o tuči; velikoj (≥ 2 cm, plava linija) i vrlo velikoj (≥ 5 cm, crvena linija) između 1990. i 2018. godine (Pučik i sur., 2019.)

Ovisno o smjeru istraživanja, istraživači naglašavaju prednosti, ali i mane pojedinog načina opažanja tuče što i dalje ukazuje da se radi o fenomenu koji je teško mjerljiv, a onda i time da se radi o pojavi o kojoj se još dosta ne zna. Grmljavinske oluje mogu se detektirati korištenjem automatskog površinskog sustava mjerenja ili satelitskog sustava za detekciju munje (npr., Galanaki i sur., 2018.), ali ozbiljni lokalni događaji, poput velike tuče ili tornada/pijavica, i dalje zahtijevaju izvješćivanje motritelja. Autori (npr., Taszarek i sur., 2020.) su ipak naglasili nekoliko problema kod mjerenja motritelja kao što je prostorna pristranost prema naseljenijim područjima te vremensku nehomogenost koja to prati. Nadalje, uočene su promjene u izvješćivanju koje se povezuju s poboljšanjem tehnologije kao što su kamere mobilnih telefona i rašireni pristup internetu što pak stvara povećani (društveno/medijski) interes za grmljavinske oluje (npr., Seimon i sur., 2016.). Navedeno omogućuje brzo dokumentiranje i dijeljenje loših vremenskih uvjeta s drugima (npr., Graham i Dutton, 2019.; Taszarek i sur., 2020.). Rezultat je nagli skok u prikupljanju podataka koji opisuju pojavu i utjecaj konvektivnih oluja (Slika 1.3.) u odnosu na prethodna razdoblja, što otežava ocjene klimatoloških trendova jer su podaci u vremenu nehomogeni.

Tehnike daljinskog mjerenja mogu popuniti nedostatak rijetkih prostornih staničnih mjerenja koristeći pritom zamjenske (tzv. „*prox*“) podatke temeljene na radarskom odzivu.

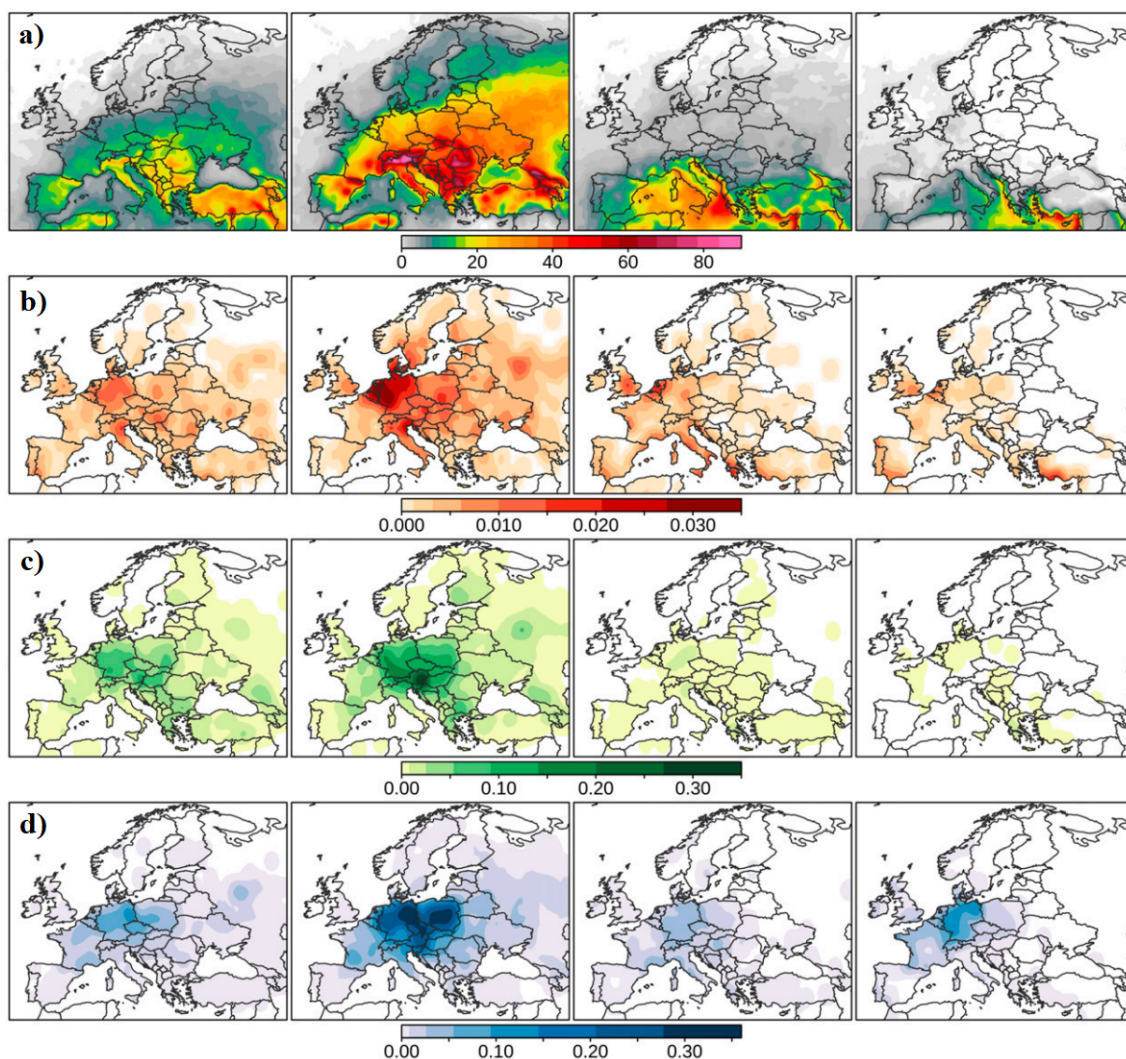
Oni mogu pomoći u procjeni učestalosti tuče (npr. kroz procjenu maksimalne vrijednosti veličine zrna tuče) u slabo naseljenim područjima. Negativna strana korištenja radarskih podataka (iako nadilaze granice između zemalja) je teško provediva analiza na većem području, van nacionalnih granica neke države, jer nema uhodane razmjerne radarskih podataka te su obično dostupni u kratkim vremenskim intervalima (Nisi i sur., 2018.).

Satelitski pristupi omogućuju globalnu detekciju tuče te su osobito dobrodošli na područjima/u zemljama gdje su podaci o tuči ili radarski podaci rijetki ili nepostojeći. Ipak i oni imaju ograničenja. Satelitske metode detekcije tuče ograničene su na relativno grubu rezoluciju većine satelitskih instrumenata u usporedbi s dimenzijama konvektivnih pojava, a metoda koja se bazira na premašujućim vrhovima ne osigurava pojavu tuče u nižim slojevima atmosfere (npr., Battaglioli i sur., 2023.).

Osim mjerenja, sve je češći pristup korištenja polja reanaliza (Battaglioli i sur., 2023.) i/ili takozvanih „gridanih“ baza podataka odnosno mjerenih podataka koji su interpolirani nekom objektivnom metodom interpolacije na definiranu prostornu mrežu točaka željene razlučivosti. Oba izvora podataka su međusobno usporediva te istovremeno olakšavaju usporedbe s modeliranim rezultatima. Pritom se koriste i numerički prognostički (npr., Malečić i sur., 2023.) i klimatski modeli (npr., Cui i sur., 2023.; Kahraman i sur., 2024.), odnosno statistički modeli (npr., Mohr i sur., 2015.) u analizama tuče. Modeliranjem se pokušavaju pokriti informacije vezane uz vremensku učestalost tuče i njezinu prognozu, prostornu pokrivenost i maksimalni promjer zrna tuče te vjerojatnosti ponovnog pojavljivanja.

U nedavno provedenom istraživanju iskorištena su opažanja iz baze podataka ESWD (Taszarek i sur., 2020.) koja su pokazala prostorne i sezonske razlike (slika 1.4.) duž europskog kontinenta za više produkata konvekcije (munje, tornada, velike tuče i jake udare vjetra). Nakon što su standardizirali podatke o pojavama produkata konvekcije u razdoblju 1979.-2018. te ih interpolirali na mrežu točaka razlučivosti 0.25° te s dostupnošću svakog sata mogli su usporediti godišnje, sezonske i dnevne hodove.

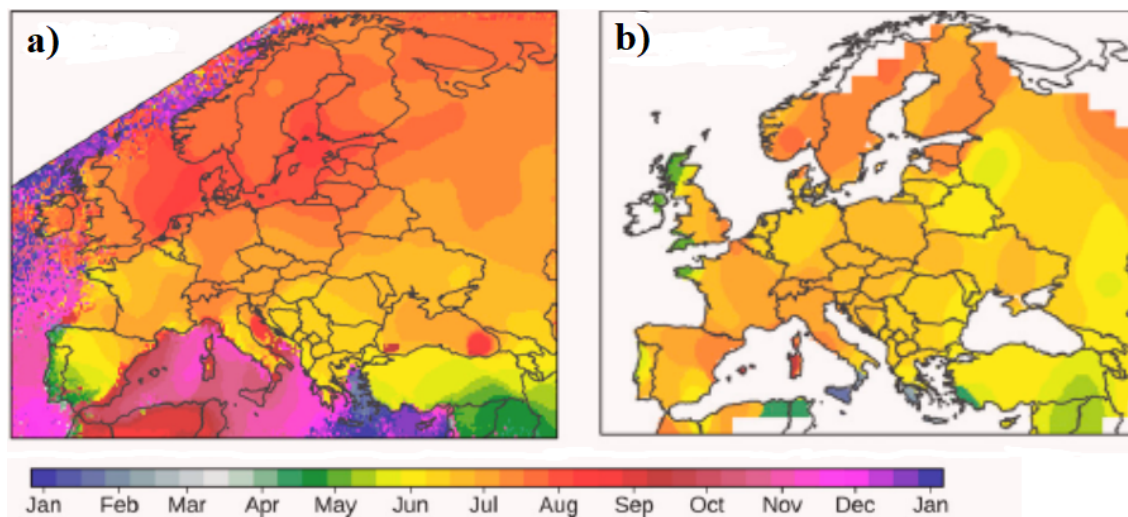
Dobiveni rezultati ukazali su na prostorne razlike između toplog (proljeće i ljeto) i hladnog dijela (jesen i zima) godine. Tijekom toplog dijela godine (osobito ljeti) prostorna raspodjela srednjeg godišnjeg broja sati s munjama nad Europom predočila je veliku aktivnost s 30-40 sati u koridoru od sjeveroistočnog Iberijskog poluotoka, preko središnje Europe i Balkana, do zapadne Rusije (slika 1.4a). Maksimalna učestalost munja koji prelaze 60 sati godišnje opaženi su iznad planinskih lanaca kao što su Alpe, Karpati i Dinaridi. Najveća učestalost tuče događa se istočno od Alpa i nad srednjom Europom u ljetnoj sezoni. Jaki udari vjetra kao najdominantnija hazardna pojava u svakoj sezoni, najčešće se izvješćuju iznad središnje Europe ukazujući na određenu pristranost izvještavanja. Tijekom jeseni konvektivna se aktivnost (20 h s grmljavinskim olujama godišnje) pomiče prema južnoj Europi i toplijem dijelu Sredozemlja s jakim lokalnim maksimumom iznad Otrantskih vrata i Jonskog mora. Zimi je aktivnost munja, pojava tornada i tuče dosta locirana uz obale istočnog Sredozemlja.



Slika 1.4. Prosječni broj sati s; (a) munjama, (b) tornadima, (c) velikom tučom, (d) jakim udarima vjeta na mreži točaka s udaljenošću od 0.25° nakon prostornog filtriranja za Europu u razdoblju od 2006. do 2018. godine po sezonama (proljeće, ljeto, jesen, zima; slijeva nadesno) (Taszarek i sur., 2020.)

Zbog kompleksne topografije i razvedene obale pod čestim utjecajem ciklona, odnosno blokirajućeg efekta anticiklona, nad Europom se vide velike prostorne i vremenske razlike u pojavi munja i velike tuče. Prema dostupnim izvješćima, najveća vjerojatnost za munje je krajem svibnja iznad Iberijskog poluotoka i Turske, u srpnju od Britanskih otoka do zapadne Rusije, te u kolovozu nad sjevernom Europom (slika 1.5a). Iznad toplijih voda istočnog Atlantika i Sredozemlja, topla morska površina doprinosi formiranju maksimuma pojave munja tijekom kasne jeseni i zime. Velika tuča (slika 1.5b) u većem dijelu Europe se javlja najčešće u lipnju i srpnju, s izuzetkom južnih dijelova Italije i Grčke, gdje se maksimum javlja zimi.

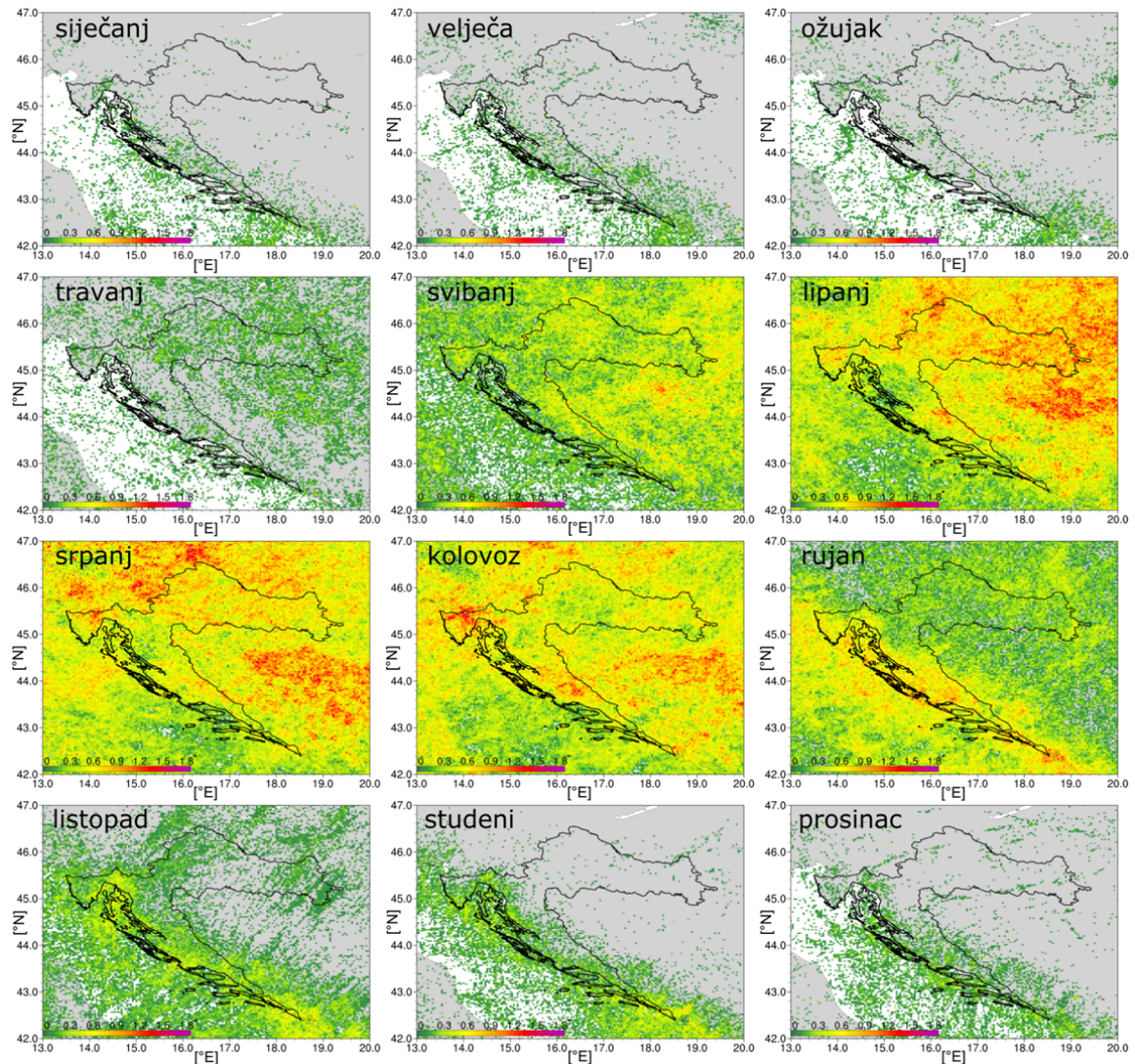
Tijekom dana zbog dnevnog zagrijavanja, konvektivna aktivnost je najčešća u poslijepodnevnom satima uz određene prostorne varijacije; od maksimalne učestalosti munja oko 13–14 UTC nad istočnom i jugoistočnom Europom, prema 15–16 UTC iznad središnje, južne i zapadne Europe, sve do 17–18 UTC iznad jugozapadne Europe. Slično vrijedi i za veliku tuču. Također je uočena i velika učestalost pojave noćnih munja nad Sredozemljem gdje su oluje naizglednije između 23 i 05 UTC (Pučik i sur., 2019.; Taszarek i sur., 2020.).



Slika 1.5. Doba godine s najvećom vjerojatnošću za (a) munje i (b) veliku tuču, na temelju izvješća ESWD-a na mreži točaka s udaljenošću od 0.25° nakon prostornog filtriranja za Europu između 2006. i 2018. godine (Taszarek i sur., 2020.)

U dosadašnjim rezultatima studija Pučik i sur. (2019.) i Taszarek i sur. (2020.), različitost površine Hrvatske je poprilično gruba/slaba i iznosi $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Ipak, iako mreža interpoliranih podataka ne otkriva puno detalja u prostornoj razdiobi pojava uzrokovanih konvekcijom daje se naslutiti da postoje znatne razlike između obalnog i kontinentalnog dijela (slike 1.5.). Potvrdu veće prostorne i vremenske varijabilnosti dao je čitav niz studija i analiza za Hrvatsku izrađenih u zadnjih 30-ak godina pomoću različitih mjerenja staničnog ili daljinskog tipa. Dio studija bio je fokusiran na određena područja, nizinski dio Hrvatske i/ili Istru (npr., Počakal i Štalec, 2003.; Počakal i sur., 2018.; Jelić i sur., 2020.), a dio njih je pokrivao Hrvatsku u cjelini (npr., Mikuš i sur., 2012.; Jelić i sur., 2021.; Blašković i sur., 2023.).

Mikuš i sur. (2012.) napravili su analizu prostorno-vremenskih obilježja mjerenja o munjama i pripadnih sinoptičkih tipova vremena u toplom dijelu godine u šest regija u Hrvatskoj. Rezultati su pokazali da je pojava munja najčešća nad Istrom i Kvarnerom u uvjetima s ciklonama uz vrlo čestu advekciju toplog i vlažnog zraka sa Sredozemlja u jugozapadnoj struji po visini. Također, munje su izmjerene i u uvjetima gotovo bezgradijentnog polja prizemnog tlaka zraka. Jelić i sur. (2021.) razvili su novi indeks intenziteta grmljavinske oluje TSII (engl. *Thunderstorm Intensity Index*) uz pomoć podataka o munjama na temelju 13-godišnjeg niza podataka (2008. – 2020.). Zbog dobre prostorne ($3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$) i velike vremenske (2 min) rezolucije podataka o munjama, TSII može prepoznati čak i lokalni i kratkotrajni intenzivni sustav koji radari i sateliti često krivo čitaju zbog ograničenja u vremenskoj rezoluciji. TSII je osmišljen da se koristi kao klimatološka i dijagnostička varijabla koja bi mogla poslužiti ili kao nadopuna ili umjesto drugih izvora podataka ukoliko su nedostupni. Sam indeks je visoko koreliran s obilnom kišom, jakim udarima vjetra/pijavicama i tučom, kao i indeksima nestabilnosti. Time je omogućena izrada karte hazarda (Jelić, 2022.) za pojave intenzivnog nevremena na području Hrvatske i susjednih zemalja (Slika 1.6.).

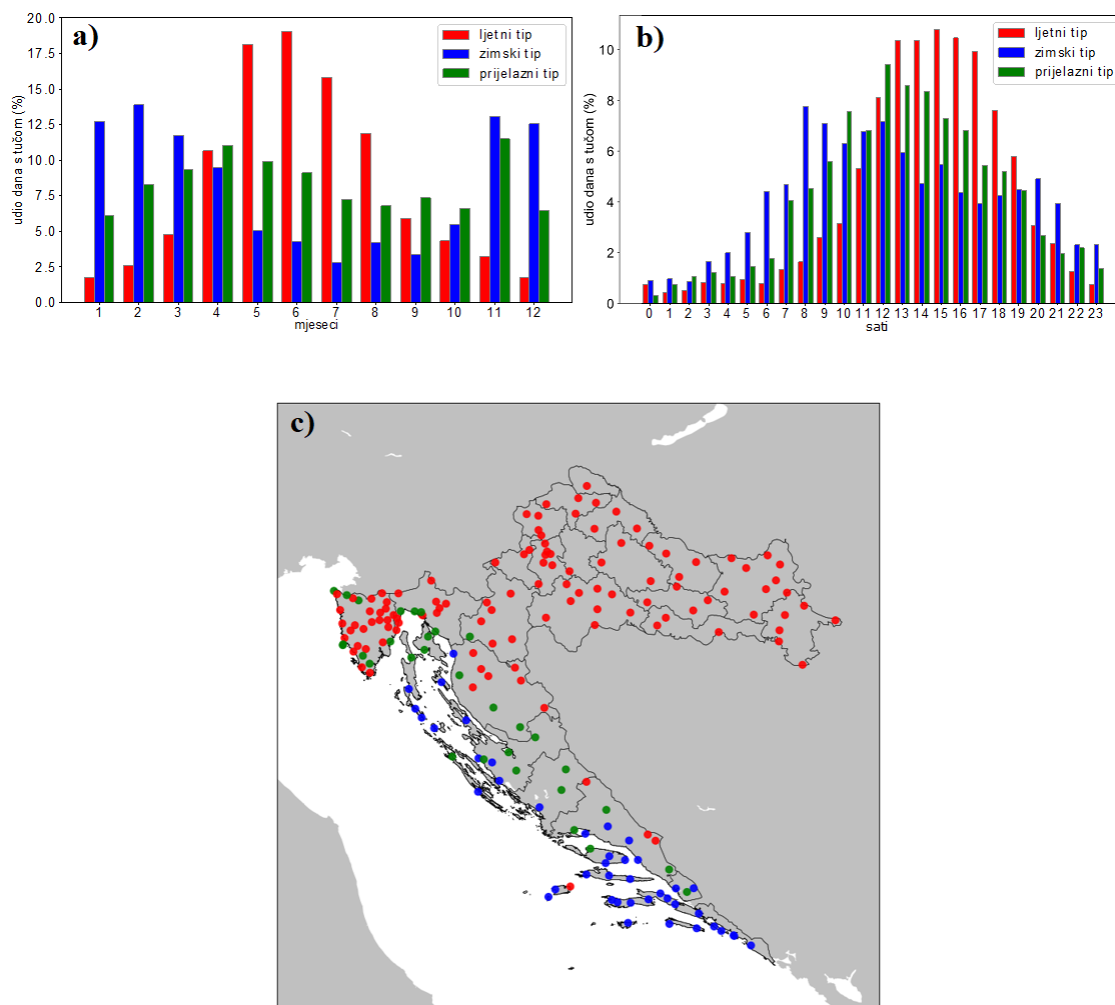


Slika 1.6. Godišnji hod prostorne distribucije broja dana s detektiranim tragom TSII na temelju 13-godišnjeg niza (2008.-2020.) podataka o munjama iz mreže LINET (Jelić, 2022.)

Rezultati prikazuju da se najveći broja dana s olujama bilježi u priobalnom području, a posebno na području sjeverno od Kvarnera, zatim na području Šibensko-kninske županije, sjevernom dijelu Splitsko-dalmatinske županije te južnom dijelu Dubrovačko-neretvanske županije (Jelić, 2022.). Broj dana s opasnim pojavama najčešće se nalazi u rasponu od 2.5 do 4 dana godišnje. Kao što je već uočeno i za Europu; i u Hrvatskoj se vidi različito ponašanje konvekcije i njenih produkata uz obalu u usporedbi s unutrašnjosti. U unutrašnjosti glavina intenzivnih oluja vezana je za topli dio godine (svibanj – rujan), dok je u priobalnom dijelu vidljiva njihova prisutnost tijekom cijele godine.

Klimatološka obilježja tuče također prate ovakav godišnji ciklus indeksa TSII-ja (Blašković i sur., 2023.). Na južnom i središnjem dijelu hrvatskog primorja najveća aktivnost tuče prisutna je u hladnijem dijelu godine, dok najveći, sjeverni dio priobalja i kontinentalni dio Hrvatske pokazuju povećanu ljetnu aktivnost tuče (slika 1.7.). Između ta dva režima postoji i prijelazno područje koje bilježi najviše tuče u proljeće i jesen. Dnevni obrasci pojave tuče pokazuju pomicanje dnevnog maksimuma od jutarnjih prema poslijepodnevima kako se pomičemo od obale prema unutrašnjosti, a obalni dio Hrvatske općenito bilježi veću učestalost (zimске) tuče u odnosu na kontinentalni dio. Potrebno je naglasiti da je maks-

mum zimske konvekcije na obali u jutarnjim satima (slika 1.7b). Više detalja dostupno je u Jelić (2022.).



Slika 1.7. Godišnji hod prostorne distribucije broja dana s detektiranim tragom TSII na temelju 13-godišnjeg niza (2008.-2020.) podataka o munjama iz mreže LINET (Jelić, 2022.)

Osim analiza mjerenja nedavno su provedene i numeričke simulacije prognoze tuče i munja u cilju izrade što uspješnih prognoza. Testirane su postavke numeričkog modela visoke razlučivosti (modela WRF-ARW) kroz multifizički ansambl u kombinaciji s dodatnim algoritmima za prognozu tuče (HAILCAST) i munja (engl. *Lightning Potential Index*, LPI). Pokazalo se da je u simulacijama produkata konvekcije bio najvažniji dobar odabir mikrofizičke sheme u modelu. Provedeno je podešavanje HAILCAST-a tako da je uveden i testiran novi prag za njegovu aktivaciju (Malečić i sur., 2022.). Rezultati su pokazali dobro slaganje između promatranih i modeliranih događaja tuče. Međutim, prisutni su bili i mnogi lažni alarmi, što ukazuje na tendenciju modela da općenito precijeni područje pogođeno tučom. Također, model je pokazao sklonost precjenjivanju opaženih maksimalnih promjera zrna tuče. Munje tijekom dana su bile bolje reproducirane nego tijekom noći.

1.4. Motivacija i cilj istraživanja

Kao što je prikazano u prethodnim poglavljima, ali i na slici 1.7c, najveći broj postaja osjeća posljedice konvekcije u toplom dijelu godine (crvene postaje) pa je i većina dostupnih istraživanja provedena za ljetnu sezonu. Ipak, postoji određen broj postaja (dominantno obalni dio; plave postaje) kod kojih je utjecaj zimske konvektivne aktivnosti značajno izražen. Time se otvara pitanje uzroka ovakvih događaja, osobito zbog teže prognoze takvih događaja, a koji opet mogu uzrokovati materijalne štete. U nedavnom radu (Dolički, 2024.) istraživana je duboka mokra konvekcija u hladnom dijelu godine (listopad-ožujak) u razdoblju od 2016. do 2020. na temelju indeksa TSII, sinoptičkih karata i mjerenih vertikalnih profila atmosfere i proračuna indeksa nestabilnosti iz radiosondaža. Rezultati su pokazali da sinoptičko forsiranje ima značajno veću ulogu u razvoju konvekcije tijekom hladnog dijela godine u usporedbi s toplim dijelom, dok je dominantan režim visinskog strujanja jugozapadni. Uočeno je da se većina intenzivnih konvektivnih oluja razvila u uvjetima jakog vertikalnog smicanja vjetra i male vrijednosti CAPE-a, za razliku od ljetne konvekcije, gdje CAPE poprima velike vrijednosti. Unatoč tome, jako vertikalno smicanje vjetra predstavlja dobre uvjete za nastanak konvekcije i opasnih vremenskih uvjeta, npr. jakih oluja i tuče.

Ovim se istraživanjem zato želi napraviti korak dalje simuliranjem četiri odabrana slučaja u kojima je potvrđena zimska konvekcija i tuča modelom velike razlučivosti pa su stoga postavljeni sljedeći ciljevi:

- provođenje numeričkih simulacija nekoliko odabranih slučajeva zimske konvekcije na južnom dijelu Jadrana,
- evaluiranje uspješnosti modela odabranih slučajeva zimske konvekcije te algoritama za produkte konvekcije (tuču i munje),
- istraživanje uzroka/doprinosa mezoskale i/ili mikroskale pojavi zimske konvekcije, osobito one ranojutarnje.

Promatranjem ovih slučajeva možemo poboljšati razumijevanje uvjeta u kojima nastaje zimska konvekcija unatoč malim vrijednostima CAPE-a te kakva su forsiranja i strujanja dominantna. Uz to, možemo procijeniti preciznost modela pri prognozi zimske konvekcije, koliko dobro simulira veličinu i prostornu raspodjelu tuče, strujanja vjetra i oblačne sustave te je li pogodan za korištenje u budućim prognozama.

2. Podaci i metode

2.1. Opis domene

Hrvatska je južnoeuropska mediteranska zemlja smještena na dijelu panonske nizine, području Velebita i gotovo cijelog Jadrana. Iako je svojim najvećim dijelom nizinska zemlja, oko 45 % površine zauzimaju brdsko i planinsko područje. S time na umu, Hrvatsku možemo podijeliti na tri glavne regije:

- nizinska ili panonska (55 % teritorija),
- primorska ili jadranska (15 % teritorija),
- gorska (30 % teritorija).

Uz to, hrvatska obala sadrži čak 1246 otoka, hridi i grebena te mnogo uvala, prevlaka, zaljeva i poluotoka.

Promatrano područje u ovome radu je južna obala Hrvatske koja obuhvaća područje od Šibenika do Cavtata, ali i cijelu obalu Crne Gore do granice s Albanijom. Promatrani dio hrvatske obale kao i Dalmatinska Zagora spadaju u izrazito krško područje koje se uglavnom sastoji od niskih uzvisina, malenih udolina i polja između njih. Za krš je karakteristična prevladavajuća podzemna cirkulacija vode u topljivim karbonatnim stijinama kao što su vapnenac i dolomit. Otapanjem kalcijevog karbonata u stijinama, stvaraju se površinski i podzemni oblici, neki od njih su ponikve, škrape, jame i špilje. Poznato je oko 50 jama dubljih od 250 m, jedna od njih je Lukina jama, istražena do dubine od 1431 m. Zbog toga je tlo korodirano i rasjednuto s čestim potresima, te puno podzemnih šupljina i kanala koji se pune vodom i sežu nekad ispod morske razine. Ovo područje nalazi se ispod jugoistočnog dijela Dinarida zbog čega je i podložno jakoj buri kroz cijelu godinu. Osim brdovitih i kršovitih osobina, područje interesa karakterizira i sredozemna klima s više od 2600 sunčanih sati godišnje u Splitu, Dubrovniku te mnoštvu otoka uzduž obale. Među njima su najveći Brač, Hvar, Korčula i Mljet, između kojih se nalazi i drugi najveći poluotok u Hrvatskoj, Pelješac.

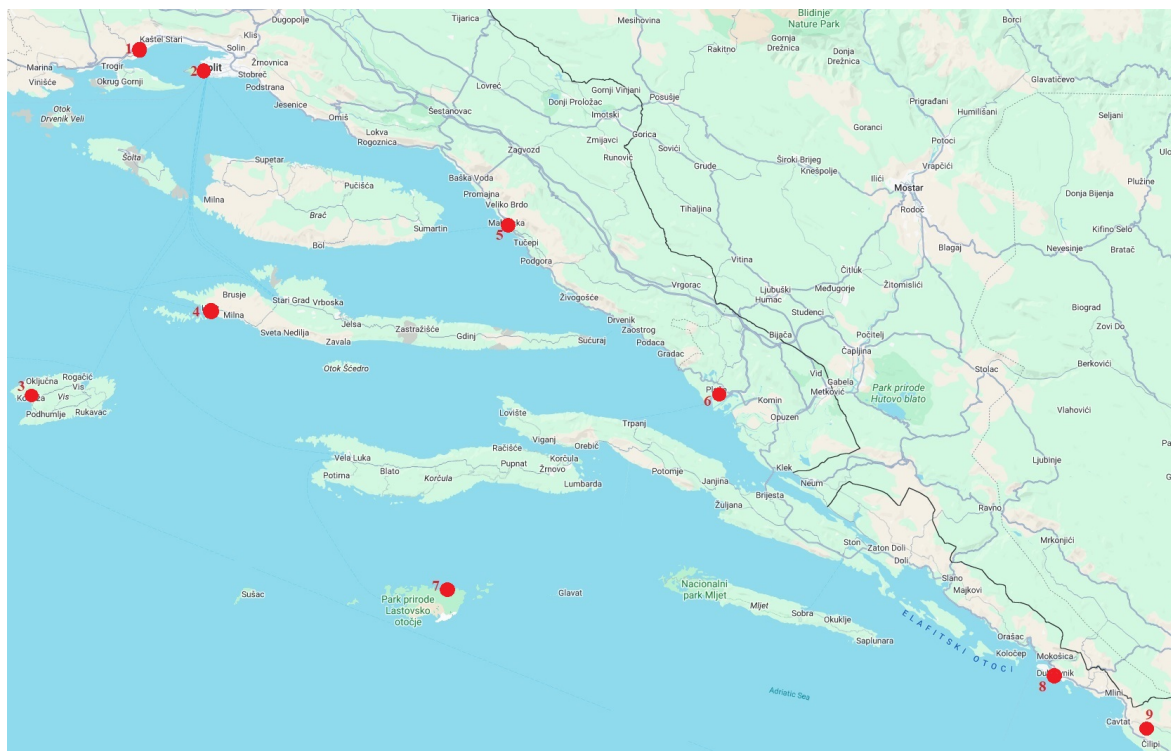
Jadransko se more smatra toplim morem. Zimi se površinska temperatura kreće između 14 °C i 16 °C s minimumom od oko 12 °C (najčešće u okolici Senja), ali se luke i zaljevi mogu ohladiti i do 4 °C. U proljeće se brzo ugrije i dostiže temperature između 18 °C i 22 °C, a ljeti se temperatura otvorenog mora kreće između 23 °C i 25 °C, dok u priobalju može narasti i do 29 °C.

Područje istraživanja pod stalnim je utjecajem jako složene dinamike atmosfere i mora. Navedena dinamika je posljedica jakog djelovanja vjetera; vlažnog i toplog juga iz Sredozemlja te suhe i hladne bure s Dinarida. Bura na ovom području često dostiže brzinu veću od 40 ms⁻¹, a u Makarskoj je zabilježen i udar od 59 ms⁻¹ (=212,3 kmh⁻¹). Takav vjetar znatno utječe na dinamiku i temperaturu mora, koji su također pod utjecajem: (i) položaja i oblika brojnih otoka i uvala, (ii) plime i oseke mora te (iii) unosa slatke vode iz rijeka i vrulja. Ovime će doći do vertikalnog miješanja vode što se dodatno pojačava utjecajem vjetera, a pojavom mezoskalnih ili sinoptičkih sustava uvodi se još energije i dodatno destabiliziraju navedeni procesi.

2.2. Podaci i odabrani slučajevi

2.2.1. Prizemna mjerenja

S obzirom da je ranojutarnja tuča već analizirana duž sjeveroistočne obale Jadrana, a klimatološki zapis tuče ima specifični dnevni hod tipičan za obalu (Blašković i sur., 2023.) koji je sve izraženiji prema jugu Hrvatske, ovdje je fokus na najjužnijem dijelu hrvatske obale.



Slika 2.1. Lokacije glavnih mjernih postaja korištenih u analizi. Brojevi uz postaje odgovaraju brojevima u tablici 2.1.

U ovome radu korištena su mjerenja iz nacionalne meteorološke mreže Državnog hidro-meteorološkog zavoda (DHMZ) koja su omogućila analizu stanja atmosfere te evaluaciju numeričkog modela fine razlučivosti. Stoga su preuzete satne vrijednosti temperature ($^{\circ}\text{C}$) na 2 m visine te satne brzine vjetera (ms^{-1}) na 10 m visine s odabranih postaja čije su lokacije prikazane se na slici 2.1. i u tablici 2.1.

Tablica 2.1. Popis glavnih postaja korištenih u analizi te njihove koordinate

Broj	Ime postaje	Geografska širina φ	Geografska dužina λ
1	Split-zračna luka	43°32'22"	16°18'5"
2	Split-Marjan	43°30'30"	16°25'35"
3	Komiža	43°02'55"	16°5'14"
4	Hvar	43°10'15"	16°26'14"
5	Makarska	43°17'16"	17°1'12"
6	Ploče	43°02'51"	17°26'34"
7	Lastovo	42°46'6"	16°54'1"
8	Dubrovnik	42°38'41"	18°5'06"
9	Dubrovnik-zračna luka	42°33'36"	18°15'50"

Satni podaci o vjetru sadrže dvije informacije: brzinu vjetra (ms^{-1}) i smjer vjetra ($^{\circ}$). Izvorni podaci vjetra mjereni su svakih 10 minuta te je za interval od 10 minuta prije punog sata izračunat satni srednjak što se uzima kao konačna vrijednost za taj sat. Uz skalarnu brzinu vjetra preuzet je i prevladavajući, srednji smjer, vjetra u tom satu prikazan na skali od 0 do 32 koji se trebao prevesti na 360° vrijednosti meteorološkog kruga / ruže vjetra. Primjer za izvorne podatke o vjetru mogu se vidjeti u tablici 2.2. za 14 h izmjereno 21.10.2022. na postaji Dubrovnik.

Tablica 2.2. Izgled mjerenja srednjih satnih vrijednosti vjetra na 10 m visine

Sat	Prevladavajući smjer	Brzina [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$]
0-1	2	7,8
1-2	2	7,6
2-3	2	6,6
3-4	2	7,5
4-5	2	5,9
5-6	2	6,4
6-7	2	6,1
7-8	2	6,0
8-9	2	4,1
9-10	12	2,9
10-11	16	6,3
11-12	16	3,6
12-13	20	3,3
13-14	20	2,9

2.2.2. Mjerenja tuče

Dodatno su u radu korišteni podaci o tuči prikupljeni iz DHMZ-ove mreže prizemnih postaja koje uključuje glavne meteorološke postaje (GMP), klimatološke postaje (KMP) te kišomjerne postaje (KŠP). Podaci su dobiveni iz meteoroloških dnevnika motrenja te su nedavno digitalno obrađeni i pohranjeni u obliku digitalne baze podataka o tuči (Jelić i sur., 2020.; Jelić, 2022.; Blašković i sur., 2023.). Podaci su dostupni iz razdoblja od 1961. do 2020., sa 186 postaja diljem Hrvatske, od kojih je 40 GMP, 100 KMP te 46 KŠP. Svaki opaženi podatak uključuje informaciju u koje vrijeme je opažena tuča (godina, mjesec i dan događaja, njegov vremenski početak i kraj ili trajanje) te intenzitet pomoću nekoliko kategorija (0, 1 ili 2). Samo ovi podaci o tuči za Hrvatsku imaju duge vremenske nizove, npr. duže od 30 godina te su predstavljali osnovu za izbor odabranih slučajeva i njihovu analizu.

Treba još spomenuti da je intenzitet tuče varijabla koja se ne može izravno povezati s bilo kojom numeričkom vrijednošću veličine zrna tuče budući da je ova klasifikacija određena protokolom prikupljanja podataka na DHMZ-u. Kao što je već spomenuto procjena intenziteta dostupna je iz dnevnika i kategorizirana je kroz tri razine: 0 (slabi intenzitet), 1 (srednji intenzitet) i 2 (jaki intenzitet). Motritelji DHMZ-a najčešće dodaju opisnu bilješku o uočenoj veličini tuče povezujući intenzitet 1 ili 2 s veličinom zrna tuče koji bi odgovarali lješnjaku ili orahu. Opisne veličine (lješnjak i orah) odgovaraju promjerima od 10-20 mm za lješnjak i 20-30 mm za orah.

Kategorije intenziteta tuče napravljene su prema vrlo opsežnim, opisnim uputama. Kombinacijom gore navedenima s poznatim opisima ANELFA (Dessens i sur., 2007.) i TORRO ljestvice (Webb i sur., 2001.) može se grubo procijeniti da većina zapisa o tuči koji se odnose na jak intenzitet odgovara veličinama tuče od 15 mm ili većim, a srednji intenzitet uključuje veličine između 10-15 mm. Intenzitet 0 odgovara zrnima tuče između 5 do 10 mm, a usporedba je prikazana u tablici 2.3.

Tablica 2.3. Usporedba skala veličina zrne tuče

Skale / Izvori	Intenzitet / Kategorija					
ANELFA	x	A0	A1	A1-A2	A2	A3
TORRO	H0	H1	H1-H2	H2-H3	H3	H3-H4
DHMZ	Slab intenzitet (0)	Slab intenzitet (0)	Umjeren intenzitet (1)	Jak intenzitet (2)	Jak intenzitet (2)	Jak intenzitet (2)
Odgovarajuća veličina zrna [mm]	5	5-10	10-15	15-25	20-30	>25
Opis štete	C0	C1	C2	C3	C4	C5

Upute koje ih definiraju su:

- ukupna (C5) ~ minimalna uočena šteta uključuje potpunu štetu na svim usjevima (povrće, voće, grane), vidljiva oštećenja na plastici i potencijalna oštećenja automobila,
- značajna (C4) ~ minimalna uočena šteta uključivala je ozbiljnu štetu na povrću, voću, uništenim mekšim kulturama, ali nema vidljivih oštećenja na plastici ili automobilima,

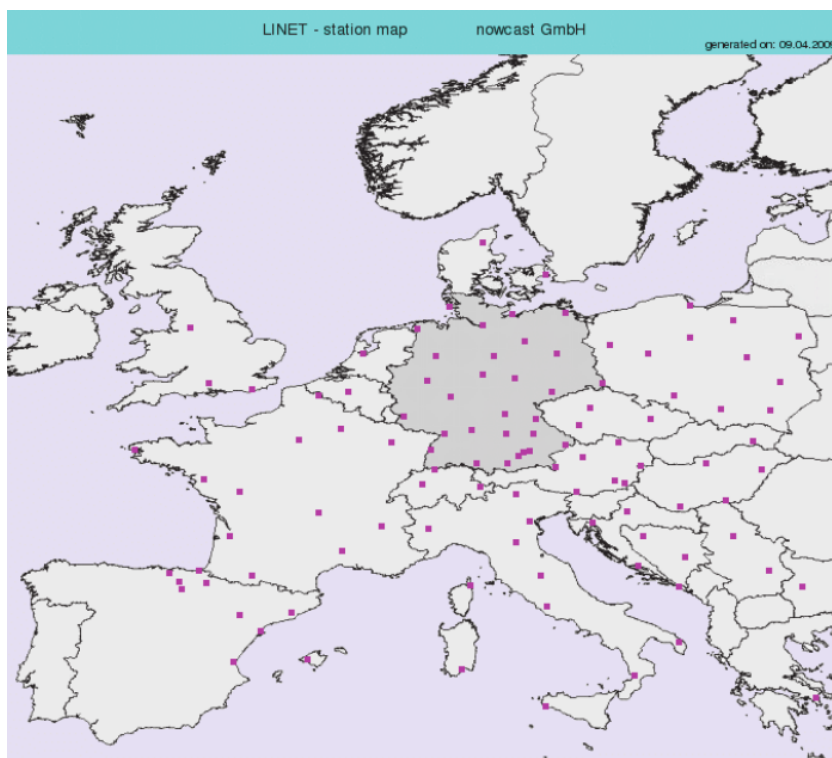
- značajna (C3) ~ minimalna uočena šteta uključuje ozbiljne štete na mekšim kulturama i značajne štete na povrću i voću,
- umjerena (C2) ~ minimalna uočena šteta uključuje značajna oštećenja na mekšim kulturama,
- vidljiva (C1) ~ minimalna uočena oštećenja uključena sporadična punktacija lišća na mekšim kulturama (salata, vinova loza...),
- nema (C0) ~ nema uočenih oštećenja.

Ipak, veliki intenzitet ne mora predstavljati samo zrna velikog promjera već može značiti i velik broj (veću gustoću) manjih zrna. Također se ne može procijeniti kolika je razlika između intenziteta tuče u usporedbi tople i hladne sezone tijekom godine. Međutim, iako je moguće da informacije o intenzitetu ponekad impliciraju gustu tuču malog promjera, najvjerojatnije je velik intenzitet povezan s velikim zrnima tuče. Ovo je subjektivna procjena svakog motritelja DHMZ-a te je moguće da motritelj odluči klasificirati veliku tuču sa srednjom kategorijom 1 (zbog određenog preklapanja / slijeda kategorija u tablici 2.3), ali najčešće kategorija 2 doista odgovara veličinama tuče promjera najmanje 20 mm (Jelić, 2024, osobna komunikacija). Navedeno često podupiru opažene negativne posljedice u poljoprivredi te materijalne štete na gospodarskim objektima i imovini.

2.2.3. Munje

Podaci o opaženoj aktivnosti munja dobiveni su iz sustava za lociranje udara munja (engl. *Lightning Location System*) koji je dio međunarodne mreže za detekciju munja LINET (engl. *Lightning Detection Network*; Betz i sur., 2009.). LINET mreža mjeri munje na više kontinenata, a u Europi sadrži oko 190 senzora rasprostranjenih po europskim zemljama (njih 21) s međusobnom udaljenošću do 250 km. U Hrvatskoj senzori su postavljeni na šest lokacija: Zagreb, Rijeka, Zadar, Split, Korčula te Dubrovnik. U radu je fokus na podacima senzora smještenima u Dalmaciji u promatranoj domeni.

Mreža uspješno detektira više vrsta munja; razlikuje udare između oblaka i tla (engl. *Cloud-To-Ground*, CG), unutar oblaka (engl. *Intracloud*, IC) i iz oblaka u oblak (engl. *Cloud-To-Cloud*, CC) te električne izboje od oblaka prema stratosferi. Osim tipa CG koji se izravno mjeri, ostali tipovi su prisutni u podacima kao podaci tipa IC. Zajedno tipovi munja CG i IC daju podatak o ukupnom električnom pražnjenju (engl. *Total Lightning*). Ujedno je moguće razlikovati munje i prema predznaku; pozitivna i negativna električna pražnjenja diljem Europe. Raspored senzora vidljiv je na slici 2.2.



Slika 2.2. Raspored senzora za detekciju munja u mreži LINET (Betz i sur., 2009.)

Općenito, prva mjerenja munja nisu imala mogućnost razlikovanja dva osnovna tipa munja, tip CG od tipa IC. Nadalje imala su nisku učinkovitost detekcije, netočnosti u određivanju lokacije munje, nemogućnost detekcije malih amplituda udara te naknadnih udara itd. Posljednjih godina navedeni nedostaci su uglavnom otklonjeni u mreži LINET.

U Hrvatskoj i duž jadranske obale točnost izvora podataka o munjama (iz mreže LINET) analizirana je u nekoliko studija, npr., Franc i sur. (2015.). Ove su studije pokazale da se od 2008. podaci iz mreže LINET kontinuirano poboljšavaju sljedećim promjenama (Jelić i sur., 2021.):

- *Veći broj senzora.* U prvim godinama širenja mreže na jugoistok Europe, broj senzora u mreži narastao je na njih šest duž teritorija Hrvatske, a povećao se i njihov broj u susjednim zemljama.
- *Povećanje točnosti mjerenja.* Zbog povećanja broja senzora, točnost izmjerene lokacije udara munje se poboljšala te je statistička pogreška lociranja ispod 100 m. Betz i sur. (2009.) izvijestili su da se u sustavu LINET unutar radijusa od 100 km munje detektiraju s točnošću od ± 100 m. Sustav LINET koristi metodu TOA (engl. *Time of Arrival*) za učinkovitost detekcije munja kao zbroj najmanje četiri senzora koji su zabilježili udar. Spomenuta metoda ima statističku srednju pogrešku lociranja od ± 84 m što ukazuje na vrlo visoku preciznost detekcije.
- *Mjerenja munja slabijih struja/intenziteta.* Od 2009. do 2018. u sustavu LINET, srednje vrijednosti detektiranih amplituda struje pokazale su dvostruko smanjenje. To znači poboljšanje u osjetljivosti detekcije munja, osobito onih koje su popraćene slabijim strujnim udarima. Budući da se munje slabijeg intenziteta javljaju vrlo često, povećana osjetljivost mjerenja povećala je ukupan broj detektiranih udara munja od 2016. Trenutno je prosječni minimalni signal koji se može detektirati oko 0,7 kA.

2.2.4. Odabrani slučajevi

U radu je odabrano nekoliko slučajeva koji su simulirani numeričkim modelom, a obuhvaćaju pojavu jutarnje konvekcije i njezinih produkata na obali. U tu svrhu koristili su podaci o tuči iz digitalne baze iz rada Blašković i sur. (2023.) te postojeća mjerenja munja. Tuča u ranojutarnjim satima na području južne Dalmacije u podacima definirala je odabir četiri slučaja, po jedan u 2011. i 2018. te dva slučaja iz 2016. godine (tablica 2.4.).

Tablica 2.4. Odabrani slučajevi

Broj	Datum	Lokalno vrijeme i lokacija zabilježene tuče
S1	21.10.2011.	Dubrovnik 7:38 h
S2	13.1.2016.	Split 4:30 h, Hvar 6:40 h
S3	27.2.2016.	Mljet 8:30 h
S4	21.3.2018.	Hvar 9:19 h

Sinoptički uvjeti procijenjeni su korištenjem radiosondaže u Zadru u terminu 00:00 UTC (engl. *Coordinated Universal Time*), što odgovara 01:00 CET (engl. *Central European Time*), zoni u kojoj se nalazi promatrano područje. Sve se sondaže mogu pronaći na stranici: <http://rawinsonde.com/>.

Uz to, korištene su dijagnostičke prizemne karte te karte geopotencijalne visine apsolutne topografije izobarne plohe AT 500 hPa koje su preuzete sa stranice: <https://www.wetter3.de/>.

2.3. Numerički modelski sustav WRF

2.3.1. Opća obilježja

Model WRF (Skamarock i sur., 2019.) je mezoskalni numerički model koji se koristi kao alat za prognozu vremena, ali i za istraživanje i analiziranje obilježja atmosfere. Zbog toga postoje dvije verzije modela: WRF-NMM (engl. *Weather Research and Forecasting-Nonhydrostatic Mesoscale Model*) korišten u operativne svrhe i svakodnevnoj prognozi i druga verzija, koja je i ovdje korištena, je WRF-ARW (engl. *Weather Research and Forecasting-Advanced Research WRF*) korišten za istraživanje zbog velikog broja dostupnih parametrizacija različitih meteoroloških procesa. Model je naširoko korišten od velikog kruga korisnika, a dostupan je preko američkog nacionalnog centra za istraživanje atmosfere, NCAR (engl. *National Center for Atmospheric Research*).

Neke od glavnih postavki i parametrizacija korištenih u modelu za zračenje (dugovalno i kratkovalno), mikrofizičke osobine oblaka i oborine, granični sloj i turbulenciju, razlučivost u horizontali i po vertikali navedene su u tablici 2.5.

Modelske postavke uključuju odabir triju teleskopski jednosmjerno ugniježđenih domena (D01, D02, D03). Mrežni koraci smanjivali su se s početnih 9 km prema 1 km (tablica 2.5) poštujući međusobni omjer 3 (slika 2.3). Uzimajući u obzir važnost dobre razlučivosti u vertikalnom smjeru, vertikalna mreža modela je razdijeljena s 97 vertikalnih razina. Model WRF koristi hibridnu vertikalnu koordinatu sigma-tlak. Tijekom vremenske integracije WRF-ov vremenski koraci su iznosili od 40 s u D01 preko 13,3 s u D02 do 4,4 s u D03 za simulacije od 9 km (D01), 3 km (D02) te 1 km (D03). Topografija i kategorije zemljišnog pokrova, LC (engl. *Land Cover*) preuzete su iz baza podataka GMTED (engl. *Global Multiresolution Terrain Elevation Data*) i MODIS (engl. *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) s razlučivošću od 30 kutnih sekundi. Simulacije su pomoću podataka iz analiza

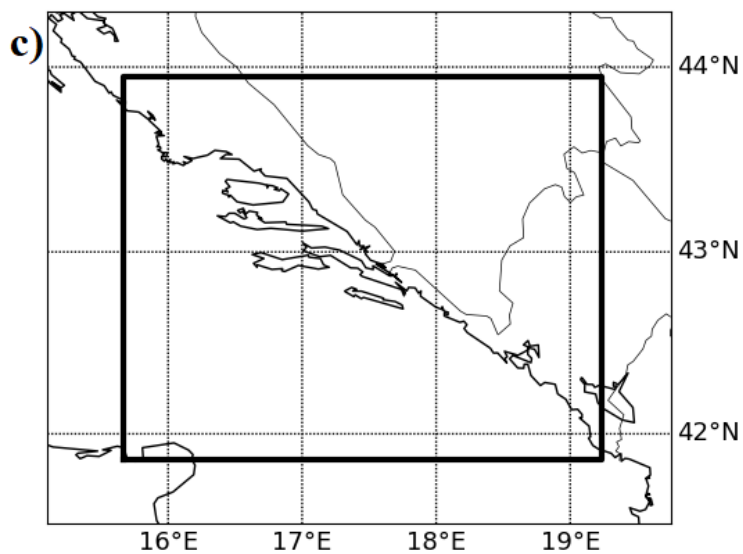
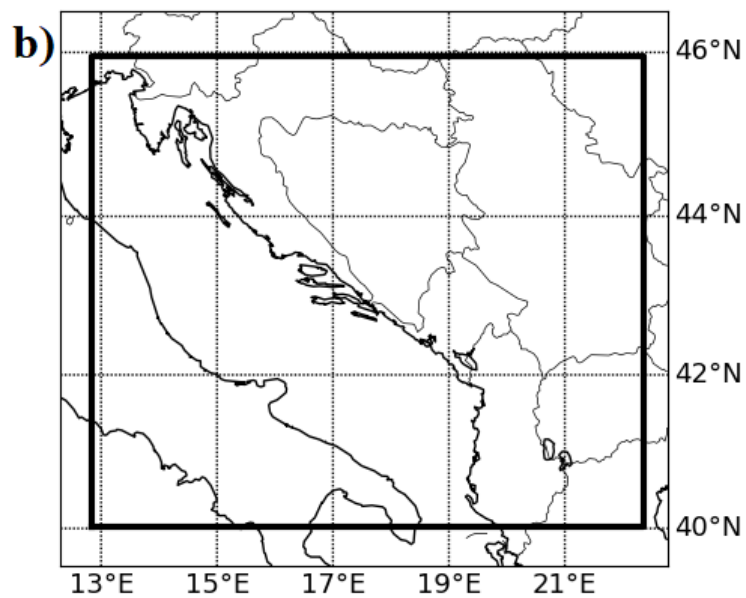
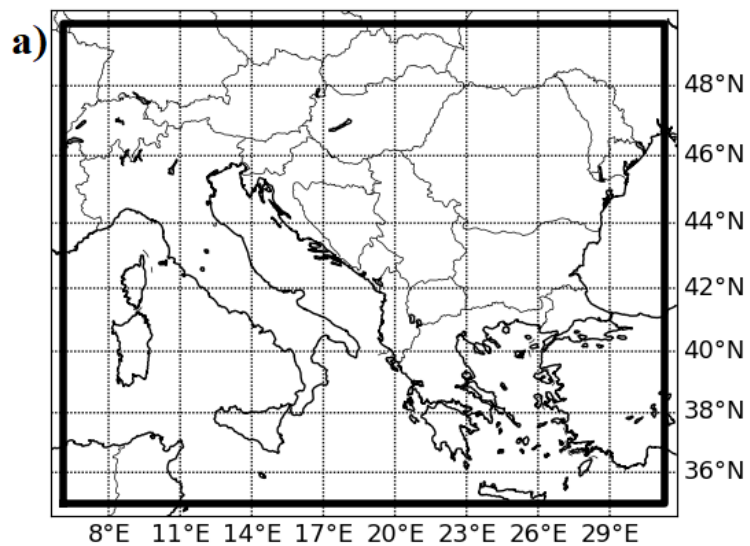
globalnog modela ECMWF IFS (engl. *European Centre for Medium-range Weather Forecasts IFS*) definirane na bočnim granicama te inicijalizirane u 12 UTC, dan prije nego što je primijećena jaka konvekcija. Vremensko trajanje simulacija je 30 h sa zapisom rezultata modela od 1 h.

Razmak mrežnih točaka od 3 km i 1 km omogućuje modelu da eksplicitno predstavi konvektivne procese pa se stoga u unutarnjoj domeni ne primjenjuje parametrizacija za nastanak i razvoj kumulusa. U najvećoj domeni, konvekcija je u modelu WRF parametrizirana pomoću Kain-Fritschove sheme. Ostale korištene opcije uključuju shemu zračenja (RRTM) za dugovalno zračenje i shemu Dudhia za kratkovalno zračenje. Što se tiče parametrizacije planetarnog graničnog sloja koristi se shema MYNN2.5 te za mikrofizička obilježja oblaka shema WSM6.

Model WRF-ARW je združen s dva algoritma; jednim koji se zove HAILCAST i omogućuje prognozu pojave tuče te drugi koji na temelju izlaznih polja/rezultata omogućuje procjenu nastanka munja. Modelske postavke koje objedinjuju WRF model s dodanim opcijama za simuliranje tuče i munja opsežno su testirane na više desetaka odabranih slučajeva u dvije prethodne studije koje su izradili Malečić i sur. (2022., 2023.). One su ukazale na optimalan izbor parametrizacija za simuliranje tuče za područje Hrvatske. Stoga se u ovom radu također koristi predloženi modelski sustav WRF-ARW (verzija 4.1) u koji je integriran algoritam za rast tuče HAILCAST te indeks potencijala aktivnosti munja LPI, čiji je pregled dan u sljedećim poglavljima.

Tablica 2.5. Numeričke parametrizacije u WRF modelu

Parametar	Postavka u WRF
Broj točaka u domeni	D01 - 228 × 187 D02 - 259 × 223 D03 - 292 × 235
Korak mreže ($\Delta x \times \Delta y$)	D01 - 9 km × 9 km D02 - 3 km × 3 km D03 - 1 km × 1 km
Broj vertikalnih nivoa	97
Mikrofizika	WSM6 shema
Dugovalno zračenje	RRTM shema
Kratkovalno zračenje	Dudhia shema
Atmosferski granični sloj	MYNN 2.5 TKE shema
Fizika kumulusa	Kain-Fritsch shema, samo u D01
Vremenska integracija	Runge-Kutta 3. reda
Početna temperatura na razini mora	290 K
Munje	LPI
Tuča	HAILCAST



Slika 2.3. Prikaz triju teleskopski ugniježđenih domena korištenih u modelu; (a) domena 1 (D01), (b) domena 2 (D02), (c) domena 3 (D03)

2.3.2. Indeks potencijalnog razvoja munja - LPI

Mjera potencijala za odvajanje naboja u grmljavinskom oblaku koje dovodi do pojave munja zovemo indeksom potencijalnog razvoja munja (engl. *Lightning Potential Index*, LPI) (npr., Yair i sur. 2010.). Dobiva se računanjem volumnog integrala ukupnog masenog toka leda i tekuće vode između izoterma 0 °C i 20 °C (jed. 2.1.):

$$LPI = \frac{1}{V} \iiint \epsilon w^2 dx dy dz \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right], \quad (2.1.)$$

gdje je $V[\text{m}^{-3}]$ jedinični volumen modela, dx , dy , dz [m] su koraci mreže modela, w [ms^{-1}] vertikalna brzina, a ϵ bezdimenzionalna veličina ovisna o omjerima miješanja leda, snijega, solike i tekuće vode. Više detalja o samom indeksu može se naći u drugim studijama kao što su npr.: Yair i sur. (2010.) i Malečić (2023.). Navedeni temperaturni prozor koristi se u zoni gdje je najunčikovitiji neinduktivni mehanizam odvajanja naboja međusobnim sudarima kristala nastalih difuzijom vodene pare te čestica solike koje rastu prirastom prehladne tekuće vode.

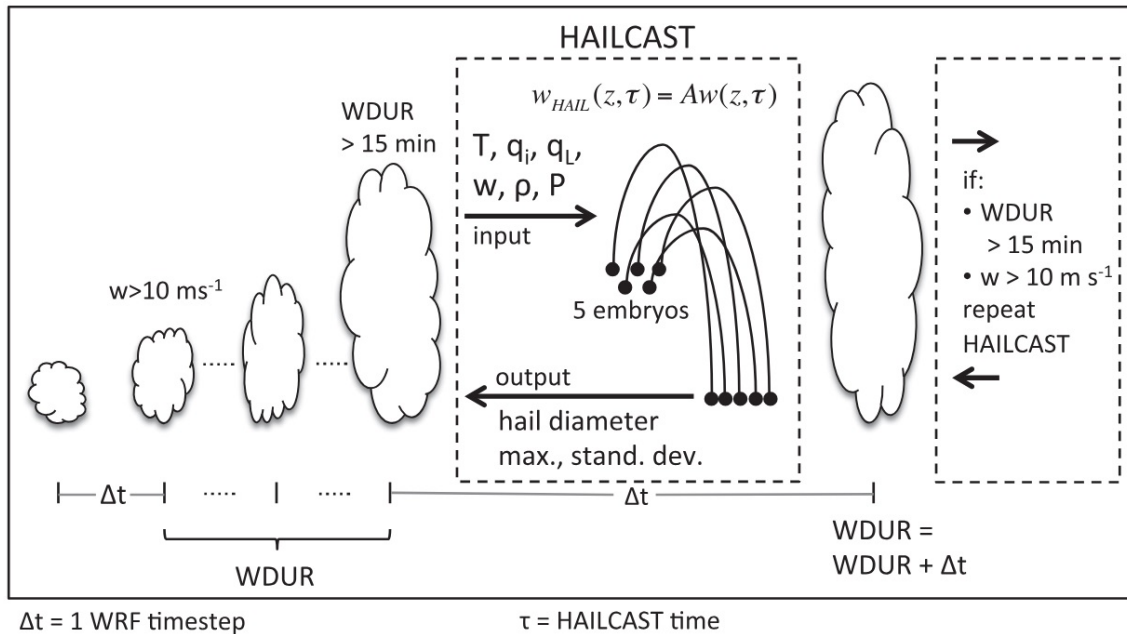
Indeks LPI treba postići vrijednost različitu od 0 za što je potrebno ostvariti nekoliko uvjeta. Vertikalna brzina u točki mreže mora biti veća od $0,5 \text{ ms}^{-1}$, vertikalna brzina u susjednim točkama mreže također mora biti veća od $0,5 \text{ ms}^{-1}$, navedene točke moraju biti u nestabilnom okruženju te u prijašnje navedenoj zoni temperaturnog prozora. Nestabilno se okruženje provjerava računanjem parametra CAPE u sloju miješanja (eng. *Mixed Layer CAPE*), a računamo ga integracijom u sloju od 500 hPa do 50 hPa (npr., Malečić, 2023.).

S obzirom da je jedan od ciljeva evaluacija produkata konvekcije u numeričkim simulacijama, verificirana je i pojava munja s obzirom na dostupne podatke. Pritom su korišteni podaci iz nedavno oformljene 2D baze podataka o pojavi munja (Jelić i sur., 2021.). Horizontalna rezolucija podataka iz 2D baze je 3 km, dok je vremenska rezolucija 2 min. Kako indeks LPI predstavlja ukupni potencijal za aktivnost munja bez preferencije prema vrsti i polaritetu pražnjenja, iz baze te iz modela je uzeta samo evaluirana ukupna aktivnost munja.

2.3.3. HAILCAST

WRF-HAILCAST je vremenski ovisan model razvoja zrna tuče te je integriran u WRF-ARW. Na njemu se radi zadnjih 20-ak godina (Brimelow i sur., 2002.), a izvorni 1D model HAILCAST sastoji se od modela stacionarnog oblaka s vremenski ovisnim modelom razvoja zrna tuče. Ideja je da se može implementirati u kompleksne modele koji izravno razlučuju konvekciju, a da se pritom umjesto varijabli iz stacionarnog modela oblaka mogu koristiti prognostičke varijable iz modela.

U ovom radu korištena je dorađena verzija modela HAILCAST integrirana u WRF-ARW (više o tome u npr., Malečić, 2023.). Implementirana verzija (slika 2.4) koristi simulirane profile vertikalne brzine, temperature i omjere miješanja hidrometeora iz određenog vremenskog koraka i modeliranih vertikalnih profila iz modela WRF. Numeričke simulacije na finim mrežama, s korakom ≤ 4 km, dobro reproduciraju sinoptičke sustave te istovremeno dobro razlučuju i polja hidrometeora te mikrofizičke i konvektivne procese male skale.



Slika 2.4. Način rada WRF-HAILCAST (Adams-Selin i Ziegler, 2016.)

Nužni uvjeti za aktivaciju HAILCAST-a su sljedeći. Ako u mreži postoji bilo koji profil čija vertikalna brzina prelazi 10 ms^{-1} , a te brzine traju dulje od 15 min, HAILCAST-u se prosljeđuju profili vertikalne brzine, temperature te omjeri miješanja leda, snijega i tekuće vode iz tog stupca. Tada započinje umetanje pet embrija tuče unutar oblaka i to dva embrija promjera 5 i 7,5 mm na razini $-8 \text{ }^\circ\text{C}$ te njih tri promjera 5, 7,5 i 10 mm na razini $-13 \text{ }^\circ\text{C}$. Njihova evolucija se prati u vremenski promjenjivoj uzlaznoj struji. Nakon $\sim 2000 \text{ s}$ ili u slučaju smanjivanja vertikalne brzine ispod 10 ms^{-1} zrna tuče ispadaju iz oblaka, a izračunati maksimalni promjer tuče zapisuje se u izlaznim rezultatima modela WRF-ARW i prelazi se na sljedeći vremenski trenutak (Malečić, 2023.).

2.3.4. Metoda dekompozicije skala

Odabrani mali mrežni koraci trebali bi doprinijeti dobroj reprodukciji različitih skala gibanja (od sinoptičke skale prema mikroskali). Ipak, kako bi se dobila bolja slika o tome koji sustavi i koja strujanja na različitim skalama imaju najveći utjecaj u pojavu ranojutarnjih tuča, provedena je dekompozicija skala strujanja. Prema razrađenoj metodi u Malečić (2023.) korištena je metoda dekompozicije skala strujanja pomoću Barnesovog filtra u svrhu odvajanja makroskalnog, mezoskalnog i mikroskalnog strujanja u ukupnom strujanju (Barnes, 1973.). Filtar primjenjujemo na komponente horizontalne brzine u i v za neku točku mreže (i, j) . Prvo su filtrirane horizontalne komponente brzine mikroskale, u_s, v_s , uz nužno definiranje konstanti koje su testirane u Malečić (2023.), a većinom preuzete iz rada Xu i sur. (2017.) Potom su filtrirane horizontalne komponente brzine makroskale u_l, v_l , a horizontalne komponente brzine mezoskale su tada dobivene kao razlika horizontalnih komponenata ukupne brzine u i v i dobivenih horizontalnih komponenti brzina makroskale i mikroskale:

$$u_m = u - u_l - u_s, v_m = v - v_l - v_s$$

Detalji same metode mogu se naći u gore navedenoj literaturi.

2.3.5. Standardni parametri za evaluaciju mjerenja kod usporedbe s rezultatima modela

U svrhu procjene preciznosti modela u reprodukciji prizemnih atmosferskih uvjeta: tlaka, temperature i relativne vlažnosti, korišteno je nekoliko statističkih veličina. Za to su korištena satna mjerenja automatskih postaja iz mreže DHMZ-a, navedene u tablici 2.1. Dodatno, vrijednosti tlaka svedene su na srednju morsku razinu kako bi se mogle usporediti.

Prva korištena statistička veličina je pristranost modela, BIAS, definirana kao:

$$BIAS = \overline{M} - \overline{O} \quad (2.2.)$$

Ovdje \overline{M} predstavlja vrijednost dobivenu modelom, dok je \overline{O} opažena, tj. izmjerena vrijednost. Pristranost (BIAS) nam služi za jednostavnu procjenu razlike između izmjerenih i modelski dobivenih vrijednosti, pokazuje nam koliko model precjenjuje ili podcjenjuje vrijednosti izmjerenih meteoroloških elemenata. Što je ova razlika bliža 0, to je model točniji u računanju, tj. modelirane vrijednosti su bliske izmjerenima.

Druga korištena veličina je korijen srednje kvadratne pogreške, RMSE (engl. *Root Mean Square Error*), definiran kao:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad (2.3.)$$

Svaka vrijednost razlike između modela i mjerenja kvadrirana je kako bi se bolje istaknule veće pogreške modela i izbjegle negativne vrijednosti. Služi kao direktna mjera preciznosti modela i što je RMSE bliži 0, to je model točniji u reproduciranju mjerenja, ali to u praksi nikad nije postignuto.

Korišten je i koeficijent korelacije r , definiran na sljedeći način:

$$r = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \overline{M})(O_i - \overline{O})}{\sigma_M \sigma_O}, \quad (2.4.)$$

gdje su σ_M i σ_O standardne devijacije podataka iz modela i izmjerenih podataka:

$$\sigma_M^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - \overline{M})^2, \quad \sigma_O^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \overline{O})^2 \quad (2.5.)$$

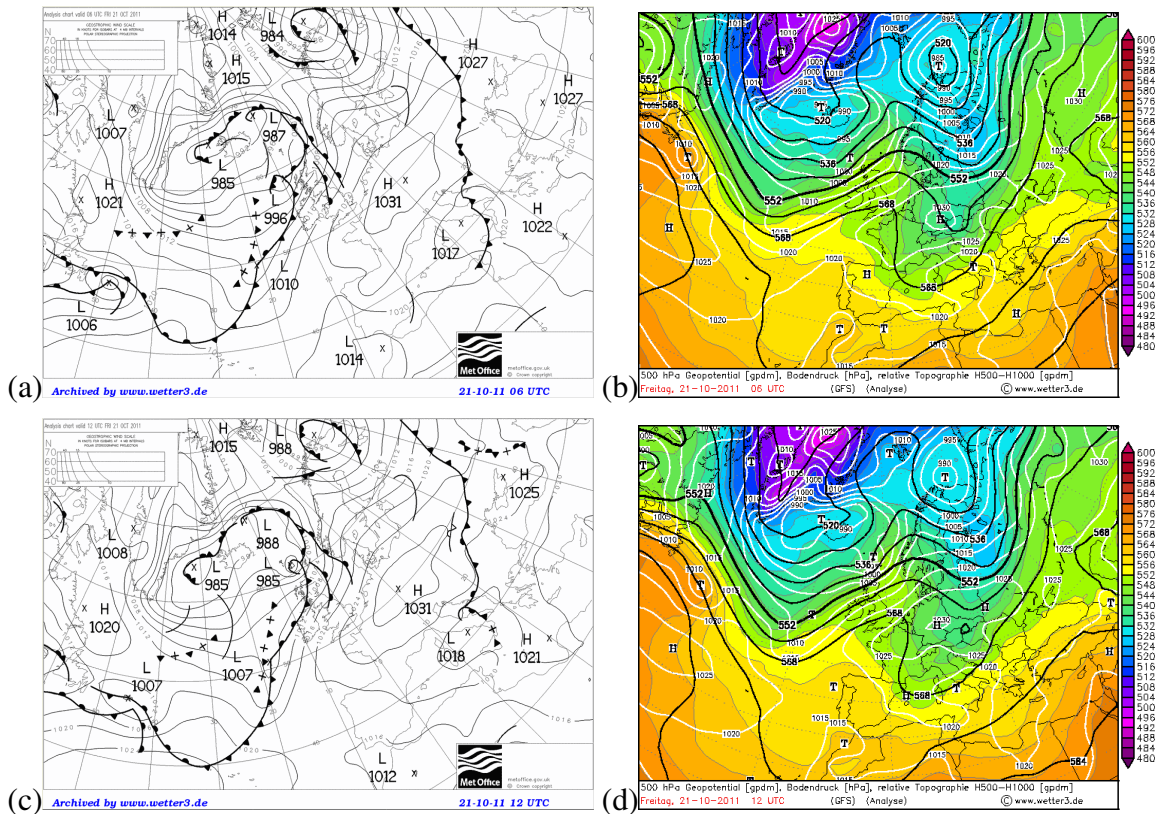
Koeficijent korelacije predstavlja mjeru linearne korelacije između dva seta podataka, zapravo je normalizirana mjera kovarijance između podataka. Zbog toga mu je vrijednost uvijek između -1 i 1, gdje 1 označava savršenu korelaciju, rastom vrijednosti varijable iz prvog seta raste vrijednost varijable iz drugog seta podataka, dok -1 označava suprotnu korelaciju, rastom vrijednosti varijable iz prvog seta pada vrijednost varijable u drugom setu podataka. Ako je r jednak 0, setovi nisu nimalo korelirani.

3. Rezultati i diskusija

3.1. Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja (S1) iz 21.10.2011.

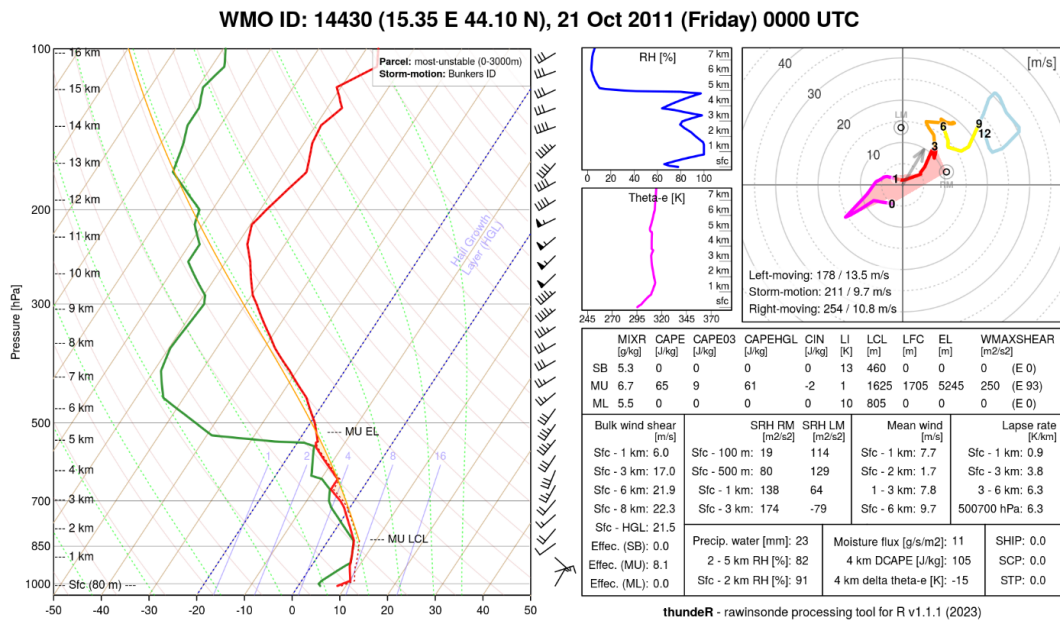
U danima koji su prethodili slučaju S1, nad Europom je dominiralo nekoliko baričkih formacija u prizemnom polju tlaka; područja dviju ciklona na sjeveru i jugu kontinenta koje su razdvojene područjem povišenog tlaka nad središnjom Europom. Sjeverna i sjeverozapadna Europa nalazila se pod utjecajem prostrane prizemne ciklone koja se zadržavala iznad Skandinavije. Iznad Jadrana formira se također manja i plića ciklona s centrom iznad sjevernog dijela Jadranskog mora. Ovakav raspored u polju tlaka omogućio je formiranje izduženog frontalnog poremećaja koji se premještao sa sjeverozapada na jugoistok Europe te je došao nad Istru i sjevernu Hrvatsku u poslijepodnevnim satima 20.10.2011. (slika 3.1a, c). Daljnjim premještanjem fronte, 21.10.2011. konvektivni sustav zahvaća jugoistočnu obalu Jadrana i donosi grmljavinsko nevrijeme i kišu što potvrđuju i SYNOP izvješća toga dana za postaju Dubrovnik. Na istoj postaji je također zabilježena i tuča u 05:38 UTC. Iz izvješća se također dobiva informacija da je vrijeme u 03:00 UTC uglavnom stabilno uz vjetar od 7 ms^{-1} i relativnu vlažnost zraka od 83 %. U 06:00 UTC u izvješću je zapisano grmljavinsko nevrijeme uz kišu i isti vjetar, ali s relativnom vlažnosti od 100 %.

Visinska karta 500-hPa plohe (slika 3.1b, d) pokazuje da se iznad Skandinavije formirala duboka ciklona. Ona doprinosi razvoju visinske doline u nižim geografskim širinama u sredini troposfere donoseći hladan zrak po visini. Od 20.10.2011. u 00:00 UTC dolazi do pomicanja visinske doline istočno preko Europe, međutim prizemna situacija u kojoj se javlja gibanje u smjeru kazaljke na satu u središnjoj Europi, kao i protusatno gibanje u cikloni, uzrokuje odumiranje plitke jadranske ciklone koja se nalazila u završnom stadiju razvoja tijekom čega se stvara okludirana fronta. Na sjevernom dijelu Jadrana započinje formiranje sjeveroistočnog strujanja, dok se preko južne Hrvatske na prednjoj strani visinske doline stvara visinsko jugozapadno strujanje te jugo u prizemnom sloju koje potiče advekciju i dizanje vlažnog zraka. Uslijed toga dolazi do pojave tuče duž jadranske obale.



Slika 3.1. Sinoptička situacija na dan 21.10.2011. (a) prizemna karta u 06:00 UTC i (c) prizemna karta u 12:00 UTC (izvor: https://www.wetter3.de/Archiv/archiv_ukmet.html) te geopotencijalna visina izobarne plohe 500 hPa (gpdm, crne linije), relativna topografija RT 500/1000 (gpdm, boje) te prizemno polje tlaka (hPa, bijele linije) u (b) 06:00 UTC i (d) 12:00 UTC (izvor: https://www.wetter3.de/archiv_gfs_dt.html)

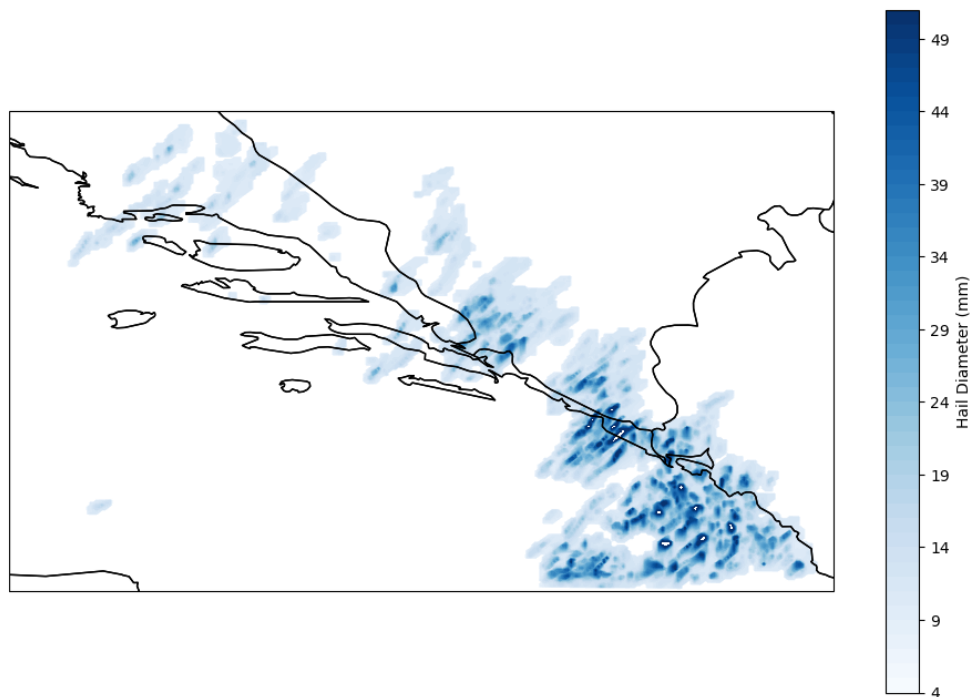
Na slici 3.2. prikazan je vertikalni profil atmosfere na postaji Zadar - Zemunik u terminu 00:00 UTC za 21.10.2011. Profil pokazuje mezoskalne i sinoptičke uvjete na jadranskoj obali. U ovom slučaju MU-CAPE je manjeg iznosa, 65 Jkg^{-1} , zbog male količine Sunčevog zračenja. CIN je jednak nuli, a blago je negativan ako promatramo MU-CIN. Atmosfera je stoga prilično stabilna i nema puno potencijala za slobodnu konvekciju, ali uz ovako malu vrijednost CIN-a, uvjeti su dovoljno dobri za njezin nastanak. Uz to, sav CAPE nalazi se u području između izoterma $0 \text{ }^\circ\text{C}$ i $20 \text{ }^\circ\text{C}$, području pogodnom za nastanak tuče. Vertikalni profili temperature zraka i temperature rosišta su veoma bliski između tla i visine od 5 km, u nekim dijelovima identični. To znači da je zrak skoro potpuno zasićen vlagom i jako pogodan za nastanak konvekcije i oborine. Unatoč niskoj vrijednosti CAPE-a, smicanje vjetra između tla i visine od 6 km je značajno i iznosi $21,9 \text{ ms}^{-1}$. Time je nastala konvekcija uglavnom produkt jakog vertikalnog smicanja vjetra, što je obilježje zimskih grmljavinskih oluja (Dolički, 2024.).



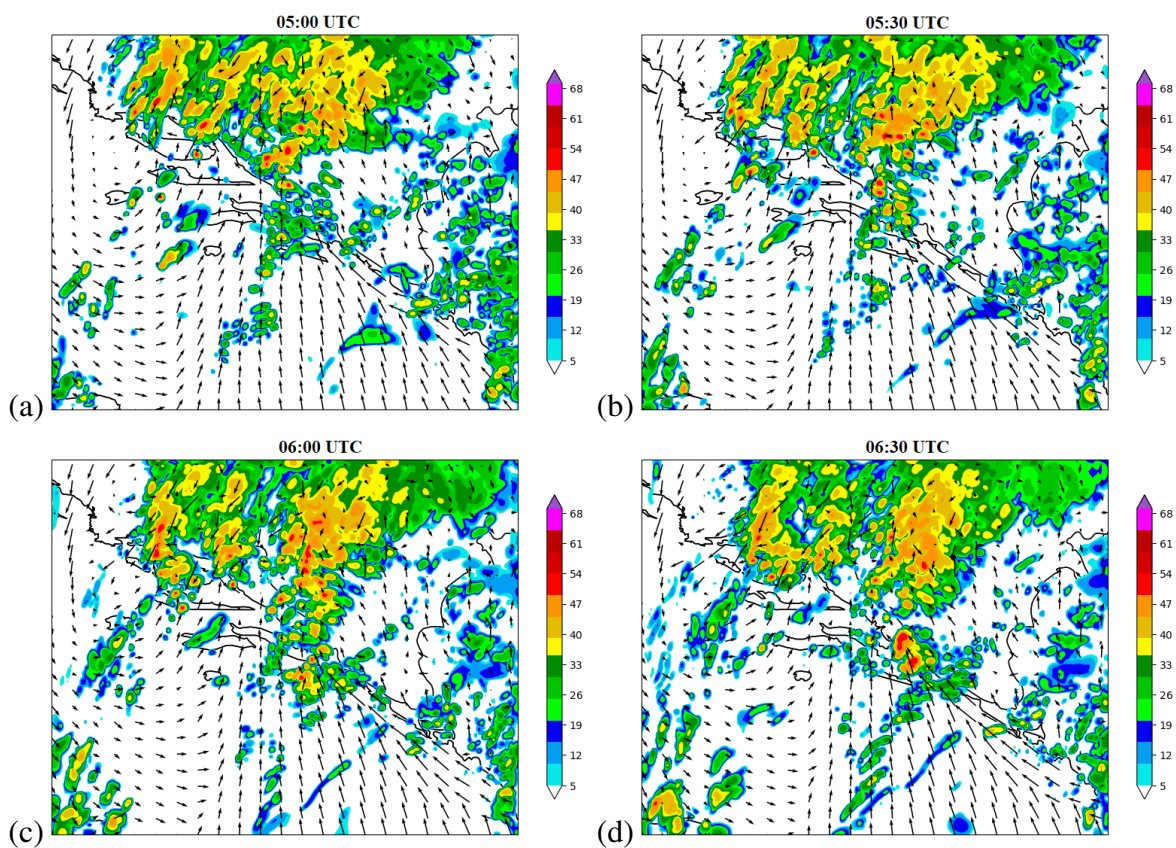
Slika 3.2. Vertikalni profil atmosfere na postaji Zadar - Zemunik 21.10.2011. u 00:00 UTC

Za slučaj S1 napravljena je i usporedba mjerenja s modelom za odabrane meteorološke parametre što je prikazano na sljedećim slikama. Slika 3.3. prikazuje simulirani dnevni maksimalni promjer tuče i mogućnost njezinog pojavljivanja na većem dijelu južnog Jadrana. Rezultati modela ukazuju na pojavu tuče između 2 i 3 cm južno od Pelješca, dok je na granici s Crnom Gorom simulirana velika tuča, promjera između 4 i 5,5 cm. Međutim, iako je prostorna pokrivenost u skladu s opažanjima s postaja, veličina zrna se ne poklapa s izmjerenim podacima, pokazujući da model precjenjuje koliko se velika tuča može očekivati. Model je također pokazao vremensko odstupanje u nastupu pojave tuče u području interesa. Između 05:00 UTC i 06:00 UTC modelski rezultati ne pokazuju pojavu tuče iznad južne Dalmacije, a prognozirana velika tuča od Dubrovnika do Crne Gore u vremenu između 16:00 UTC i 20:30 UTC nije imala potvrdu u dostupnim mjerenjima. To ipak ne znači da nije došlo do pojave velike tuče, već samo nemamo zabilježenu informaciju o tome.

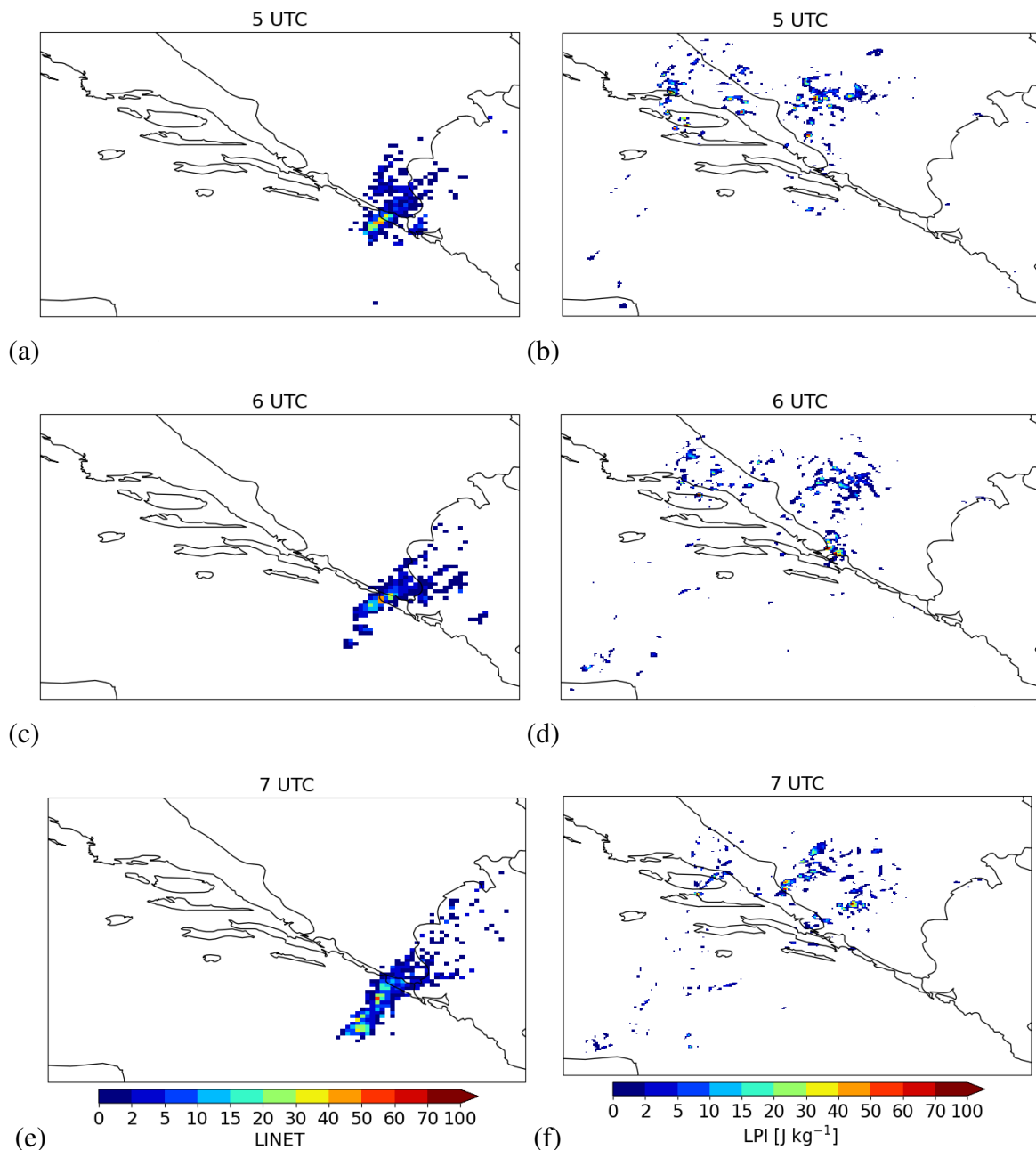
Simulirani radarski odrazi ne mogu se usporediti s radarskim mjerenjima jer su isti dostupni na tom dijelu Hrvatske tek nakon 2022. Ipak, možemo ih usporediti s izvješćima SYNOP sa svih postaja iz domene te dobiti sliku o tome kako se kretao konvektivni sustav i usporediti ju s rezultatom modela. Na slici 3.4. prikazan je simulirani radarski odraz za slučaj S1 (21.10.2011.) u razdoblju kada je opažena tuča. Smatra se da je tuča moguća u oblacima gdje je odraz veći od 50 dBz. Tuča je u Dubrovniku zabilježena u 05:38 UTC, a simulirani radarski odraz ukazuje na pojavu tuče (crvene boje) između 05:00 UTC i 06:30 UTC. Frontalni poremećaj se sporo premještao preko Dalmacije što model prostorno prilično dobro reproducira. Ipak, postoje određena prostorno-vremenska odstupanja. U vrijeme zabilježene tuče modelski rezultat ne daje nikakav radarski odraz nad područjem Dubrovnika, već sjeverozapadno, iznad Pelješca i Ploča. U 06:30 UTC izlaz iz modela bilježi slab radarski odraz iznad Dubrovnika, kada je zabilježena slaba kiša i jak odraz iznad područja Ploča kada je zabilježena jaka kiša. Vidimo i značajan odraz iznad Splita, gdje je stvarno zabilježena kiša u cijelome promatranom razdoblju. Model također daje jak odraz iznad Dubrovačkog područja između 14:00 UTC i 18:00 UTC te na najjužnijem dijelu između 18:00 UTC i 21:00 UTC, no to nije zabilježeno na mjernim postajama.



Slika 3.3. Simulirani dnevni maksimalni dijametar tuče za 21.10.2011.



Slika 3.4. Simulirani radarski odraz slučaja 21.10.2011. u (a) 05:00 UTC, (b) 05:30 UTC, (c) 06:00 UTC, (d) 06:30 UTC



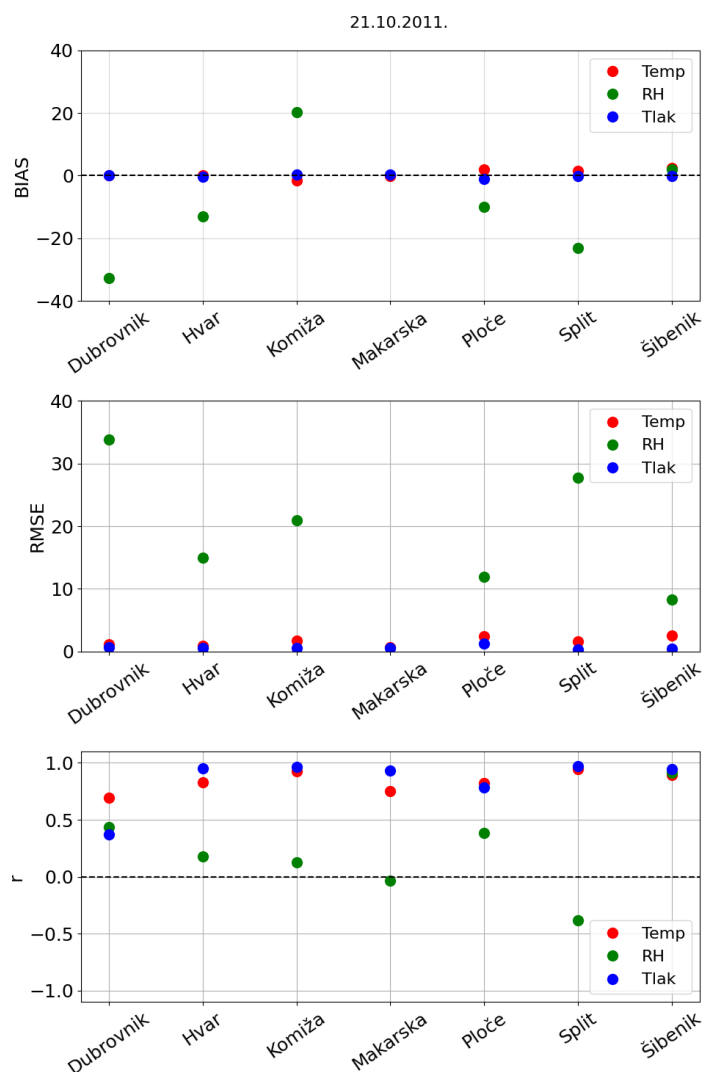
Slika 3.5. Podaci o pojavama munja iz LINET mreže (a, c, e) te modelski dobiven LPI pomoću jednadžbe 2.1. (b, d, f) za slučaj 21.10.2011.

Dobiveni rezultati aktivnosti munja (LPI, slike 3.5b, d, f) uspoređeni s izmjerenim podacima pojave munja iz mreže LINET (slike 3.5a, c, e).

Za ovaj slučaj promatrana je prostorna raspodjela udara munja između 05:00 UTC i 07:00 UTC, u vrijeme kada je konvektivni sustav prelazio preko jugoistočnog dijela Jadrana. Tada je tuča zabilježena u Dubrovniku u 05:38 UTC. Model uglavnom dobro prikazuje prostornu raspodjelu i kretanje konvektivnog sustava, kao i poziciju udara munja iz mreže LINET te ih ponešto precjenjuje. Također, model daje organiziraniji signal nad morem koji nema u potpunosti potvrdu u mjerenjima iz mreže LINET te kasni za njima oko 2 sata. Ipak, raspored munja se slaže s rezultatima modeliranog radarskog odraza na slikama 3.4a-d kada isti prelazi 60 dBz.

Na slici 3.6. prikazane su izračunate statističke veličine za tri meteorološka elementa, temperaturu zraka na 2 m visine, tlak i relativnu vlažnost.

Model je dobro prognozirao temperaturu zraka na 2 m visine od tla. Pristranost je na svim postajama jednaka 0 ili je jako bliska 0. Model u ovom slučaju malo podcjenjuje temperaturu u Komiži, maksimalno 3 °C, dok Ploče, Split i Šibenik malo precjenjuju temperaturu, za 1 °C ili 2 °C. Dobru procjenu modela potvrđuje i RMSE koji je na svim postajama nizak, najviši na postaji u Šibeniku s vrijednosti od 3 °C. Korelacija je dobra na svim postajama s vrijednostima od 0,6 ili više, dok je na postajama u Komiži, Splitu i Šibeniku veća od 0,9.



Slika 3.6. Izračunate statističke veličine za temperaturu (°C, crveno), tlak (hPa, plavo) i relativnu vlažnost (% , zeleno) za slučaj 21.10.2011. za odabrane postaje.

Visina (često izglađene) topografije u modelu u potpunosti ne odgovaraju stvarnim podacima i reljefu. Zbog toga je potrebno prije usporedbe vrijednosti tlaka zraka, obaviti redukciju tlaka zraka na razinu mora zbog razlike u nadmorskim visinama promatranih stvarnih postaja i onima iz modela. Ovo je napravljeno u svim simuliranim slučajevima. Tlak je na svim postajama dobro procijenjen uz jako mala odstupanja, manja od 1 hPa. Slično pokazuju i vrijednosti RMSE, koje su na svim postajama manje od 1 hPa, osim Ploča gdje je ta vrijednost bliža 2 hPa. Korelacija je jako dobra na svim postajama osim u Dubrovniku, veća

od 0,75, dok je u Dubrovniku oko 0,4.

Relativna vlažnost je manje uspješno prognozirana uz veliku pristranost na većini postaja. Najveće pristranosti su uočene u Dubrovniku i Komiži, dok je na ostalim postajama podudaranje bilo bolje. Tako je na Hvaru i u Pločama, gdje je manja od 20 % te u Šibeniku blizu 0 %. Inače je to varijabla koja objedinjuje pogreške temperature i tlaka zraka na postaji pa time može kompenzirati pogreške ili ih povećati ovisno o predznaku. RMSE također pokazuje slična odstupanja, Šibenik opet ima najmanju vrijednost pogreške, a prate ga Hvar i Ploče, dok postaja u Dubrovniku daje pogrešku od oko 35 %. Korelacija je niska na većini postaja, manja od $\pm 0,5$, dok su u Splitu mjerenja i model negativno korelirani. Postaja u Šibeniku jedina daje korelaciju višu od 0,9.

Na slici 3.7. uspoređeni su dnevni hodovi izmjerenih i modelski dobivenih vrijednosti brzine vjetra na visini od 10 m na svim dostupnim postajama.

Na postaji Dubrovnik vidimo potpuno drugačije ovisnosti brzine vjetra o vremenu, posebice između 05:00 UTC i 06:00 UTC kada je zabilježena tuča. Tada izmjerena brzina vjetra opada, a modelska brzina raste, stvarajući odstupanja i do 8 ms^{-1} . Postavlja se pitanje je li dobro odabrana točka u modelu koja predstavlja Dubrovnik te koliko topografija modela ima u tome utjecaj. Podudaranje je bolje nakon 15:00 UTC, kada su modelske vrijednosti puno bliže mjerenima te prate trend promjene.

Postaja na Hvaru pokazuje slabije slaganje mjerenja i modela prije 06:00 UTC nakon čega se počinju dobro slagati sve do 14:00 UTC, kada model počinje precjenjivati vrijednosti brzine, preko 2 ms^{-1} .

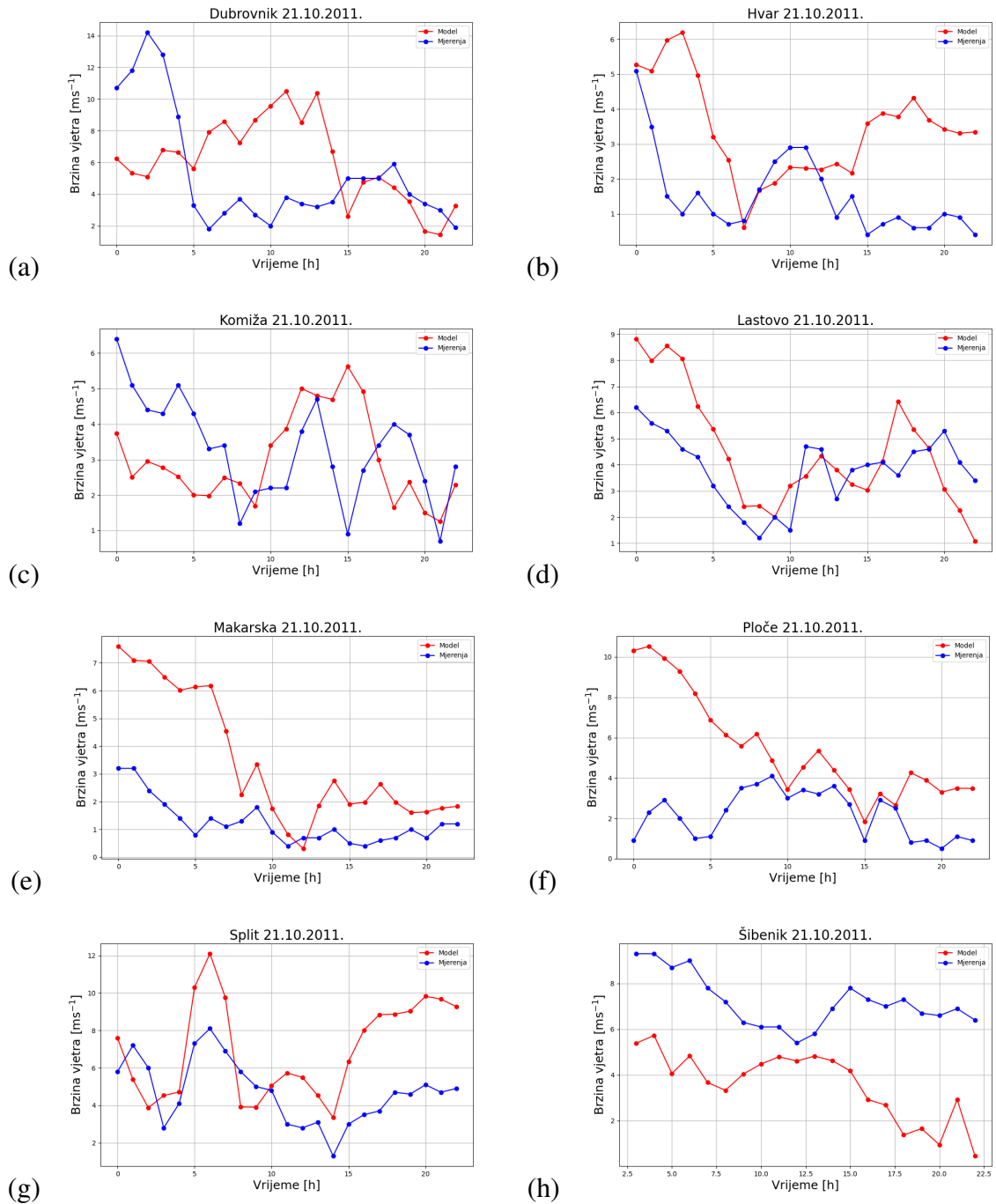
U Komiži model podcjenjuje vrijednosti brzine između $1,5 \text{ ms}^{-1}$ i 2 ms^{-1} , ali prati blagi trend pada vrijednosti brzine.

Na postaji u Lastovu vidimo relativno dobro slaganje mjerenja i modela, dok je na postaji u Makarskoj uočeno precjenjivanje vrijednosti u većem dijelu ispitivanog razdoblja.

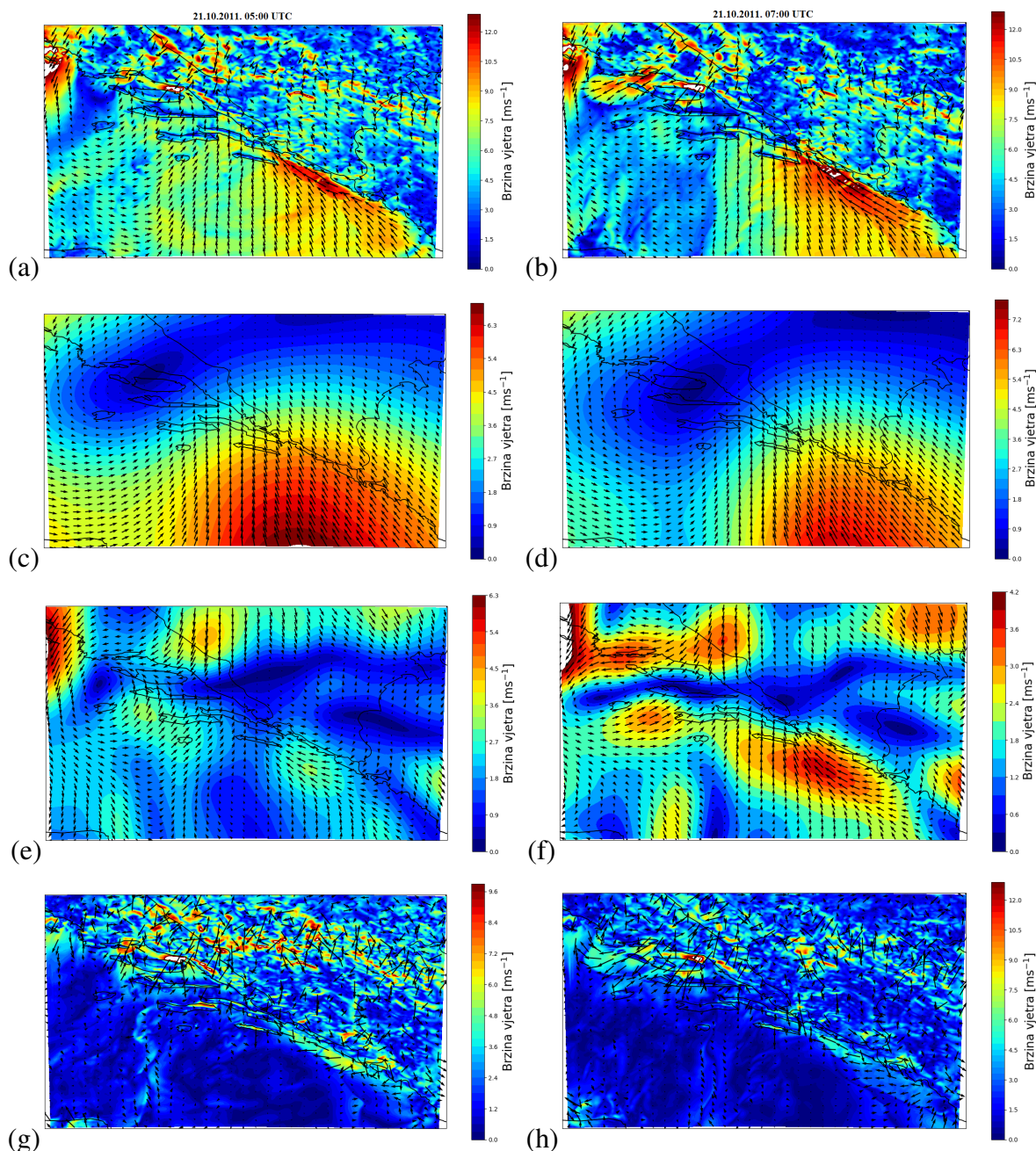
Postaja u Pločama pokazuje, nakon početnog većeg odstupanja između mjerenja i rezultata modela, dobro podudaranje u vrijednostima brzine vjetra. Nakon 06:00 UTC i prolaska zabilježene tuče uočava se vrlo dobro slaganje u svim vrijednostima između 08:00 UTC i 17:00 UTC. Iznimku čini usporedba točke u 12:00 UTC, nakon čega dolazi do veće razlike, a model konzistentno precjenjuje vrijednosti za oko $2,5 \text{ ms}^{-1}$.

Postaja u Splitu pokazuje relativno dobro slaganje mjerenja i modela između 00:00 UTC i 04:00 UTC te 08:00 UTC i 10:00 UTC gdje su razlike u vrijednostima između 1 ms^{-1} i 2 ms^{-1} . Ova su odstupanja u kontekstu usporedbe relativno mala i očekivana kod modeliranja brzine vjetra (npr., Poljak i sur., 2014.). Model pokazuje i skok brzine u 06:00 UTC kao i mjerenja, no precjenjuje ga pa razlika raste na 4 ms^{-1} .

Za postaju u Šibeniku model podcjenjuje sve vrijednosti brzine, posebice između 03:00 UTC i 08:00 UTC te 14:00 UTC i 21:00 UTC gdje je razlika u većini točaka između 3 ms^{-1} i 4 ms^{-1} , no u nekim točkama je i veća, kao u 20:00 UTC gdje raste na 6 ms^{-1} . Unatoč tome, vidimo dobro slaganje između 10:00 UTC i 13:00 UTC gdje je razlika u vrijednostima manja od 2 ms^{-1} .



Slika 3.7. Usporedba izmjerenih (plavo) i modelski (crveno) dobivenih vrijednosti brzine vjetra na 10 m visine za slučaj 21.10.2011.



Slika 3.8. Dekompozicija ukupnog vjetra na 10 m visine (a, b) na makro- (c, d), mezo- (e, f) i mikro- (g, h) skalu za 21.10.2011. u dva termina: 05:00 UTC (lijevi stupac) i 07:00 UTC (desni stupac)

Na kraju, rezultati metode dekompozicije polja vjetra na makro-, mezo- i mikro-skalu prikazani su na slici 3.8. Promatrana su dva vremenska trenutka između kojih se dogodila tuča, lijevi stupac prikazuje trenutak u 05:00 UTC (3.8a, c, e, g), a desni stupac prikazuje trenutak u 07:00 UTC (3.8b, d, f, h).

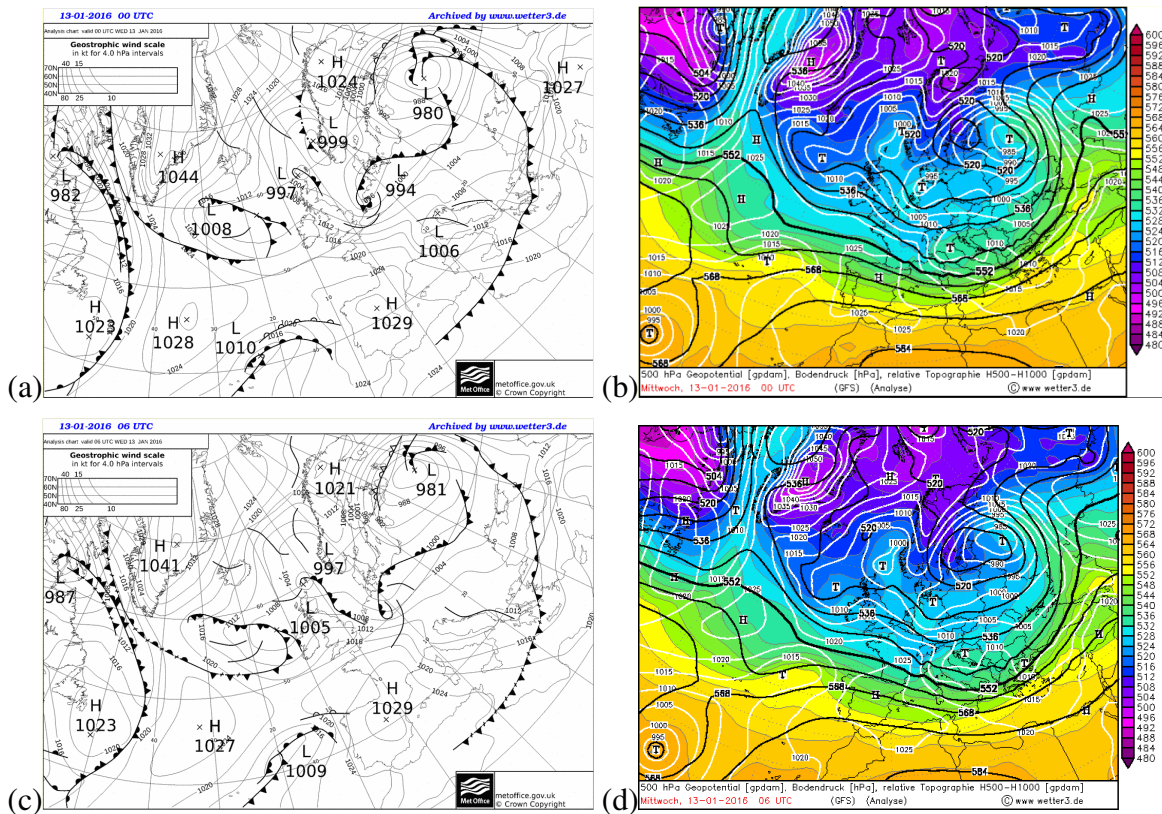
Na slikama 3.8a, b vidimo ukupno polje vjetra koje pokazuje dominantno južno strujanje s mora i jugoistočno strujanje uz obalu Jadrana, od Crne Gore do Pelješca. U promatranom razdoblju do 07:00 UTC to jugoistočno strujanje dalje jača s brzinama većim od 13 ms^{-1} uz obalu Dubrovnika. Slike makro skale, 3.8c, d, potvrđuju jako forsiranje sinoptičke skale, s dominantnim južnim strujanjem na otvorenom moru od oko 6 ms^{-1} koje zakreće na jugo-

tok blizu obali te mu malo pada brzina. Ovo strujanje jača u promatranom razdoblju te čini preko polovice ukupnog strujanja. Na mezoskali u 05:00 UTC, slika 3.8e, brzine vjetra uz obalu ne prelaze 3 ms^{-1} pa nema prevelik utjecaj na ukupno polje vjetra. Daljnjim prolaskom sustava ovaj se utjecaj pojačava, slika 3.8f, i brzina vjetra raste na 4 ms^{-1} što čini oko trećine ukupnog strujanja. Prolaskom fronte preko južnog Jadrana i djelovanjem lokalnih efekata između toplijeg mora i hladnijeg kopna dolazi do superpozicije mezoskalnog i sinoptičkog, dominantno jugoistočnog, strujanja uz obalu jugoistočne Dalmacije, dajući dovoljno jako forsiranje za nastanak konvekcije s tučom. Valja primijetiti da model dobro prognozira i centar niskog tlaka zraka iznad Brača i Hvara (3.1a, c), ovdje vidljivo kao područje u kojemu je brzina vjetra 0 ms^{-1} . Većina strujanja na mikroskali (3.8g, h) je nasumična i pod znatnim utjecajem terena/planina, ali bez većeg utjecaja na generiranje konvekcije. Jedino se uz obalu Dubrovnika uočava jače istočno strujanje od oko 6 ms^{-1} koje se zadržava u promatranom razdoblju i zakreće na jugoistok te tako dodatno pojačava postojeće strujanje na većim skalama. Taj je efekt vidljiv i uz obalu Brača i Splita, pokazujući da je utjecaj mikroskale najveći na mjestima gdje je kompleksnija topografija te ispod postojećeg konvektivnog sustava (zbog nastalih silaznih strujanja i fronti udara vjetra).

3.2. Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja (S2) iz 13.1.2016.

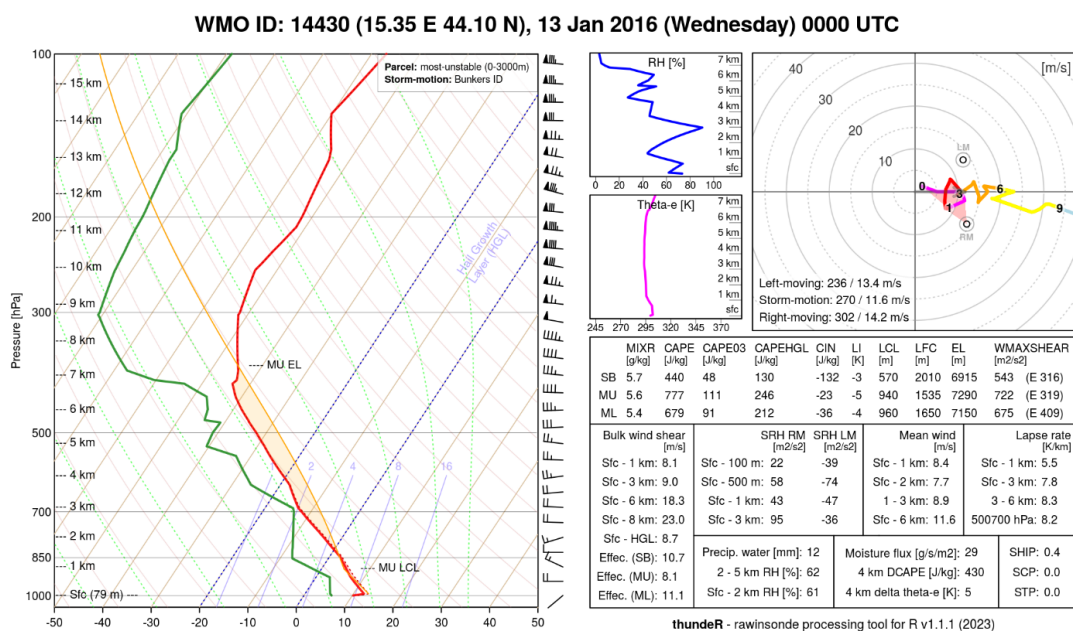
Tijekom drugog odabranog slučaja, S2, iz siječnja 2016., ranojutarnjoj tuči prethodio je prelazak izrazito velike intenzivne ciklone s izraženim frontalnim sustavom preko europskog kontinenta, nakon čega je stanje atmosfere nad Hrvatskom ostalo prilično nestabilno (slika 3.9a, c). Zapadno od Jadrana prolaskom ciklone dolazi do jačanja povišenog tlaka zraka s centrom iznad Španjolske. Zbog toga se odlaskom frontalnog sustava prostorne razlike u polju tlaka, odnosno gradijent tlaka, nad Hrvatskom smanjuju, umanjujući utjecaj sinoptičke skale na obalno područje. Ipak, između 00:00 UTC i 06:00 UTC odbranog dana uočavaju se linije nestabilnosti duž jadranske obale od Zadra preko Splita i Hvara do Crne Gore prema Grčkoj. Izvješća SYNOP za ovaj slučaj daju pad temperatura s $11,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ na $9,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, dok je temperatura rosišta porasla s $5,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ na $6,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Ovakav odnos veličina ukazuje na veliku količinu vlage u prizemnom sloju i pogodne uvjete za stvaranje oblaka. U navedenim uvjetima te premještanjem linije nestabilnosti prema obalnom pojasu dolazi do sudaranja suhog zraka s kopna i vlažnog zraka s mora te izraženijeg vertikalnog dizanja zraka tijekom grmljavinskog nevremena. Nastali konvektivni sustav sporo se premještao južnije što je uobičajeno za liniju nestabilnosti i što također potvrđuju podaci brzine vjetra iz SYNOP izvješća. Između 00:00 UTC i 13:00 UTC zabilježene su brzine horizontalnog vjetra od 2 ms^{-1} ili manje, uz iznimku dva termina na Hvaru od 3 ms^{-1} . Zabilježena je tuča u Splitu u 03:30 UTC i na Hvaru u 05:40 UTC, ali se grmljavinsko nevrijeme zadržalo sve do 13:00 UTC na cijelom istraživanom području.

Gledajući situaciju na 500-hPa izobarnoj plohi (slika 3.9b, d), Hrvatska se nalazi u osi duboke visinske doline koja se proteže preko cijele Europe i premješta na istok. Ovakav položaj osi doline potiče zapadno visinsko strujanje i razvoj nestabilnosti, pridonoseći advekciji vlažnog zraka prema jugoistočnoj obali Jadrana.



Slika 3.9. Sinoptička situacija na dan 13.1.2016. (a) prizemna karta u 00:00 UTC i (c) prizemna karta u 06:00 UTC (izvor: https://www.wetter3.de/Archiv/archiv_ukmet.html) te geopotencijalna visina izobarne plohe 500 hPa (gpdm, crne linije), relativna topografija RT 500/1000 (gpdm, boje) te prizemno polje tlaka (hPa, bijele linije) u (b) 00:00 UTC i (d) 06:00 UTC (izvor: https://www.wetter3.de/archiv_gfs_dt.html)

Vertikalni profil atmosfere na postaji Zadar - Zemunik u 00:00 UTC prikazan je na slici 3.10. Za razliku od prvog promatranog slučaja, parametar MU - CAPE znatno je veći i iznosi 777 Jkg^{-1} , dok MU - CIN iznosi -23 Jkg^{-1} , ukazujući na nestabilnu atmosferu i veoma pogodne uvjete za nastanak slobodne konvekcije. Valja naglasiti da je skoro polovica raspoloživog MU - CAPE-a u području između izoterma 0°C i 20°C te veliku relativnu vlažnost zraka (što znači mali deficit rosišta), najveću na 3 km visine. Za CAPE od 777 Jkg^{-1} teorijski procijenjena vertikalna brzina iznosi 39 ms^{-1} , što je dovoljno za nastanak tuče promjera oko 6 cm. U ovom je slučaju vertikalni profil također nestabilan u dubljem sloju troposfere, do 7 km visine, za razliku od prethodnog, do 5 km. Smicanje vjetra između tla i 6 km visine iznosi $18,3 \text{ ms}^{-1}$, što dodatno pojačava nastanak organizirane i duboke konvekcije te njezino dugotrajno zadržavanje na promatranom području. Kao i u SYNOP izvješću, vidimo da je prizemni vjetar skoro 0 ms^{-1} , što je uobičajeno za pojavu linije nestabilnosti i pojavu konvergencije u prizemnom polju strujanja.

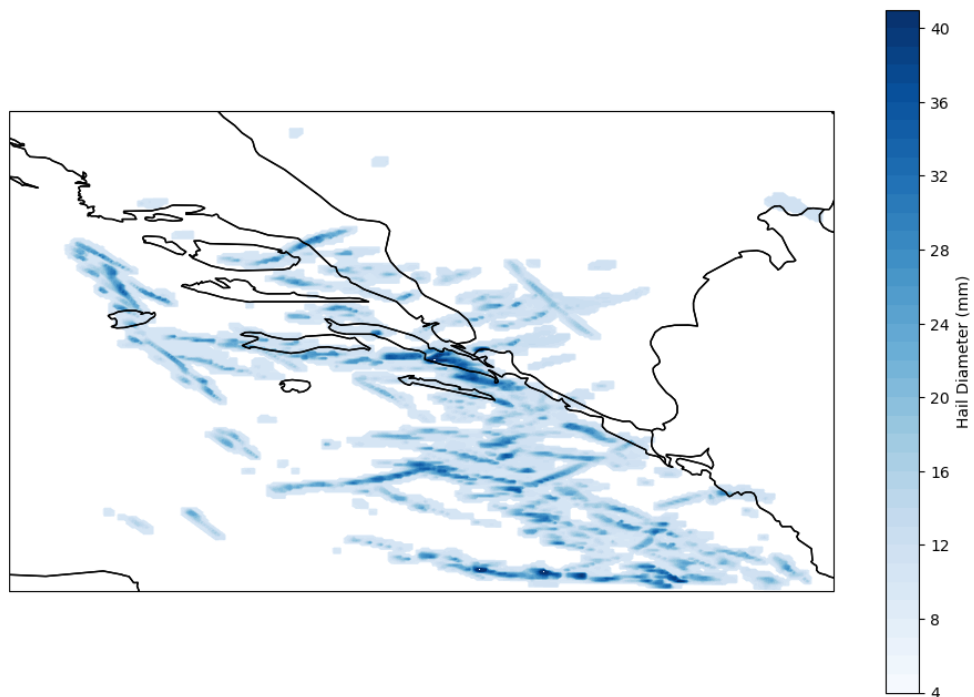


Slika 3.10. Vertikalni profil atmosfere na postaji Zadar - Zemunik 13.1.2016. u 00:00 UTC

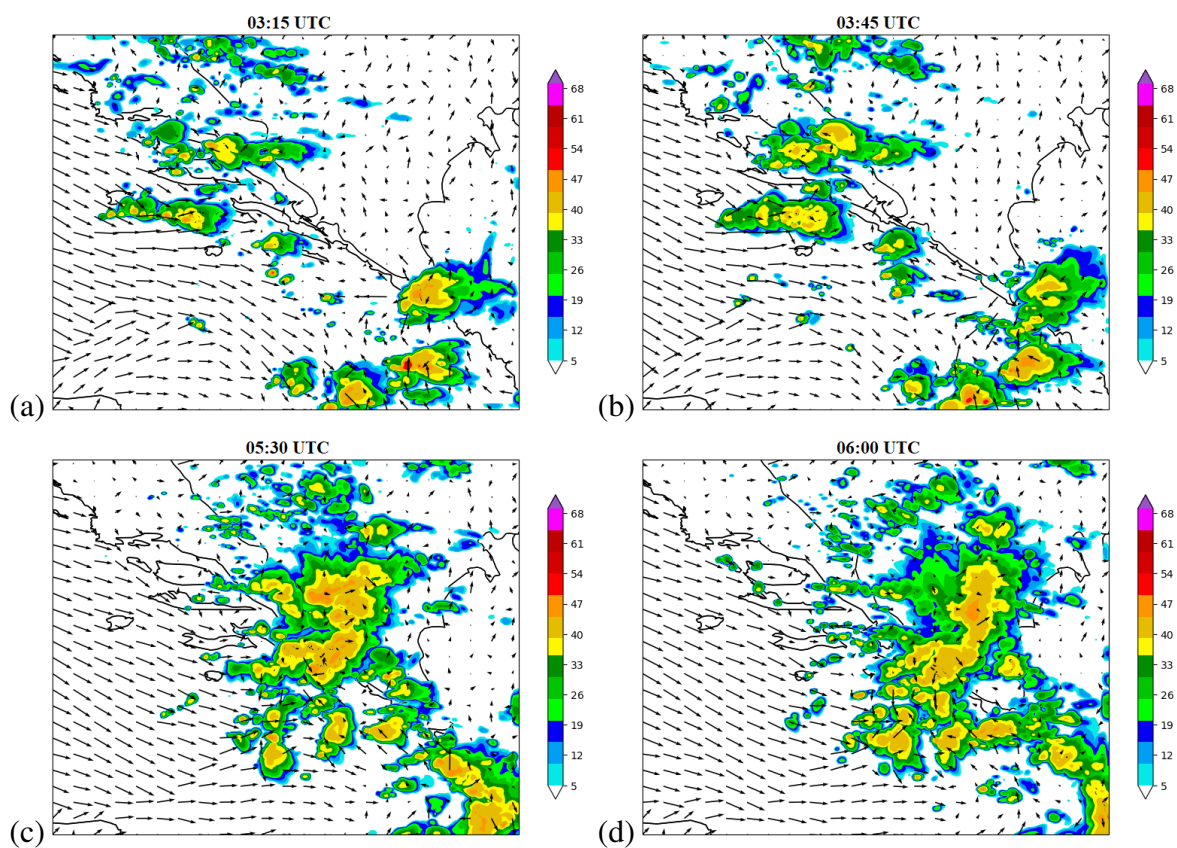
Kao i u slučaju S1, napravljena je usporedba mjerenja i modela nekoliko meteoroloških parametara.

Simulirani dnevni maksimalni promjer tuče (slika 3.11.) i simulirani radarski odraz (slika 3.12.) pokazuju veliku prostornu pokrivenost južnog Jadrana, nad područjem Neuma, Pelejšca, Korčule, ali i Lastova i Mljeta. S druge strane, za Hvar nije prognozirana tuča u cijelome danu, iako je opažena u 05:40 UTC. Za područje Splita prognoza ukazuje na tuču promjera 2 cm samo iznad Trogira. Vremenski gledano, tuča nad Trogirom je prognozirana između 03:30 UTC i 04:00 UTC, a u to je vrijeme potvrđena na postaji Split-Marjan, dok je u Trogiru tuča zabilježena u 06:00 UTC, što model nije prognozirao. Do sada se uglavnom promatrao kumulativni efekt u 24 h koji je ukazivao na dobro slaganje mjerenja i modela. Kašnjenje ili prethođenje u smislu nastanka i/ili odumiranja konvekcije u modelu nije do sada značajno penalizirano jer se takvi događaji još uvijek teško prognoziraju (Malečić i sur., 2023.). Model je, kao i u slučaju S1, precijenio količinu tuče, ali je bolje reproducirao vremensku raspodjelu.

Gledajući simulirani radarski odraz, vidimo da model prostorno podcjenjuje razvoj oblačnog sustava, ali ga vremenski prognozira prilično dobro. Radarski odraz je slab iznad Splita, odnosno lokalizirana je točka u 03:45 UTC s odrazom od 35 dBz, što je uglavnom nedovoljno za razvoj tuče. Nad Hvarom je razvoj konvektivnih oblaka s radarskim odrazom značajan, ukazujući na pojavu jake kiše, no to nije zabilježeno na mjernoj postaji u Hvaru. Zaključno, ova simulacija radarskog odraza je podcijenila intenzitet te time i pojavu tuče, ali je dobro sugerirala razvoj oblačnog sustava na slikama 3.12c i 3.12d koji se kreće na jugoistok. Isti je sustav zabilježen na mjernoj postaji Dubrovnik s kontinuiranom kišom u promatranom razdoblju.



Slika 3.11. Simulirani dnevni maksimalni dijаметar tuče za 13.1.2016.

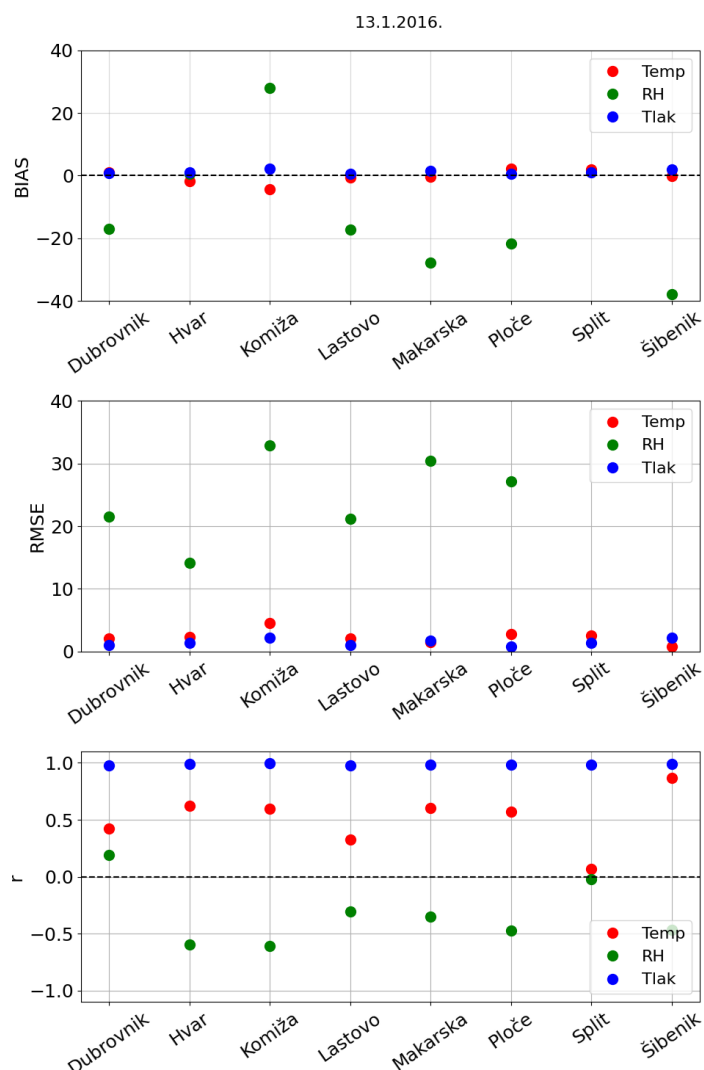


Slika 3.12. Simulirani radarski odraz slučaja 13.1.2016. u; (a) 03:15 UTC, (b) 03:45 UTC, (c) 05:30 UTC, (d) 06:00 UTC

I za ovaj slučaj je obavljena evaluacija meteoroloških parametara na postajama (slika 3.13.).

Model je opet dobro prognozirao temperaturu na svim postajama. Najveća pristranost je na postaji Komiža s 3 °C, na svim ostalima je oko 0 °C. Mala pristranost je povezana i s iznosima parametra RMSE koji se kreće u rasponu od 1 °C do 2 °C. Korelacija je na većini postaja je između 0,4 i 0,6, u Splitu je oko 0, a jedino je za Šibenik viša od 0,9.

Tlak ponovno pokazuje malu pristranost na svim promatranim postajama vrijednostima manjima od 1 hPa. RMSE pokazuje skoro identičnu sliku kao i pristranost (BIAS), Komiža i Šibenik odudaraju s pogreškom od oko 3 hPa, dok na ostalim postajama imamo manju pogrešku. Sve postaje pokazuju odličnu koreliranost mjerenja i modela, s koeficijentom korelacije većim od 0,95.



Slika 3.13. Izračunate statističke veličine za temperaturu (°C, crveno), tlak (hPa, plavo) i relativnu vlažnost (% , zeleno) za slučaj 13.1.2016. za odabrane postaje

Najveća odstupanja su prilikom evaluacije relativne vlažnosti te ona prelaze i 20 % na posti Split i 40 % na postaji Šibenik. U ovom slučaju, iznimka je postaja Hvar gdje je pristranost bliska 0 %. RMSE je slično raspršen na svim postajama, s vrijednostima većima od 20 % na svim postajama osim one na Hvaru, dok Split i Šibenik ponovno imaju vrijednosti

veće od 40 %. Korelacija je na svim postajama slaba, na postajama u Dubrovniku i Splitu je bliska 0, dok su na ostalim postajama vrijednost između -0,4 i -0,6.

Na slici 3.14. vidljiva je usporedba dnevnih hodova izmjerenih i modelski dobivenih vrijednosti brzine vjetra na visini od 10 m na svim postajama osim Splita gdje mjerenja brzine vjetra nisu dostupna za ovaj slučaj.

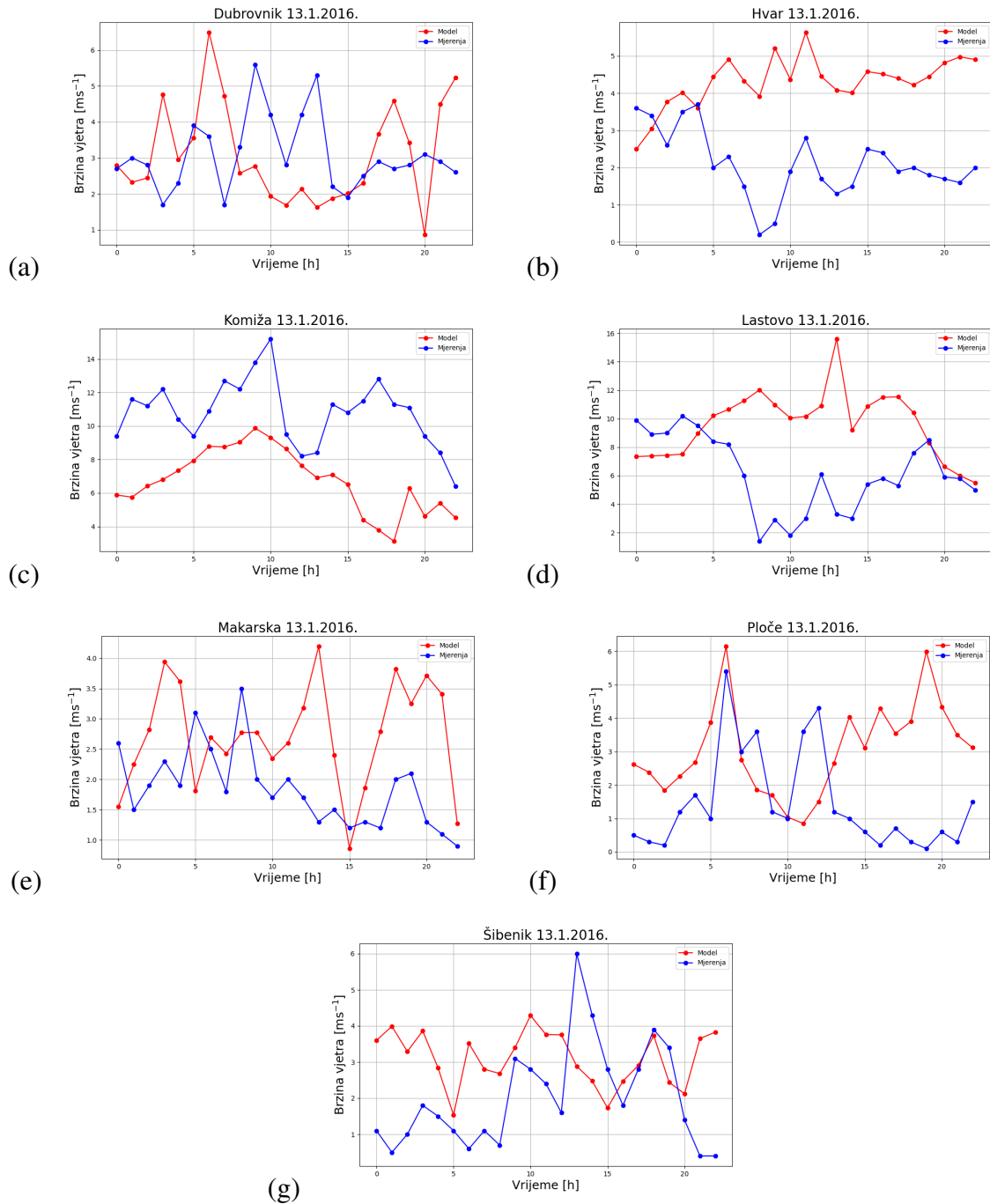
Brzine vjetra su lošije reproducirane od prethodnog slučaja. Ipak treba naglasiti da su brzine vjetra uz obalu male, vrlo često manje od 5 ms^{-1} . Modelski rezultati su očekivano tada lošiji jer model zbog svojih ograničenja ima veće pogreške u simuliranju malih brzina vjetra (npr., Poljak i sur. 2014.).

Postaja u Dubrovniku ne daje dobro slaganje podataka osim u nekoliko točaka između 00:00 UTC i 03:00 UTC te između 14:00 UTC i 16:00 UTC.

Postaje na udaljenijim otocima, kao što su Lastovo i Komiža, mogu biti mjera otvorenog mora te bilježe znatno veće brzine. Ipak, zbog manje točnosti u prikazu topografije u modelu i odnosa kopna i mora također ukazuju na nemogućnost modela da točno simulira polje strujanja u odabranim točkama mreže. U Komiži model podcjenjuje vrijednosti brzine u cijelom razdoblju, a na postaji Lastovo dominira precjenjivanje brzine vjetra u modelu WRF od oko $2,5 \text{ ms}^{-1}$.

Na drugim postajama, modelski dobivene brzine vjetra kreću se oko srednjaka izmjerenih brzina, s razlikama između vrijednostima od 3 ms^{-1} ili manje, kao što je Makarska, ali u nekim točkama te razlike rastu i do 6 ms^{-1} , kao što je postaja u Pločama.

Važno je napomenuti da je tijekom padanja tuče na postajama Split (nakon 04:30 UTC) i Hvar (oko 06:40 UTC), na većini postaja prihvatljivo slaganje u podacima s odstupanjima manjim od 2 ms^{-1} u većini točaka.

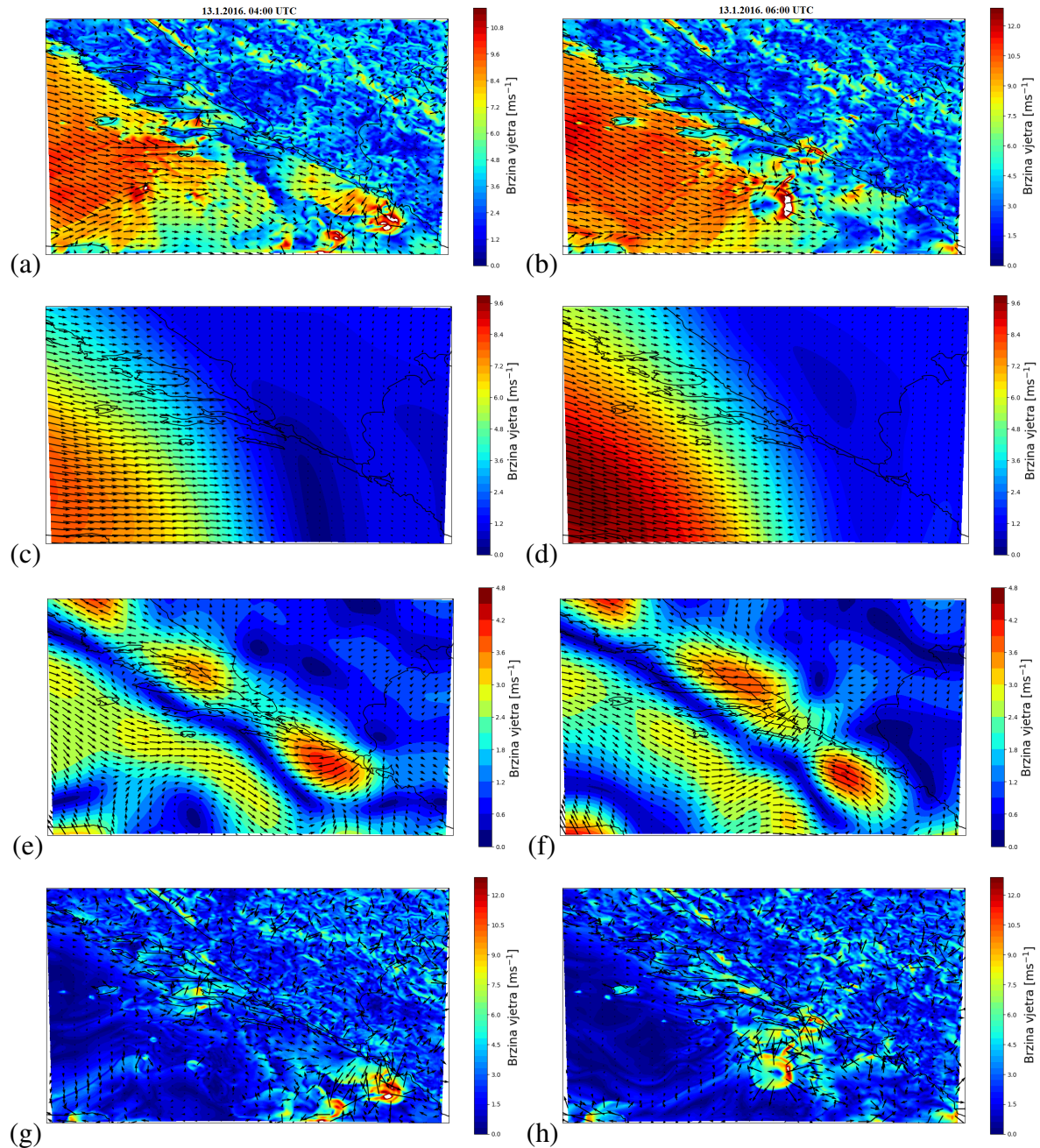


Slika 3.14. Usporedba izmjenjenih (plavo) i modelski (crveno) dobivenih vrijednosti brzine vjetra na 10 m visine na svim mjernim postajama osim Splita za slučaj 13.1.2016.

Metoda dekompozicije polja vjetra na makro-, mezo- i mikro-skalu (slika 3.8.) pokazuje dva odabrana trenutka oko nastupa tuče; 04:00 UTC (na slikama 3.8a, c, e, g) te 06:00 UTC (3.8b, d, f, h).

Mezoskalni doprinos (slike 3.18e,f) značajno upućuje na modifikaciju glavnog sinoptičkog zapadnog forsiranja te pokazuje poziciju linije konvergencije u prizemnom polju strujanja. Linije se protežu sa sjeverozapada na jugoistok, krećući se u istome smjeru u promatranom razdoblju, te pokazuju međudjelovanje sinoptičkog zapadnog strujanja s mora i sjeveroistočnog strujanja s kopna brzine od oko 5 ms^{-1} . Ove se linije konvergencije poklapaju i s

linijama nestabilnosti naznačenima na sinoptičkim kartama (slike 3.9a, c) što pokazuje da su predstavljale jedan od glavnih pokretačkih uzroka nastanka konvekcije uz obalu. Mikroskala pokazuje pojavu udara vjetra (engl. *Gust Front*) koja (vrlo) lokalno stvara bazene hladnog zraka te može uzrokovati novo dizanje vlažnog zraka i nastanak novih Cb-jeva. Često su povezane s oborinom kao što je i bilo uočeno u mjerenjima.

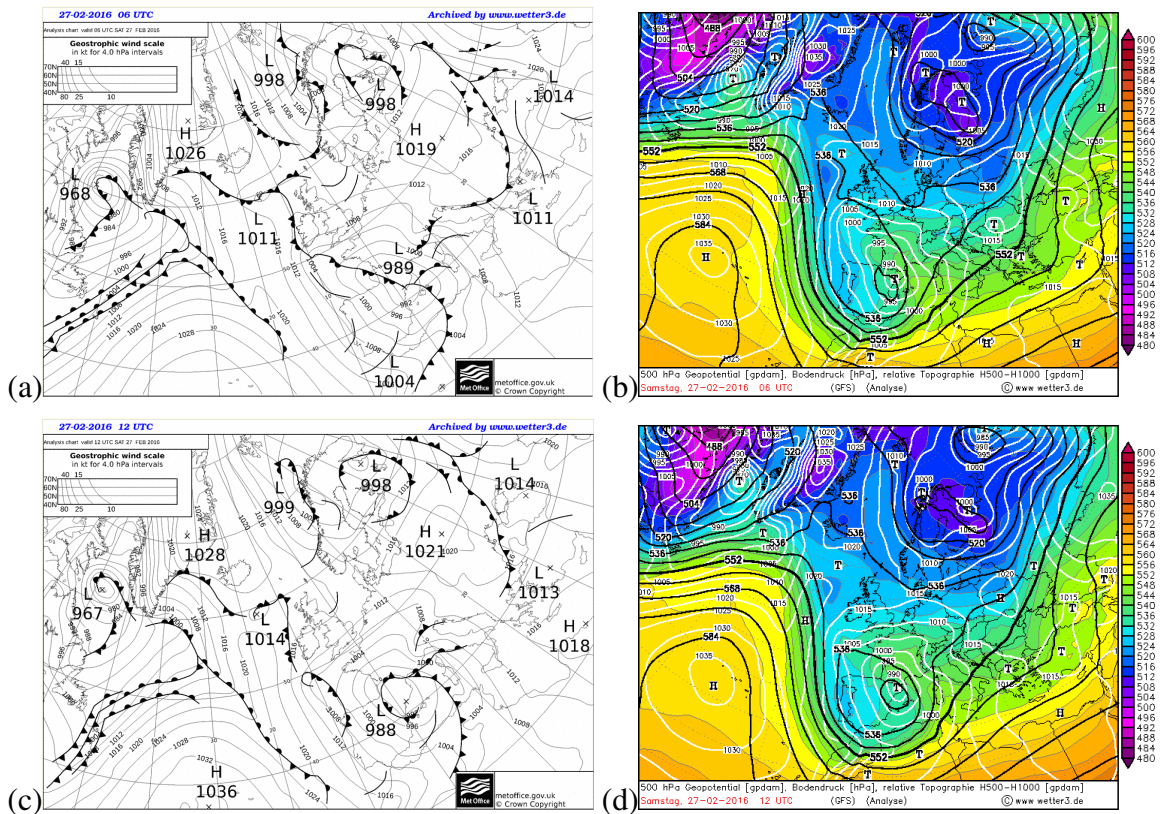


Slika 3.15. Dekompozicija ukupnog vjetra na 10 m visine (a, b) na makro- (c, d), mezo- (e, f) i mikro- (g, h) skalu za 13.1.2016. u dva termina: 04:00 UTC (lijevi stupac) i 06:00 UTC (desni stupac)

3.3. Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja (S3) iz 27.2.2016.

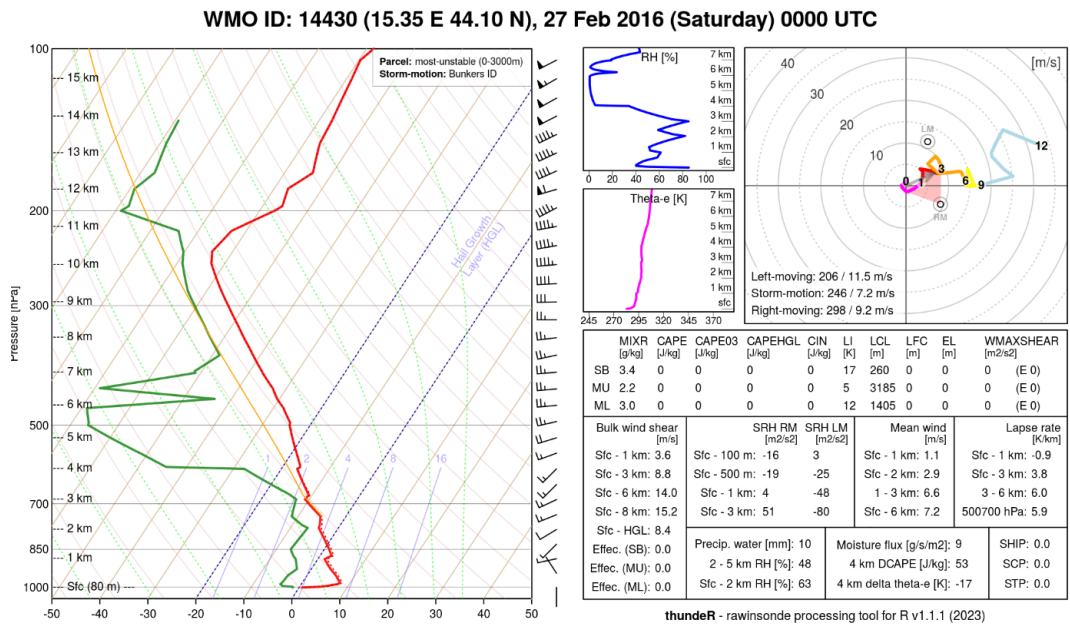
Prizemna sinoptička situacija pokazuje da se u danu prije grmljavinskog nevremena u Dalmaciji razvija izraženo polje niskog tlaka zraka s centrom iznad zapadnog Sredozemlja u neposrednoj blizini Španjolske (slike 3.6a, c). Iznad Grčke se uočava plitka ciklona, dok je iznad Panonske nizine vidljivo područje povišenog tlaka. Između ove dvije baričke strukture nad Balkanskim poluotokom formira se slabiji frontalni sustav. Ciklona u blizini Španjolske koja je u svojoj zreloj fazi se sporo pomiče na istok. Topli sektor ciklone nalazi se iznad Apeninskog poluotoka što je omogućilo stvaranje linije nestabilnosti nad Jadranom te potom premještanja tople fronte preko južnog Jadrana u smjeru sjevera. Topla fronta naznačila je advekciju toplog i vlažnog zraka nad hrvatsku obalu Jadrana. SYNOP izvješća pokazuju visoku relativnu vlažnost zraka, preko 85 % na Lastovu, 77 % na Hvaru te 93 % u Dubrovniku, ali i slab vjetar u promatranom razdoblju bez signifikantnih promjena vremenskih uvjeta. Unatoč tome, zbog premještanja tople fronte preko juga Dalmacije došlo je do povoljnih uvjeta za nastanak konvekcije i grmljavinskog nevremena s tučom koja je zabilježena na meteorološkoj postaji Goveđari na Mljetu u 07:30 UTC.

Prostrano ciklonalno polje sa zapadnog Sredozemlja nad velikim dijelom Europe produčilo se i po visini. Na prikazu apsolutne topografije 500 hPa izobarne plohe u 24 h prije promatranog slučaja uočava se premještanje visinske doline prema istoku. Njezina prednja strana u vrijeme zabilježene tuče nalazila se iznad Hrvatske (slike 3.6b, d), stvarajući povoljne uvjete za jugozapadno strujanje zraka koje dodatno pojačava prizemno strujanje i podizanje vlažnog zraka.

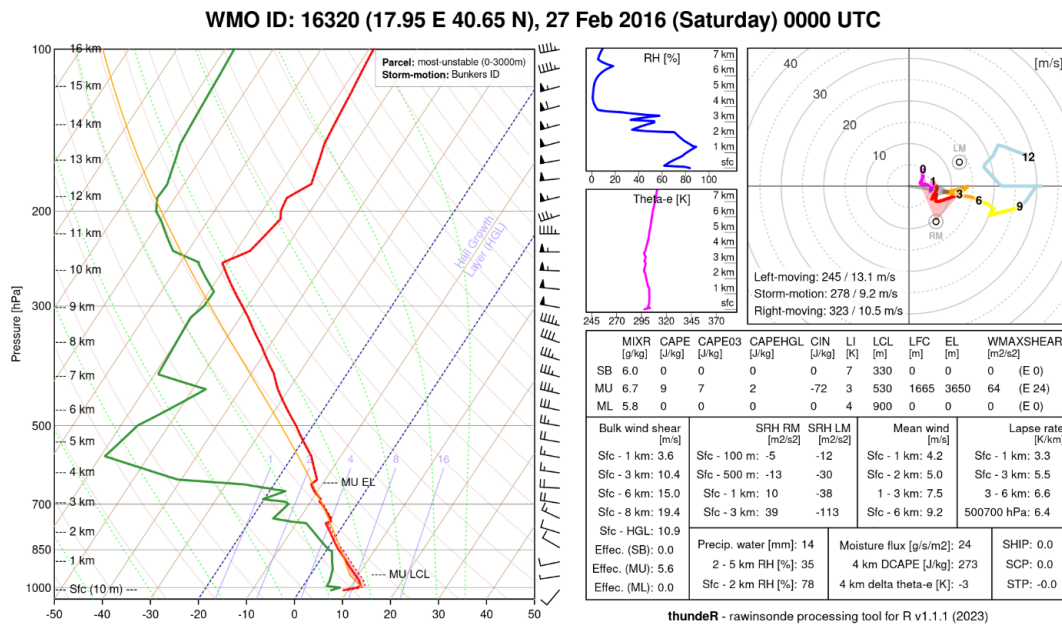


Slika 3.16. Sinoptička situacija na dan 27.2.2016. (a) prizemna karta u 06:00 UTC i (c) prizemna karta u 12:00 UTC (izvor: https://www.wetter3.de/Archiv/archiv_ukmet.html) te geopotencijalna visina izobarne plohe 500 hPa (gpdm, crne linije), relativna topografija RT 500/1000 (gpdm, boje) te prizemno polje tlaka (hPa, bijele linije) u (b) 00:00 UTC i (d) 06:00 UTC (izvor: https://www.wetter3.de/archiv_gfs_dt.html)

Vertikalni profil atmosfere na postaji Zadar-Zemunik u 00:00 UTC, slika 3.17, pokazuje stabilniju atmosferu nego u prijašnjim slučajevima. Parametri MU-CAPE i MU-CIN iznose 0 Jkg^{-1} , a pogledamo li vertikalni profil atmosfere na jugu Italije, na postaji Brindisi u 00:00 UTC, slika 3.17c, d, vidimo da je MU-CAPE 9 Jkg^{-1} , a MU-CIN -72 Jkg^{-1} . Vrijednosti smicanja vjetra između tla i 6 km visine su 14 ms^{-1} za Zadar-Zemunik te 15 ms^{-1} za Brindisi. Dovoljno su značajne da se omogući razvoj konvektivnog sustava s tučom. Iz profila se uočava i velika količina vlage između tla i 3 km visine. Unatoč maloj vrijednosti MU-CAPE-a i velikoj vrijednosti MU-CIN- a, što ukazuje na stabilnu atmosferu, ovakvo smicanje vjetra uz premještanje tople fronte i jugozapadno visinsko strujanje stvorilo je dovoljno jako forsiranje za stvaranje konvekcije s tučom u ranim jutarnjim satima.



(a)



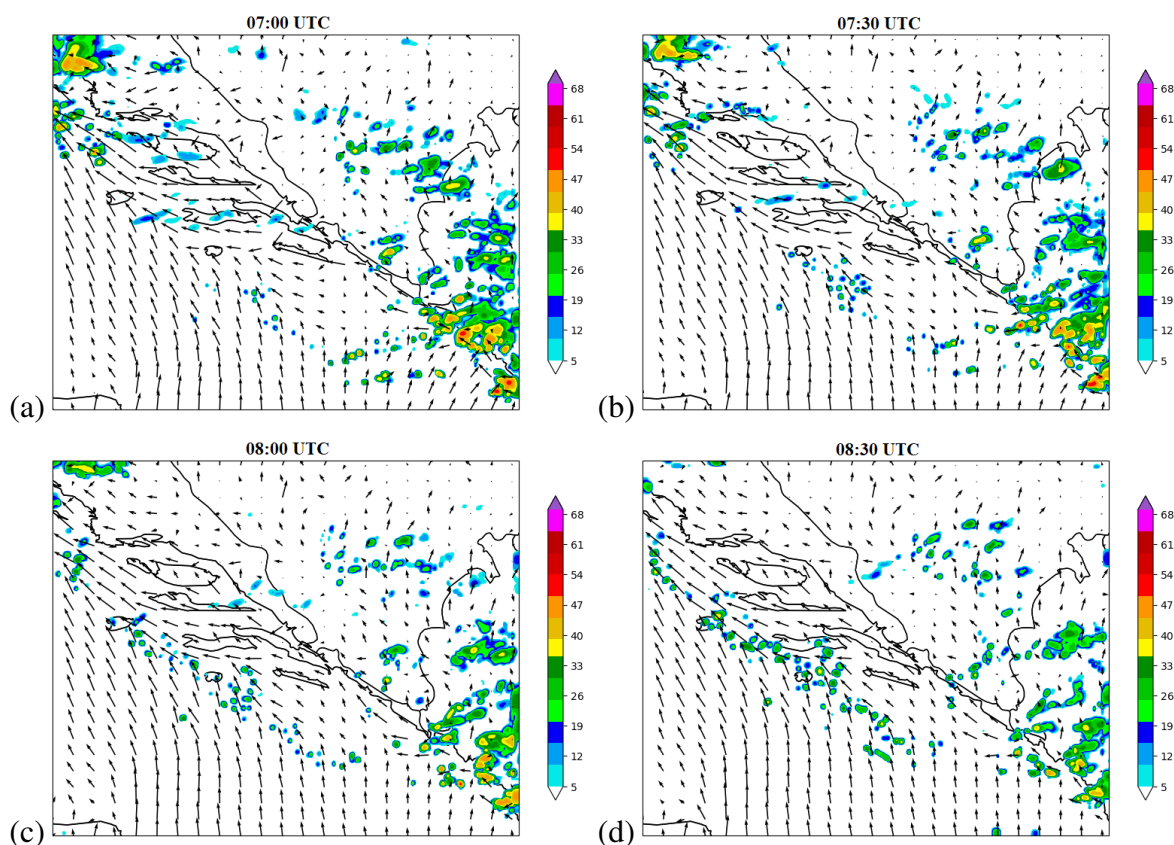
(b)

Slika 3.17. Vertikalni profil atmosfere na postaji (a) Zadar - Zemunik i (b) Brindisi za slučaj 27.2.2016. u 00:00 UTC

Tuča je zabilježena na Mljetu na meteorološkoj postaji Goveđari u 07:30 UTC, a grmljavinsko je nevrijeme zabilježeno i na okolnim postajama. Ipak, simulacija HAILCAST-om nije reproducirala pojavu tuče u spomenutoj lokaciji (a ni šire nije prikazano).

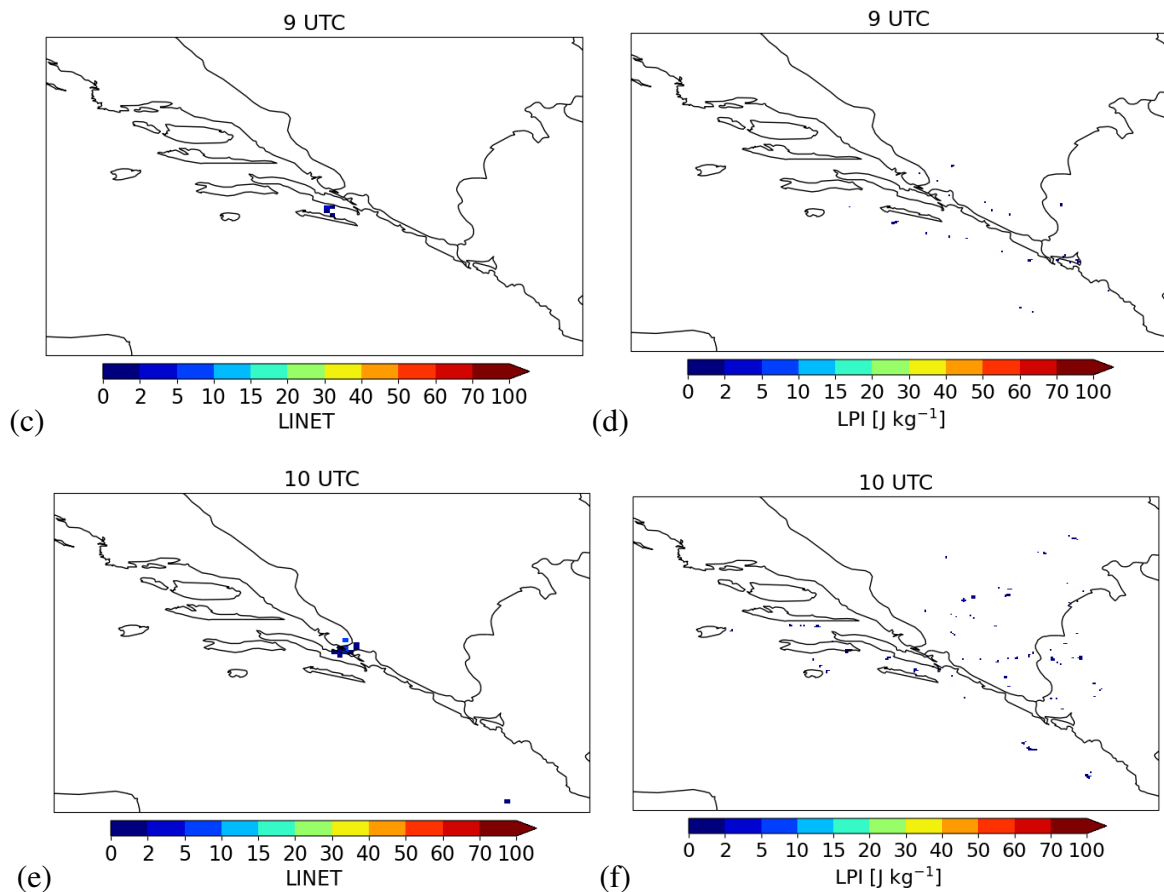
Simulirani radarski odraz (slika 3.18.) pokazuje da model ne ukazuje na značajan razvoj konvektivnih oblaka (osim iznad crnogorske obale) što je u skladu sa simuliranim, ali i zabilježenim produktima konvekcije. Također nema razvoja naoblake iznad Mljeta u modelu, gdje je zabilježena tuča. Konvektivni oblaci koji se javljaju paralelno s obalom nad morem posljedica su konvergencije u prizemnom polju strujanja koja omogućava lakše dizanje vlažnog zraka. Manje lokalizirane oblačne tvorbe pomiču se sporo s juga na sjever prateći

gibanje tople fronte.



Slika 3.18. Simulirani radarski odraz slučaja 27.2.2016. u; (a) 07:00 UTC, (b) 07:30 UTC, (c) 08:00 UTC, (d) 08:30 UTC

Iako model nije zabilježio mljetski slučaj tuče, munje pokazuju da se radi o jednom izoliranom konvektivnom slučaju malih dimenzija. Slika 3.19. prikazuje usporedbu modelski dobivenih rezultata o munjama na temelju LPI-a i izmjerenih podataka iz mreže LINET. Munje su mjerene samo iznad područja između jugoistoka Pelješca i Mljeta u 09:00 UTC iako je tuča zabilježena već u 07:30 UTC. Podaci daju samo još jedan sličan signal u 10:00 UTC od cijelog dana. Unatoč tome, vidimo da model dobro reproducira zahvaćeno područje na kojem su zabilježeni udari, nekoliko signala iznad jugoistoka Pelješca te nekoliko signala malo južno od Mljeta. Međutim, vidimo i nekoliko raspršenih signala iznad Dubrovnika i na moru južno od granice s Crnom Gorom gdje nema izmjerenih udara munja. Iako je model najvjerojatnije podcijenio pojavu konvekcije te prikazao s kasnijim nastupom, slaba prostorna pokrivenost s raznim aspektima konvektivne aktivnosti dosta dobro su prikazani u simulaciji.

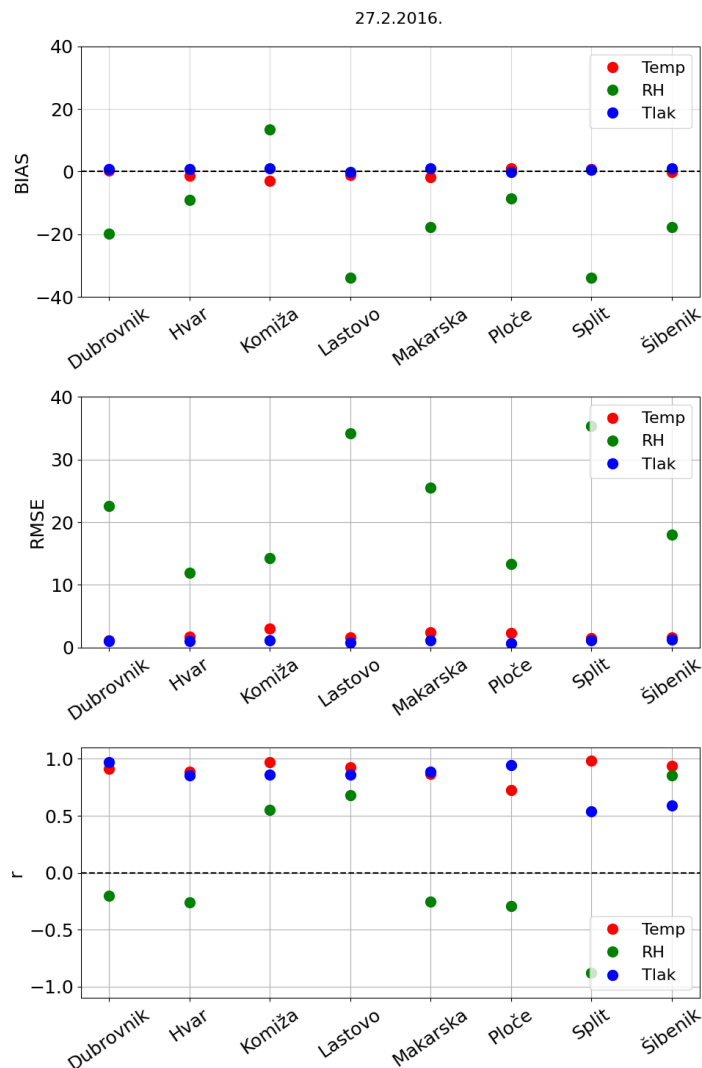


Slika 3.19. Podaci o pojavama munja iz LINET mreže (a, c, e) te modelski dobiven LPI pomoću jednadžbe 2.1. (b, d, f) za slučaj 27.2.2016.

Statistička evaluacija modela (slika 3.20.) slična je prethodnim slučajevima s malom pristranošću u izračunu temperature, uz najveće odstupanje od $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Isto potvrđuju i vrijednosti RMSE na svim postajama, ni na jednoj ne prelazi vrijednost od $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Korelacija između podataka je također jako dobra, koeficijent je na većini postaja preko 0,9, uz iznimku postaje u Pločama gdje je oko 0,7.

Tlak je ponovno dobro prognoziran uz mala odstupanja na svim promatranim postajama s maksimalnim odstupanjem od 1 hPa. Vrijednosti RMSE pokazuju jako slične vrijednosti na svim postajama, nijedna vrijednost ne prelazi 2 hPa. Koeficijent korelacije nije toliko dobar kao u slučaju S2, no na većini postaja je on veći od 0,8, osim Splita i Šibenika gdje je oko 0,55.

Model i u ovom slučaju najslabije prognozira relativnu vlažnost. Na svakoj postaji vidimo odstupanje, većinom od $\pm 20\%$, no ta je vrijednost oko 35 % na postajama Lastovo i Split. Parametar RMSE pokazuje da se pogreške kreću na većini postaja između vrijednosti od 15 % i 25 %, što je tipičan raspon za točnost relativne vlažnosti u numeričkim modelima (npr., Poljak i sur., 2014). Ponovno su iznimke postaje Lastovo i Split, gdje je ta vrijednost oko 35 %. Koeficijent korelacije u ovome slučaju je malo raspršen, vidimo vrijednosti između 0,5 i 0,6 na Komiži i Lastovu te veću vrijednost od 0,9 u Šibeniku, ali i negativne koeficijente na ostalim postajama. U Splitu on prelazi -0,9, a na ostalim postajama se kreće između -0,2 i -0,4.



Slika 3.20. Izračunate statističke veličine za temperaturu ($^{\circ}\text{C}$, crveno), tlak (hPa, plavo) i relativnu vlažnost (% , zeleno) za 13.1.2016. za odabrane postaje

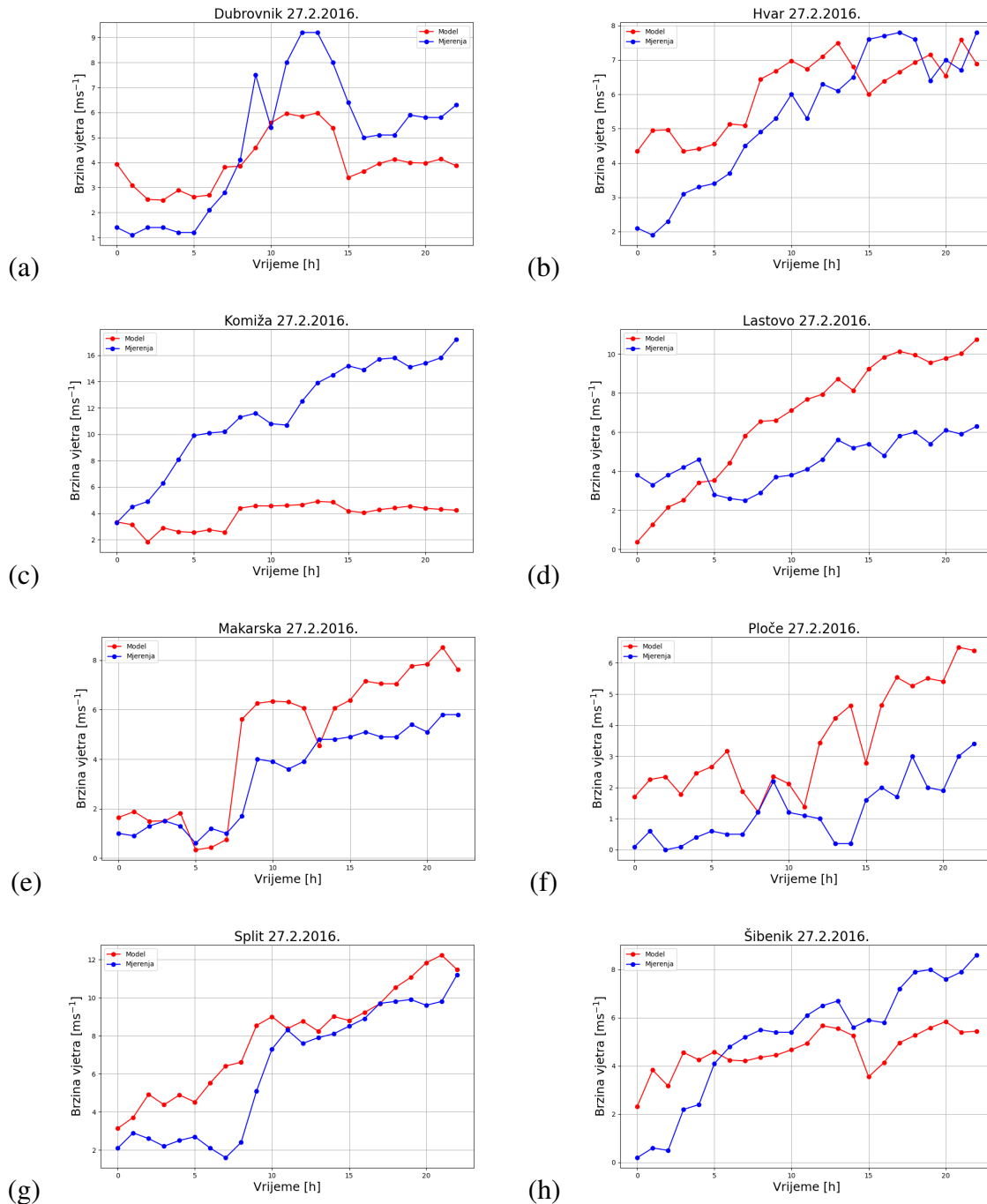
Dnevni hodovi izmjerenih i modelski dobivenih vrijednosti brzine vjetra na visini od 10 m na svim postajama prikazani su na slici 3.21.

Na postaji Dubrovnik vidimo slične trendove do 10:00 UTC, no model precjenjuje vrijednosti prije 08:00 UTC. Nakon toga je blizak mjerenjima, no počinje podcjenjivati vrijednosti poslije 10:00 UTC te konzistentno prati trend promjene s razlikom vrijednosti između 1 ms^{-1} i 3 ms^{-1} .

Postaja Hvar pokazuje puno bolje slaganje modela i mjerenja, model u početku precjenjuje brzinu vjetra, no nakon 03:00 UTC model jako dobro prati trend promjene brzine vjetra te je razlika u vrijednostima oko 1 ms^{-1} osim u 15:00 UTC gdje je nešto veća.

Na postaji u Komiži ne vidimo podudaranje mjerenja i modela nakon prve dvije točke u 00:00 UTC i 01:00 UTC. Mjerenja pokazuju konzistentni rast u brzini vjetra, dok model daje blagi rast između 07:00 UTC i 08:00 UTC te nakon toga gotovo konstantnu brzinu vjetra.

Za postaju na Lastovu model prognozira konzistentan, skoro linearan rast brzine vjetra između 00:00 UTC i 17:00 UTC, na početku podcjenjuje vrijednosti između 4 ms^{-1} i 1 ms^{-1} , no između 05:00 UTC i 23:00 UTC precjenjuje sve vrijednosti s razlikom od 2 ms^{-1} do 5 ms^{-1} .



Slika 3.21. Usporedba izmjenjenih (plavo) i modelski (crveno) dobivenih vrijednosti brzine vjetra na 10 m visine na svim mjernim postajama osim Splita za slučaj 27.2.2016.

Postaja u Makarskoj pokazuje jako dobro slaganje modela i mjerenja između 00:00 UTC i 07:00 UTC s razlikama u brzinama manjima od 1 ms^{-1} , no nakon 07:00 UTC model precjenjuje sve vrijednosti brzine uz iznimku one u 13:00 UTC kada daje gotovo točnu vrijednost. Ta se razlika kreće između 1 ms^{-1} i 2 ms^{-1} .

Na postaji Ploče model pokazuje sličan trend rasta vrijednosti brzine kao i izmjerene, no precjenjuje ih. Između 00:00 UTC i 06:00 UTC od $1,5 \text{ ms}^{-1}$ do $2,5 \text{ ms}^{-1}$, dok između 12:00 UTC i 23:00 UTC od 2 ms^{-1} do 4 ms^{-1} uz iznimku u 15:00 UTC gdje je ta razlika 1 ms^{-1} . Razdoblje između 08:00 UTC i 11:00 UTC pokazuje odlično slaganje vrijednosti.

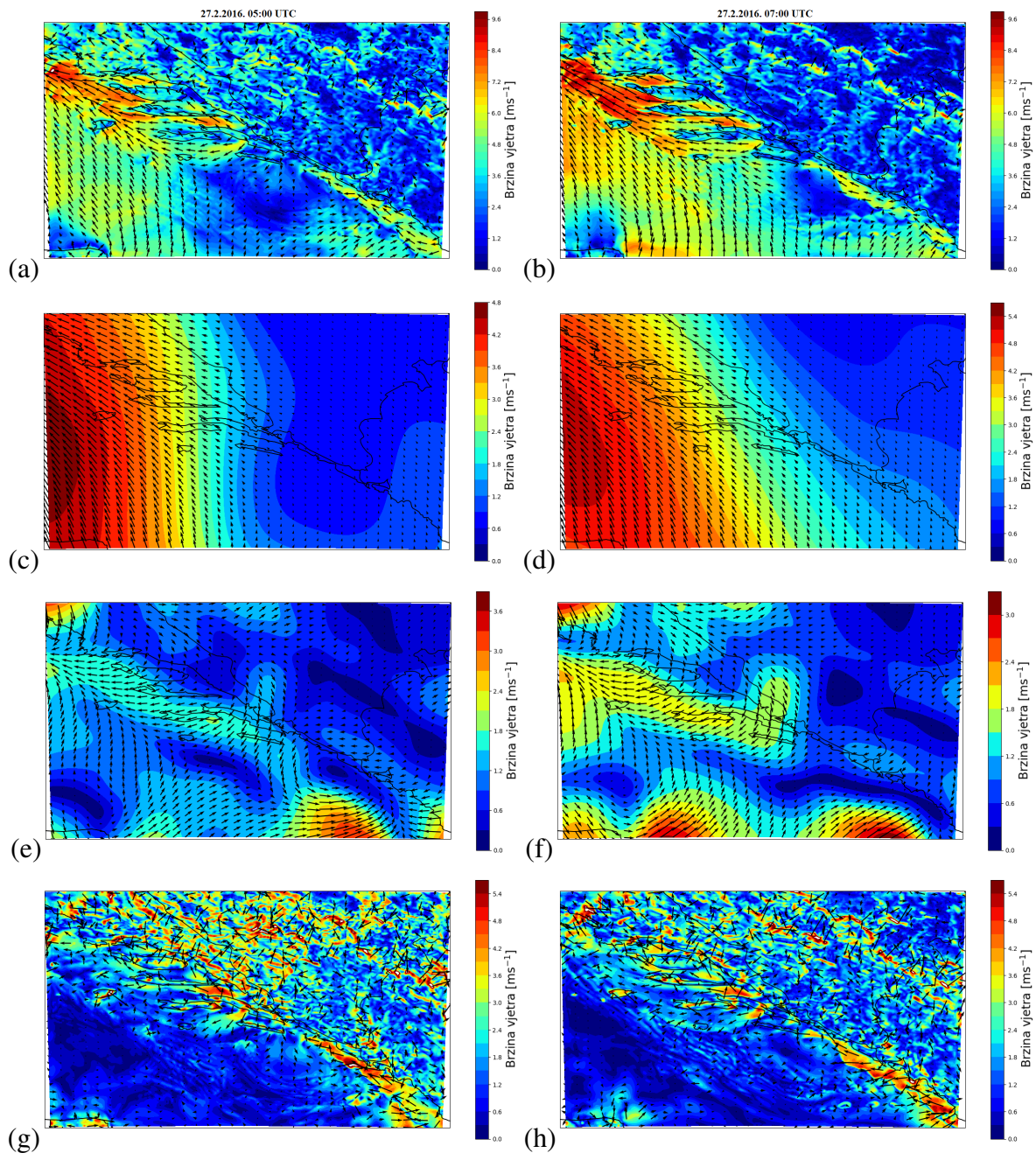
Za postaju u Splitu model dobro vidi izmjereni rast brzine vjetra u cijelome danu, no precjenjuje ga i ne vidi stagniranje brzine u razdoblju između 05:00 UTC i 08:00 UTC gdje također daje povećanje brzine vjetra. Razlike se u tome razdoblju kreću od 1 ms^{-1} do 4 ms^{-1} , dok između 10:00 UTC i 23:00 UTC vidimo jako dobro slaganje u vrijednostima s razlikama od 1 ms^{-1} ili manje, uz iznimke točaka u 20:00 UTC i 21:00 UTC gdje raste na oko 2 ms^{-1} .

Na postaji u Šibeniku vidimo da model precjenjuje brzinu između 00:00 UTC i 05:00 UTC s razlikom između 2 ms^{-1} i 3 ms^{-1} . Međutim, vidimo dobro slaganje u grafovima između 05:00 UTC i 14:00 UTC uz razliku u vrijednostima od $1,5 \text{ ms}^{-1}$ ili manjom, a u 15:00 UTC vidimo pad brzine u modelu, dok mjerenja pokazuju rast. Model nakon toga također predviđa rast brzine, no podcjenjuje ga između 2 ms^{-1} i 3 ms^{-1} .

Doprinosi ukupnom polju strujanja na raznim skalama u slučaju S3 prikazani su na slici 3.22 za dva trenutka koji su prethodili tuči; u 05:00 UTC i 07:00 UTC. Lijevi stupac prikazuje trenutak u 05:00 UTC (3.22a, c, e, g), a desni stupac prikazuje trenutak u 07:00 UTC (3.22b, d, f, h).

Ovaj slučaj obilježavaju doprinosi sinoptičke skale i mikroskale. Slike 3.22c, d pokazuju utjecaj jugoistočnog strujanja preko cijele domene, no i da je utjecaj tog strujanja na području Mljeta slab, oko 25 % ukupnog strujanja. Utjecaj mezoskale u ovom slučaju je slabiji u 05:00 UTC, ali uočen je utjecaj konvergencije u polju strujanja paralelnom obali koji prati liniju nestabilnosti (3.22e, f). Međutim, to i dalje nije dovoljno za velik utjecaj mezoskale, doprinosi oko 25 % ukupnome strujanju, kao i makro skala. Mikro-skala (3.22g, h) u ovome slučaju lokalno znatno modificira ukupno polje strujanja, s najvećim utjecajem uz obalu od Crne gore do Dubrovnika. Ovaj se utjecaj očituje i nad jugoistočnom te sjeverozapadnom dijelom Mljeta gdje vidimo područja strujanja s brzinama većima od 4 ms^{-1} , što pridonosi s preko 40 % od ukupnog strujanja.

Premještanjem sinoptičkog jugoistočnog strujanja i pojave jakog mikroskalnog strujanja nad sjeverozapadnim dijelom Mljeta dolazi do izolirane konvekcije malih dimenzija s tučom zabilježenom u Goveđarima. Pokazalo se da su dimenzije sustava bile premale za uspješnu prognozu.



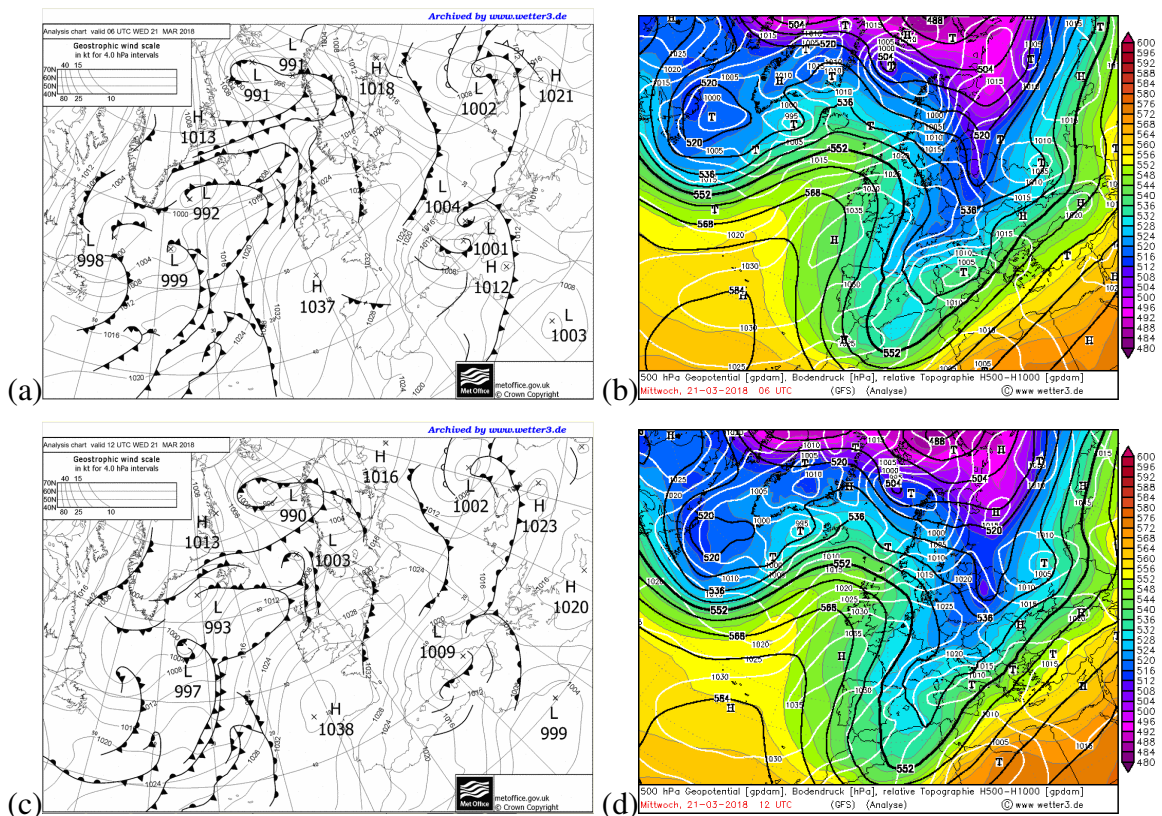
Slika 3.22. Dekompozicija ukupnog vjetra na 10 m visine (a, b) na makro- (c, d), mezo- (e, f) i mikro- (g, h) skalu za 27.2.2016. u dva termina: 05:00 UTC (lijevi stupac) i 07:00 UTC (desni stupac)

3.4. Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja (S4) iz 21.3.2018.

Na prizemnoj slici uočava se formirano polje povišenog tlaka iznad Atlantskog oceana u blizini francuske obale koje se nastavlja preko središnje i istočne Europe gdje je ojačao ogranač anticiklone. Polje povišenog tlaka potiskuje gibanje ciklona prema jugu Europe. Jedna ciklona je bila nad Jonskim morem, a nova ciklona sa središtem iznad Korzike u 06:00 UTC 20.3.2018. premještala se svojom glavnom južno iznad Sredozemlja. Ciklona i okludirana fronta na njezinoj prednjoj strani pomicala su se prema istoku iznad Italije prema našim krajevima te su zahvatile južnu Dalmaciju oko 00:00 UTC. Ciklona ovdje usporava tako da

se jug Dalmacije nalazi ispred okludirane fronte (slike 3.23a, c), na prednjoj strani ciklone. Ciklona se zadržava cijeli dan nad područjem interesa, zamirujući tek oko 18:00 UTC. Ovakav položaj je veoma pogodan za nastajanje grmljavinske oborine te dolazi do tuče iznad Hvara zabilježene u SYNOP izvješću u 08:19 UTC. U izvješću SYNOP-a također je vidljivo da je došlo do grmljavinskog nevremena u 05:00 UTC koje traje sve do 09:00 UTC uz slabljenje oko 08:00 UTC te brzine vjetra između 9 ms^{-1} i 11 ms^{-1} . Relativna vlažnost zraka u ovom razdoblju se promijenila s početnih 81 % na 60 % u 09:00 UTC. U navedenom razdoblju kiša pada isprekidano, no posebno jako oko 06:00 UTC. Nakon toga kiša slabi, dolazi do tuče u 08:19 UTC te dalje pada umjereno sve do 13:00 UTC.

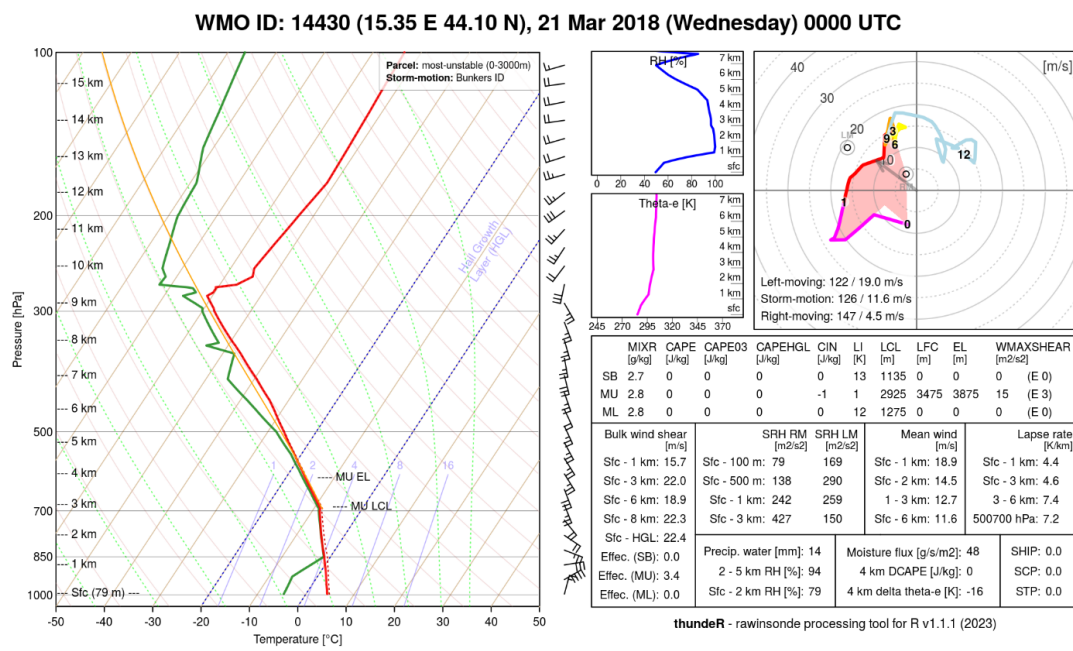
Gledajući visinsku kartu apsolutne topografije 500-hPa izobarne plohe od 21.3.2018. (slika 3.23b, d) u 00:00 UTC, uočava se da se Hrvatska nalazi na prednjoj strani visinske doline u kojoj također dolazi do nastanka visinske ciklone točno iznad prizemne. Dana 21.3.2018. između 00:00 UTC i 06:00 UTC visinska ciklona nestaje, no Hrvatska ostaje na prednjoj strani doline gdje se stvaraju povoljni uvjeti za nastanak konvekcije i grmljavinskog nevremena.



Slika 3.23. Sinoptička situacija na dan 21.3.2018. (a) prizemna karta u 06:00 UTC i (c) prizemna karta u 12:00 UTC (izvor: https://www.wetter3.de/Archiv/archiv_ukmet.html) te geopotencijalna visina izobarne plohe 500 hPa (gpdm, crne linije), relativna topografija RT 500/1000 (gpdm, boje) te prizemno polje tlaka (hPa, bijele linije) u (b) 00:00 UTC i (d) 06:00 UTC (izvor: https://www.wetter3.de/archiv_gfs_dt.html)

Slično kao i za slučaj S3, vertikalni profil atmosfere na postaji Zadar - Zemunik u 00:00 UTC (slika 3.24.) pokazuje stabilnu atmosferu s vrijednostima MU - CAPE-a i MU - CIN-a jednakima 0 Jkg^{-1} jer je po visini pritičao hladni zrak. Također, smicanje vjetra između tla i 6 km visine je $18,9 \text{ ms}^{-1}$ što je povoljno za razvoj organizirane konvekcije, a količina vlage

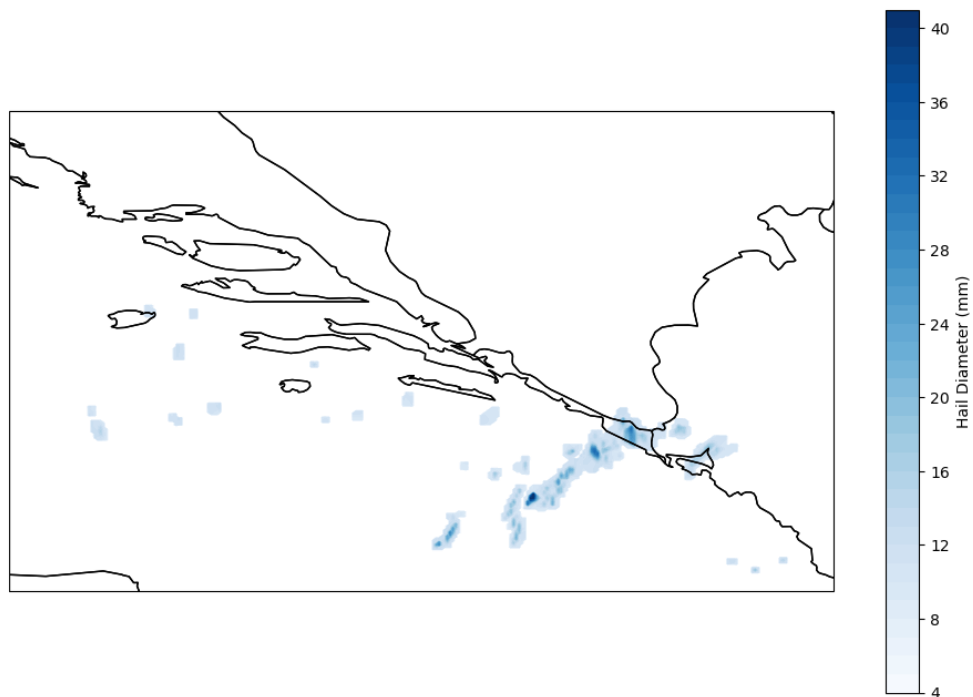
u atmosferi je veoma visoka u cijelom vertikalnom profilu, dok je između 1 km i 4 km visine zrak skoro potpuno zasićen vlagom. Dalmacija se ponovno nalazi u zoni jugozapadnog visinskog strujanja, a prolaskom i zadržavanjem fronte nad južnim Jadranom u uvjetima visoke vlažnosti i jakog smicanja vjetra, dolazi do grmljavinskog nevremena i tuče, unatoč tome što su vrijednosti statičkih indeksa stabilnosti atmosfere MU-CAPE-a i MU-CIN-a jednake 0 J kg^{-1} .



Slika 3.24. Vertikalni profil atmosfere na postaji Zadar - Zemunik 21.3.2018. u 00:00 UTC

Produkti konvekcije prikazani su na slikama 3.25.-3.27. Simulirani dnevni maksimalni promjer tuče pokazuje pojavu tuče promjera ispod 3 cm u cijelome danu. Model prognozira tuču samo na području krajnjeg jugoistoka Dalmacije i na granici s Crnom Gorom. Za područje Hvara, gdje je zabilježena tuča u 08:19 UTC, tuča nije prognozirana.

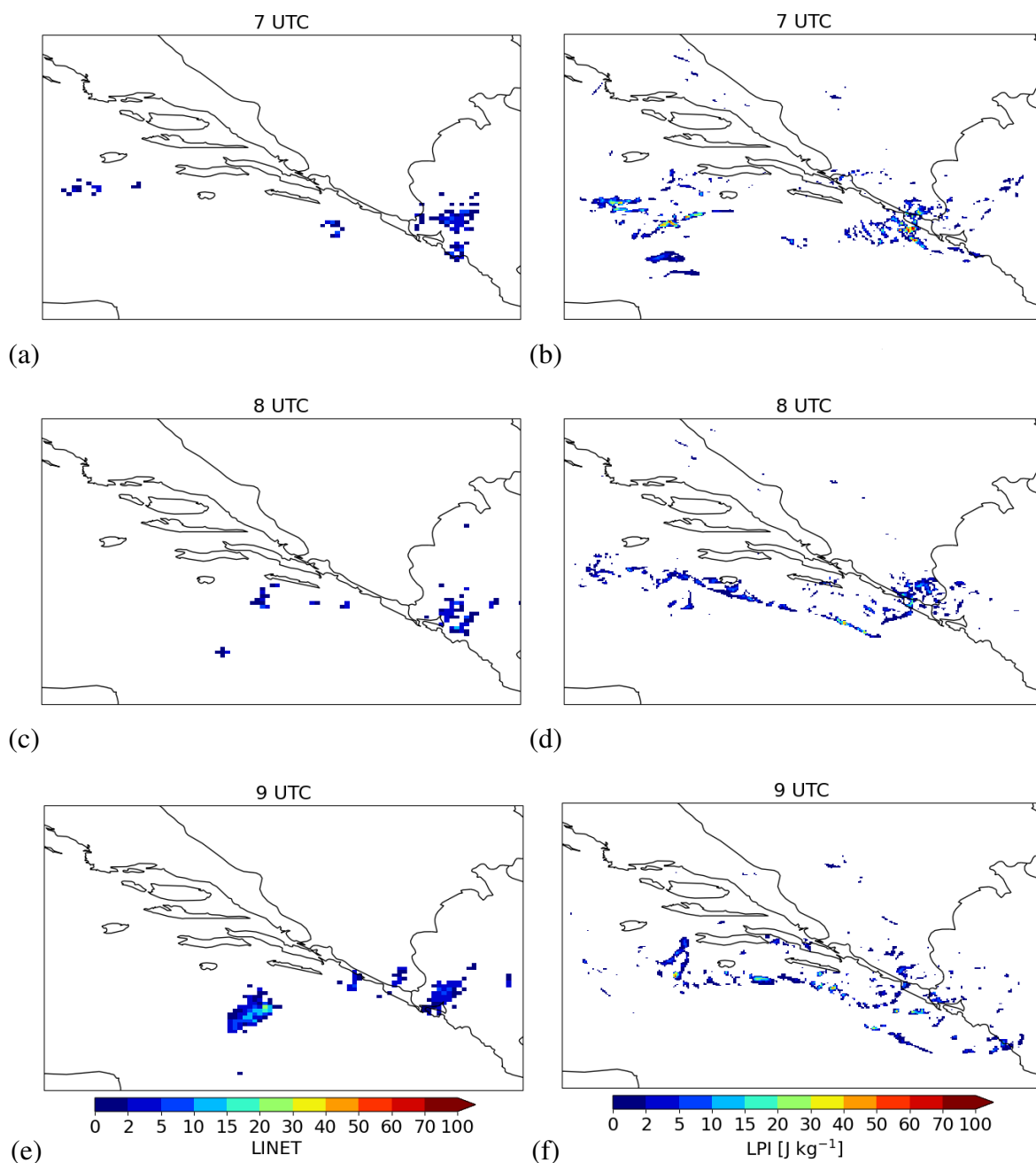
Model ni u jednom slučaju nije sasvim dobro reproducirao tuču na meteorološkim postajama koje su potvrdile tuču. Ipak teško je reći je li potpuno krivo reproducirao tuču na cijeloj domeni zbog malog broja postaja i njihovog prostornog rasporeda. Također, u slučajevima koje je reproducirao ima mnogo prognozirane tuče nad morem, gdje nemamo nikakve podatke te ne možemo sa sigurnošću reći koliko je model točan. Međutim, treba naglasiti da je usporedba točke na točku za takve rijetke događaje vrlo limitirana u svojoj procjeni. Moguće je koristiti neke druge metode verifikacije koje uzimaju radijus utjecaja na lokaciju događaja, a detalje je moguće pronaći u Malečić (2023.).



Slika 3.25. Simulirani dnevni maksimalni dijаметar tuče za 21.3.2018.

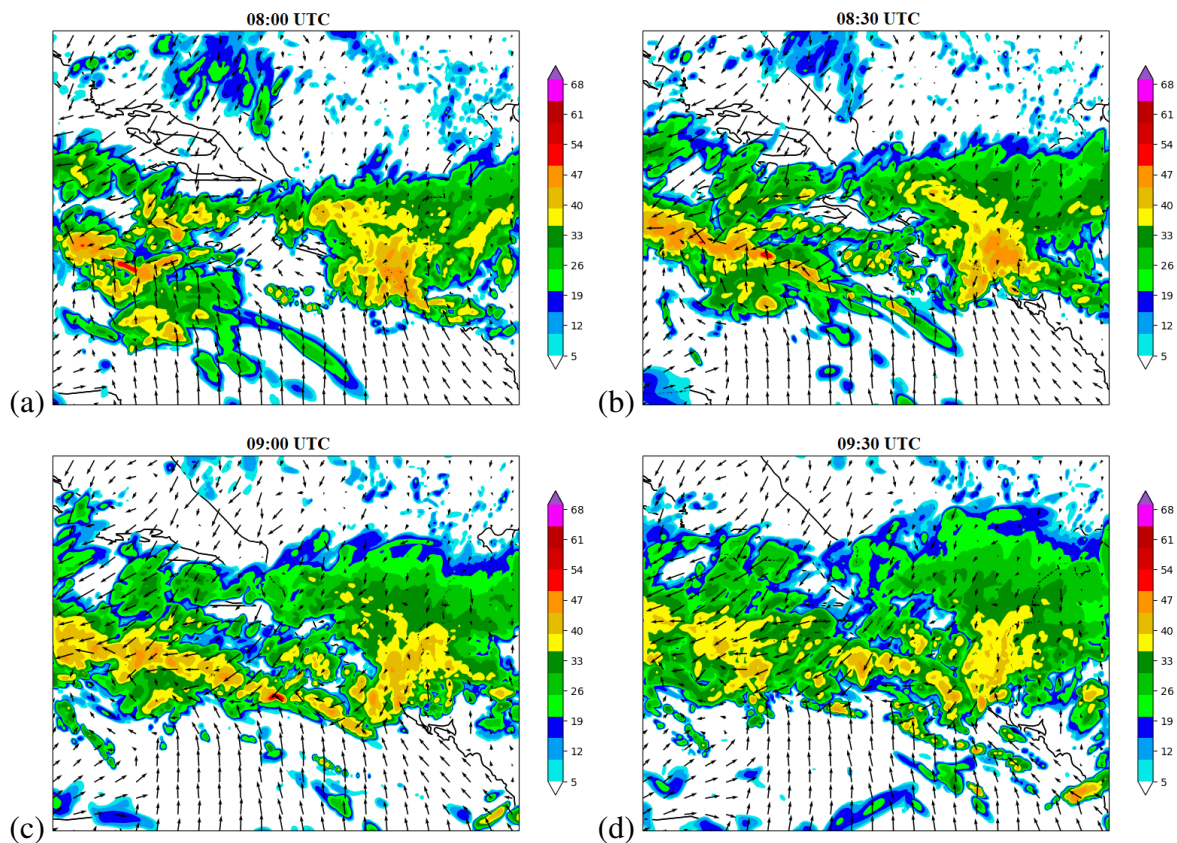
Usporedba modelski dobivenih rezultata aktivnosti munja LPI i izmjerene udare munja iz LINET mreže nalazi se na slici 3.26.

Prikazano je vrijeme između 07:00 UTC i 09:00 UTC s obzirom da je tuča zabilježena u 08:19 UTC. Iako model malo precjenjuje broj munja, vidi se dobro slaganje modela i izmjerenih podataka. Rezultati iz modela dobro prate prostorni i vremenski razvoj konvektivnog sustava iz mreže LINET koji se kreće na jugoistok. U 07:00 UTC to su područja kod (i) granice sa Crnom Gorom, (ii) iznad mora južno od Dubrovnika te (iii) na moru južno od Visa. Slično podudaranje, ali uz malo precjenjivanje signala nad morem u modelu, prisutno je i sat kasnije u 08:00 UTC, s aktivnošću munja iznad granice s Crnom Gorom. U 09:00 UTC model dobro vidi i signale nad morem kao i nad kopnom, no u ovome slučaju podcjenjuje te signale i pokazuje dodatne iznad mora južno od Dubrovnika koji nisu izmjereni.



Slika 3.26. Podaci o pojavama munja iz LINET mreže (a, c, e) te modelski dobiven LPI pomoću jednadžbe 2.1. (b, d, f) za slučaj 21.3.2018.

Simulirani radarski odraz (slika 3.27.) pokazuje da je model u ovome slučaju prilično dobro procijenio prostornu i vremensku raspodjelu oblačnog sustava. Odvojeni oblačni sustav iznad mora prikazan kao intenzivan radarski odraz kreće s juga na sjever prema Hvaru u vrijeme tuče. Sustav dolazi iznad Hvara u 08:15 UTC. Nad lokacijom se zadržava sve do 14:00 UTC, a slabiji intenzitet radarskog odziva ukazuje na mogućnost razvoja kiše. Modelski je rezultat u skladu s mjerenjima na postaji Hvar koju je obilježila stalna kiša u cijelom spomenutom razdoblju i tuča u 08:19 UTC. Unatoč dobroj reprodukciji kretanja sustava i njegovog životnog vijeka, model je podcijenio razvoj konvektivnog sustava u vrijeme tuče, odnosno intenzitet radarskog odziva pri kojemu nastaje tuča (>50 dBz).

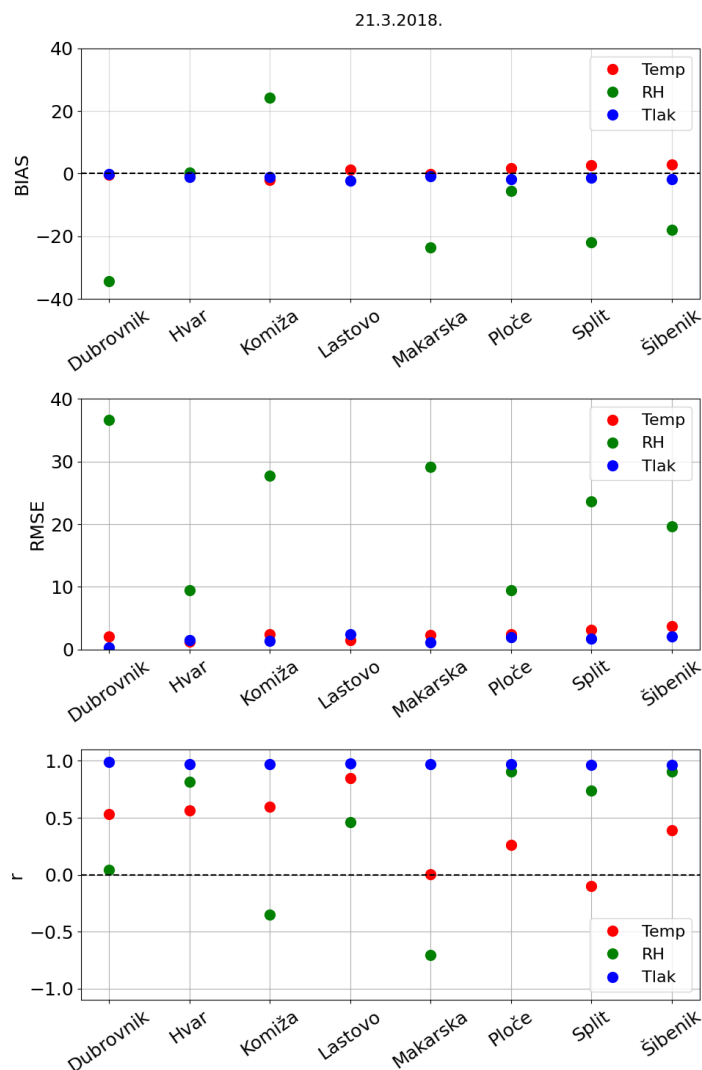


Slika 3.27. Simulirani radarski odraz slučaja 21.3.2018. u; (a) 08:00 UTC, (b) 08:30 UTC, (c) 09:00 UTC, (d) 09:30 UTC

Na slici 3.28 prikazane su izračunate statističke veličine za temperaturu, tlak i relativnu vlažnost.

Gledajući temperaturu, pristranost po postajama iznosi najčešće oko $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ na svim postajama (osim onih u Dubrovniku i Makarskoj). Dobro podudaranje modela i mjerenja potvrđuju RMSE gdje su iznosi na većini postaja između $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ te u Šibeniku $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Koeficijent korelacije je poprima različite vrijednosti po postajama od Lastova (oko 0,9) do postaja u Makarskoj i Splitu na kojima nema korelacije.

Vrijednosti tlaka su veoma slične kao i u prijašnjim slučajevima. Opet vidimo malu pristranost, oko 1 hPa ili manje na svim promatranim postajama. Sličan uzorak vidimo i na grafu RMSE gdje su vrijednosti malo veće, između 1 hPa i 3 hPa na svim postajama. Kao i u slučaju S2, koeficijent korelacije je na svim postajama veći od 0,95.



Slika 3.28. Izračunate statističke veličine za temperaturu, tlak i relativnu vlagu za 21.3.2018.

Po iznosu najveća pristranost je za relativnu vlažnost na većini postaja. Iznimke tome su postaje Hvar i Ploče, gdje je ta pristranost blizu 0 %. U Dubrovniku vidimo najveću vrijednost od -35 %, a na ostalim postajama se pristranost kreće oko -20 %. Vrijednosti RMSE-a se kreću na postajama Hvar i Ploče oko 10 %, dok u Dubrovniku ima najveću vrijednost od 37 %. Na ostalim postajama ta se vrijednost kreće između 20 % i 30 %. Koeficijent korelacije je jako dobar na postajama Hvar, Ploče, Split i Šibenik, s vrijednostima većima od 0,75. Postaja Lastovo pokazuje vrijednost nešto manju od 0,5, Dubrovnik 0, a Komiža i Makarska imaju negativne koeficijente korelacije od -0,4 i -0,7.

Na slici 3.29. prikazana je usporedba dnevnih hodova izmjerenih i modelski dobivenih vrijednosti brzine vjetera na visini od 10 m na svim postajama osim onih u Komiži i Šibeniku. Podaci s njih u ovom slučaju nisu bili dostupni pa su izuzeti iz ove analize.

Na postaji u Dubrovniku model najbolje prati trend promjene brzine, posebno nakon 12:00 UTC kada se neke točke i poklapaju, no ta se razlika malo povećava poslije 19:00 UTC. U jutarnjim satima vidimo slabije slaganje u vrijednostima, ali i u trendu promjene.

Na postaji Hvar model prije 07:00 UTC podcjenjuje vrijednosti brzine između 4 ms^{-1} i 7 ms^{-1} , a nakon toga počinje bolje pratiti trend promjene, čak i u vrijeme zabilježene tuče u 08:19 UTC. Razlika u vrijednostima je manja, a nakon 13:00 UTC razlika u vrijednostima

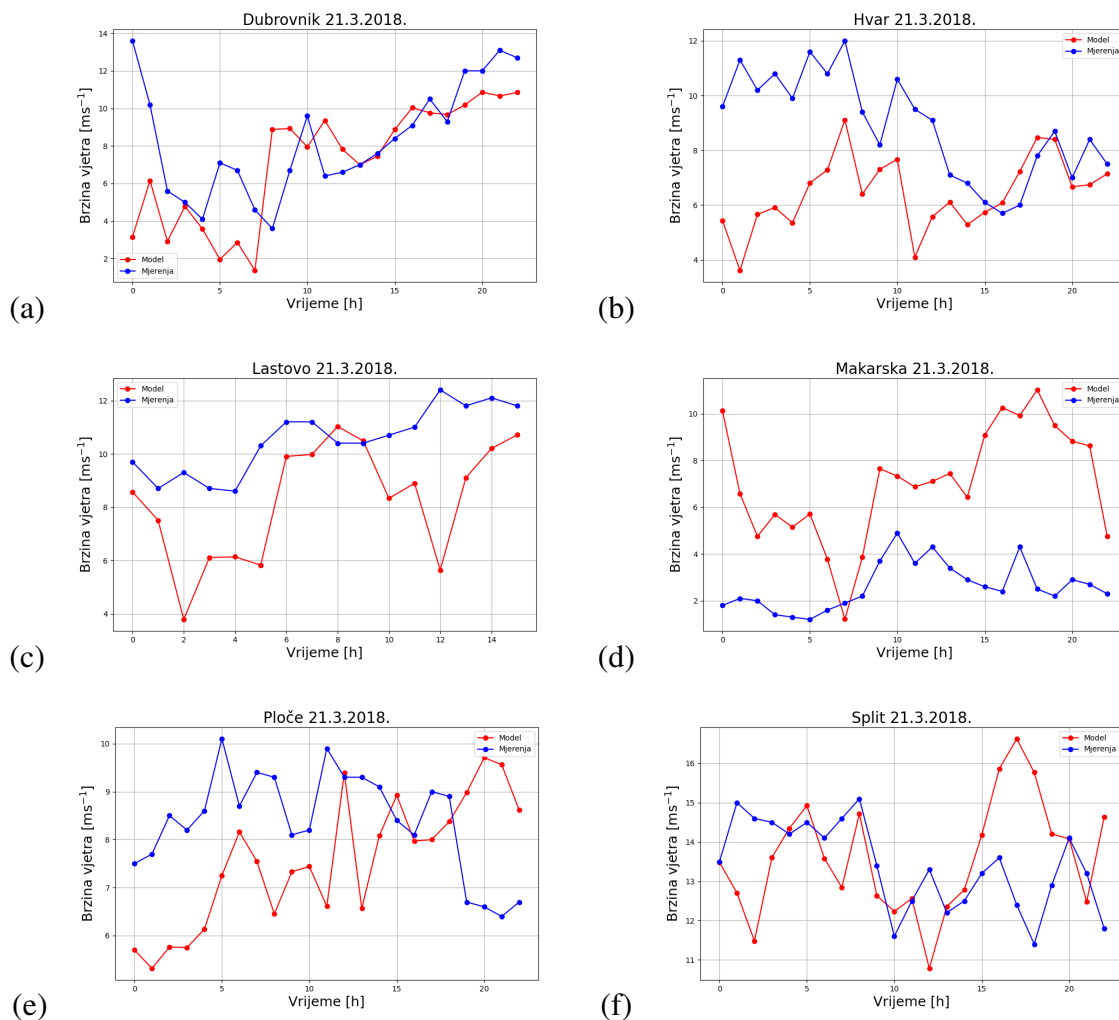
spušta se ispod 1 ms^{-1} .

Za postaju Lastovo vidimo da model podcjenjuje brzinu u većini točaka, posebice u 02:00 UTC i 12:00 UTC kada ta razlika povremeno prelaze 5 ms^{-1} . Ipak, u vrijeme tuče razlika je manja od $1,5 \text{ ms}^{-1}$.

Na postaji Makarska model uglavnom precjenjuje brzine (osim one u 07:00 UTC), jer mjerene uglavnom ne prelaze 4 ms^{-1} .

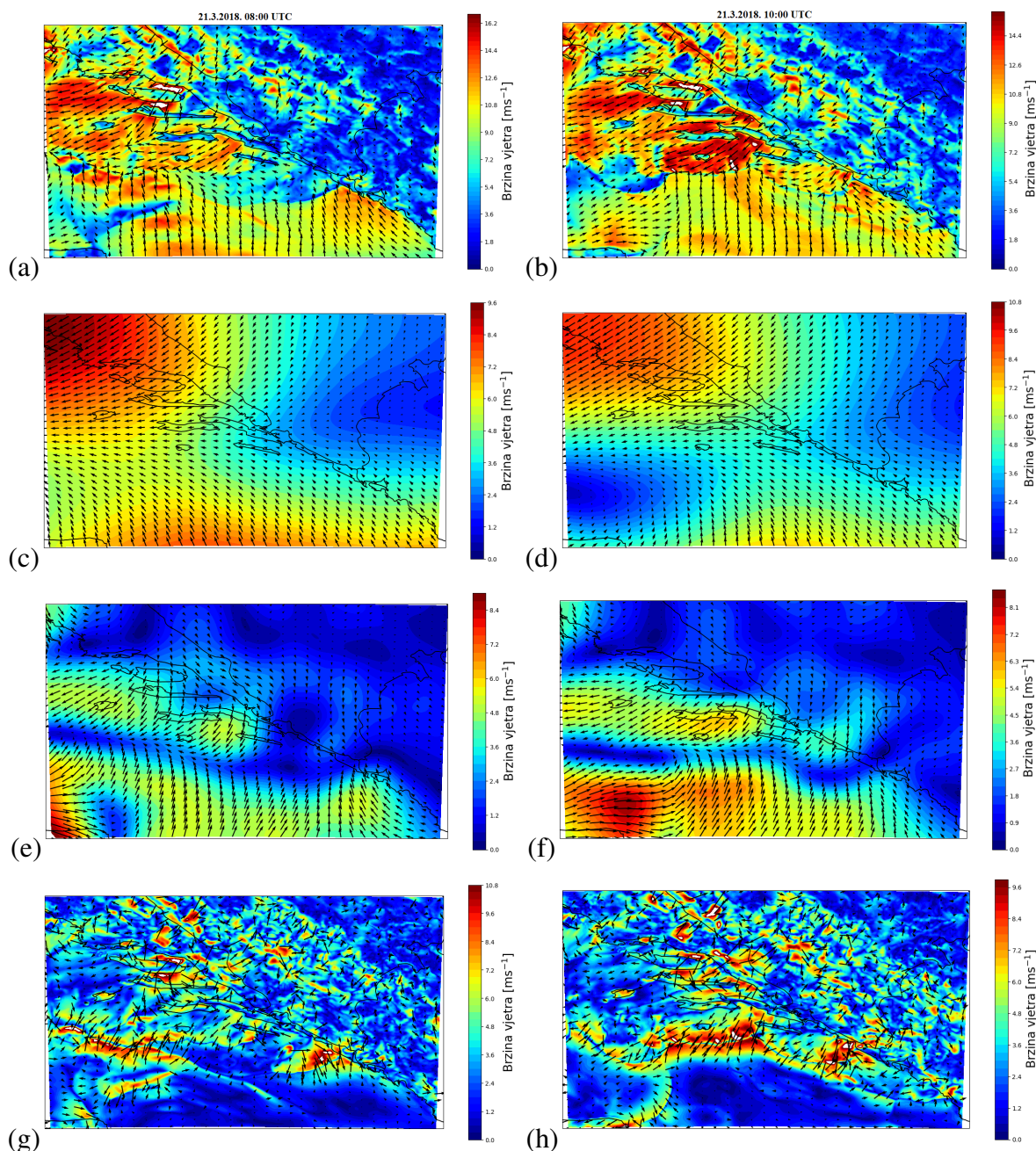
Na postaji Ploče, modelirani vjetar dobro prati trend rasta i pada većih mjerenih brzina vjetra između 00:00 UTC i 09:00 UTC, no podcjenjuje sve vrijednosti za otprilike 3 ms^{-1} . Noćni termini ukazuju na veća odstupanja, dok su dnevni (12:00-18:00 UTC) s razlikama uglavnom od 1 ms^{-1} ili manje.

Model je na postaji Šibenik također pokazao dobro slaganje s mjerenjima u periodu između 03:00 UTC i 15:00 UTC, posebice između 08:00 UTC i 09:00 UTC kada je zabilježena tuča na Hvaru. Model tada predviđa rast brzine na $16,7 \text{ ms}^{-1}$, dok mjerenja pokazuju pad brzine na $11,3 \text{ ms}^{-1}$, no ponovno vidimo dobro slaganje u 20:00 UTC i 21:00 UTC.



Slika 3.29. Usporedba izmjerenih (plavo) i modelski (crveno) dobivenih vrijednosti brzine vjetra na 10 m visine na svim mjernim postajama osim Splita za slučaj 21.3.2018.

Na kraju pogledajmo rezultate metode dekompozicije skala polja vjetra na mikro, mezo i makro skalu na sljedećoj slici. Lijevi stupac prikazuje trenutak u 08:00 UTC (3.32a, c, e, g), a desni stupac prikazuje trenutak u 10:00 UTC (3.32b, d, f, h).



Slika 3.30. Dekompozicija ukupnog vjetra na 10 m visine (a, b) na makro- (c, d), mezo- (e, f) i mikro- (g, h) skalu za 21.10.2011. u dva termina: 08:00 UTC (lijevi stupac) i 10:00 UTC (desni stupac)

U ovome slučaju ukupno strujanje (slike 3.30a, b) pokazuje da je maksimum brzine na zapadnoj i sjevernoj obali Hvara te prelazi vrijednosti od 17 ms^{-1} na sjevernoj strani. Slično kao u slučaju S2, mezoskala nema velik utjecaj (slike 3.30e, f), oko područja Hvara brzine dostižu maksimalno 4 ms^{-1} što doprinosi oko 15 % brzine ukupnome strujanju. Slike makro skale (3.30c, d) pokazuju da je sinoptički utjecaj puno važniji. Južno i jugoistočno strujanje na moru spaja se sa sjeveroistočnim strujanjem s kopna između Hvara i Korčule i dostiže brzinu od 8 ms^{-1} te se smanjuje na oko 7 ms^{-1} u promatranome razdoblju. Time doprinosi s oko 40 % ukupne brzine strujanja. Međutim, najjači utjecaj ima mikroskala, na kojoj vidimo jake lokalni utjecaj i udare vjetra koji potiču jače uzdizanje vlažnog zraka i pojačavanje

konvekcije. To se posebno vidi na sjevernoj obali Hvara, gdje brzine prelaze i 10 ms^{-1} , time čineći više od pola brzine vjetra u ukupnome polju strujanja na samom sjeveru Hvara.

4. Zaključak

U ovom radu fokus je bio na analizi slučajeva ranojutarnje tuče u južnom dijelu Jadrana. Klimatološka obilježja tuče na jugu Hrvatske imaju specifičan godišnji i dnevni hod. Tijekom godine tuča je češća zimi, a tijekom dana nema izrazitog poslijepodnevnog maksimuma što je osobina dnevnih hoda tuče nad kontinentom kao posljedica dnevnog ciklusa zagrijavanja. Upravo suprotno ističe se jutarnji (od 4 h do 10 h po lokalnom vremenu) maksimum koji se opaža u hladnijem dijelu godine. Time su mehanizmi koji uzrokuju konvekciju drugačiji od poznatih te je nužno daljnje ispitivanje uzroka na području obale. Zbog toga se u ovom radu željelo ostvariti više ciljeva. Osim provođenja numeričkih simulacija nekoliko odabranih slučajeva zimske konvekcije na južnom dijelu Jadrana, bilo je potrebno izvršiti evaluaciju uspješnosti modela odabranih slučajeva zimske konvekcije te algoritama za produkte konvekcije (tuču i munje). Također je bilo potrebno istražiti uzroke/doprinos raznih prostornih skala forsiranja pojavi ranojutarnje konvekcije zabilježene u hladnom dijelu godine.

Kod istraživanja odabrana su četiri slučaja iz baze podataka o tuči (Blašković i sur., 2023.). Prilikom odabira slučajeva, korištena su dva kriterija: (i) pojava tuče i munja u ranojutarnjim satima duž postaja Dalmacije te (ii) dobra dokumentiranost u mjerenjima ostalih meteoroloških parametara. U analizama se koristio širok spektar dostupnih mjerenja te metoda. Od mjerenja bilo je dostupno: (i) prizemne i visinske sinoptičke karte, (ii) radiosondažna mjerenja u domeni interesa, (iii) standardna meteorološka mjerenja po postajama, (iv) mjerenja munja iz mreže LINET te (v) digitalizirani podaci o tuči. Također se koristio i modelski sustav WRF s velikom razlučivošću (do 1 km) koji uključuje korištenje algoritma HAILCAST. Uspješnost izlaznog rezultata modela provjeravana je standardnim statističkim parametrima i pristupom “točka-na-točku“. Nadalje, izlazni podaci modela korišteni su za (i) proračun indeksa potencijalnog razvoja munja te (ii) je na njih primijenjena dekompozicija skala strujanja radi razlučivanja dominantnog forsiranja nastanka konvekcije.

Rezultati su pokazali učestali sinoptički obrazac za pojavu konvekcije i tuče u hladnom dijelu godine u ranojutarnjim satima. Obično se radi o području sniženog tlaka (u prizemlju) i ciklone/doline po visini koja potiče generiranje prevladavajućeg jugozapadnog strujanja u donjem dijelu troposfere. Time se donosi vlažan i topao zrak nad južni dio Jadrana. Indeksi nestabilnosti CAPE i CIN bili su uglavnom mali (osim u jednom slučaju). Međutim, učestalo su se pojavljivale linije nestabilnosti (konvergencije) u prizemnom sloju i jako smicanje vjetera po visini (do sredine troposfere). Obje osobine su uočene u zimskoj konvekciji u blizini mora (Dolički, 2024.), što su simulacije ovih slučajeva i potvrdile. Skala forsiranja se mijenjala od slučaja do slučaja. Pokazalo se da je za veće konvektivne sustave sinoptička skala imala presudnu ulogu. Za manje sustave, lokalna mikroskala igra značajnu ulogu u formiranju produkata konvekcije zbog djelovanja fronti udara vjetera ispod konvektivnog sustava. Osim navedenog, oblik obale, odnos pozicija mora i kopna te topografija također imaju velik utjecaj na pojavu lokalnog strujanja. Za sve navedeno ima puno prostora za daljnje istraživanje.

Osim uzroka bilo je potrebno vidjeti i uspješnost modela u simuliranju ovako zatjevnih slučajeva. Nažalost, radarski podaci nisu dostupni za istraživanje razdoblje na jugu Jadrana. Ipak prema mjerenjima munja pokazalo se da je model uglavnom u mogućnosti reproducirati konvektivne produkte. Munje su simulirane s većom točnošću nego sama tuča koja je evaluirana u procesu metode (“točka-na-točku“). Zbog navedene metode uočena su odstupanja u prostoru i vremenu nastanka tuče (u jednom slučaju se nije reproducirala). Očekivano, odstupanja su bila veća kod manjih sustava nego kod većih. Kod većih sustava došlo je do

precjenjvanja pojave tuče i munja. Ipak, postavlja se pitanje, s obzirom na rijetku mrežu mjerenja tuče te nepoznavanja pojave tuče nad morem, koliko zapravo model griješi u svojoj prognozi. Zbog toga bi trebalo koristiti nadopune ovakvome tipu istraživanja na sljedeći način. Potrebno je uključiti radarska mjerenja te koristiti neku drugu metodu evaluacije uz dodatak indeksa TSII (koji objedinjuje pojavu opasnih pojava te ukazuje na konvekciju). Korištenje ovih dodatnih pristupa otvara nove mogućnosti u istraživanju konvekcije u hladnome dijelu godine.

Literatura

- [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>
- [2] Barnes, S. L. (1973.): Mesoscale objective map analysis using weighted time-series observations. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/17647>
- [3] Battaglioli, F., Groenemeijer P., Púčik T., Taszarek M., Ulbrich U., Rust, H. (2023.): Modeled Multidecadal Trends of Lightning and (Very) Large Hail in Europe and North America (1950–2021). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 62, 1627–1653. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0195.1>
- [4] 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>
- [5] Blašković L., Jelić D., Malečić B., Omazić B., Güttler I., Telišman Prtenjak M. (2023.): Trend analysis and climatology of hail in Croatia. *Atmospheric Research*, 294, 106927
- [6] Brimelow J. C., Reuter G. W., Poolman E. R. (2002.): 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)
- [7] Cotton W. R., Bryan G. H., Van den Heever S. (2010.): *Storm and Cloud Dynamics*. Second edition. Academic Press, USA
- [8] Cui R., Ban N., Demory M. E., Aellig R., Fuhrer O., Jucker J., Lapillonne X., Schär C. (2023.): Exploring hail and lightning diagnostics over the Alpine-Adriatic region in a km-scale climate model, *Weather and Climate Dynamics*, 4, 905–926. <https://doi.org/10.5194/wcd-4-905-2023>
- [9] Dessens J., Berthet C., Sanchez J. L. (2007.): A point hailfall classification based on hailpad measurements: The ANELFA scale, *Atmospheric Research*, 83, 132–139. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2006.02.029>
- [10] Dolički D. (2024.): Sinoptički i mezoskalni uvjeti duboke mokre konvekcije u hladnom dijelu godine u Hrvatskoj. Diplomski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb
- [11] Franc B., Uglešić I., Piliškić S. (2015.): Lightning data utilization in power system control. *Journal of Energy*, 64, 62–77
- [12] Galanaki E., Lagouvardos K., Kotroni V., Flaounas E., Argiriou A. (2018.): Thunderstorm Climatology in the Mediterranean Using Cloud-to-Ground Lightning Observations. *Atmospheric Research*, 207, 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.03.004>
- [13] Graham M., Dutton W. H., Eds. (2019.): *Society and the Internet: How Networks of Information and Communication Are Changing Our Lives*. 2nd ed. Oxford University Press, 480 pp

- [14] Holton J. R. (2004.): *An Introduction to Dynamic Meteorology: Fourth Edition*. Elsevier Academic Press.
- [15] Jelić D. (2022.): *Obilježja tuče u sadašnjoj i budućoj klimi nad područjem Hrvatske*. Doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb
- [16] Jelić D., Megyeri O.A., Malečić B., Belušić Vozila A., Strelec Mahović N., Telišman Prtenjak M. (2020.): Hail climatology along the Northeastern Adriatic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2020JD032749. <https://doi.org/10.1029/2020JD032749>
- [17] Jelić D., Telišman Prtenjak M., Malečić B., Belušić Vozila A., Megyeri O.A., Renko T. (2021.): A new approach for the analysis of deep convective events: thunderstorm intensity index. *Atmosphere*, 12, 908. <https://doi.org/10.3390/atmos12070908>
- [18] Kahraman A., Kendon E. J., Fowler H. J. (2024.): Climatology of severe hail potential in Europe based on a convection-permitting simulation. *Climate Dynamics*, <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07227-w>
- [19] Malečić B. (2023.): *Numeričke simulacije tuče i indeksa potencijalnog razvoja munja nad Hrvatskom*. Doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb
- [20] Malečić B., Cui R., Demory M.E., Horvath K., Jelić D., Schar C., Telišman Prtenjak M., Velasquez P., Ban N. (2023.): Simulating hail and lightning over the Alpine Adriatic region a model intercomparison study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, <https://doi.org/10.1029/2022JD037989> e2022JD037989
- [21] Malečić B., Telišman Prtenjak M., Horvath K., Jelić D., Mikuš Jurković P., Čorko K., Mahović Strelec N. (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, 106143. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106143>
- [22] Mohr S., Kunz M., Keuler K. (2015.): Development and Application of a Logistic Model to Estimate the Past and Future Hail Potential in Germany: Logistic model estimating hail potential. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120 (9), 3939–56. <https://doi.org/10.1002/2014JD022959>
- [23] 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
- [24] Mikuš P., Strelec Mahović N. (2013.): Satellite-based overshooting top detection methods and an analysis of correlated weather conditions. *Atmospheric Research*, 123, 268–280
- [25] Nisi A., Hering, Germann U., Martiu, O. (2018.): A 15-year hail streak climatology for the Alpine region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144, 1429–1449. <https://doi.org/10.1002/qj.3286>

- [26] Počakal D., Štalec J. (2003.): Statistical Analysis of Hail Characteristics in the Hail-Protected Western Part of Croatia Using Data from Hail Suppression Stations. *Atmospheric Research*, 67–68, 533–540. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(03\)00071-1](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(03)00071-1)
- [27] Počakal D., Večenaj Ž., Mikuš Jurković P., Grisogono B. (2018.): Analysis of Orographic Influence on Hail Parameters in NW Croatia. *International Journal of Climatology*, 38, 5646–5658. <https://doi.org/10.1002/joc.5769>
- [28] Púčík T., Castellano C., Groenemeijer P., Kühne T., Rädler A., Antonescu B., Faust E. (2019.): Large hail incidence and its economic and societal impacts across Europe. *Monthly Weather Review*, 147(11), 3901–3916. <https://doi.org/10.1175/MWRD-19-0204.1>
- [29] Punge H. J., Bedka K. M., Kunz M., Reinbold A. (2017.): Hail Frequency Estimation across Europe Based on a Combination of Overshooting Top Detections and the ERAINTERIM Reanalysis. *Atmospheric Research*, 198, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.07.025>
- [30] Seimon A., Allen J. T., Seimon T. A., Talbot S. J., Hoadley D. K. (2016.): Crowdsourcing the El Reno 2013 tornado: A new approach for collation and display of storm chaser imagery for scientific applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97, 2069–2084. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00174.1>
- [31] 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>
- [32] Stržinar G., Skok G. (2018.): Comparison and Optimization of Radar-Based Hail Detection Algorithms in Slovenia. *Atmospheric Research*, 203: 275–85. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.01.005>
- [33] Taszarek M., Allen J. T., Groenemeijer P., Edwards R., Brooks H. E., Chmielewski V., Enno S.-E. (2020.): Severe convective storms across Europe and the United States. Part I: Climatology of lightning, large hail, severe wind, and tornadoes. *Journal of Climate*, 33, 10 239–10 261. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0345.1>
- [34] 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>
- [35] Vinet F. (2001.): Climatology of Hail in France. *Atmospheric Research*, 56, 309–23. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(00\)00082-X](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(00)00082-X)
- [36] Webb J. D. C., Elsom D. M., Reynolds D. J. (2001.): Climatology of Severe Hailstorms in Great Britain. *Atmospheric Research*, 56, 291–308. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(00\)00081-8](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(00)00081-8)
- [37] 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: Atmosphere*, 122, 47–64. <https://doi.org/10.1002/2016JD026017>

- [38] 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>

Popis kratica

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

Cb Kumulonimbus

DHMZ Državni hidrometeorološki zavod

EL engl. *Equilibrium Level*, ravnotežni nivo

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

LCL engl. *Lifting Condensation Level*, nivo kondenzacije

LFC engl. *Level of Free Convection*, nivo slobodne konvekcije

LINET engl. *Lightning Network*, mreža mjerenih udara munje

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

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

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

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

WMO engl. *World Meteorological Organisation*, svjetska meteorološka organizacija

WRF engl. *Weather Research and Forecasting model*

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

WRF-NMM engl. *Weather Research and Forecasting - Nonhydrostatic Mesoscale Model*