

Analiza uzroka noćne i ranojutarnje duboke konvekcije nad sjeveroistočnim Jadranom

Križanac, Anna-Maria

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:217:972835>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-13**



Repository / Repozitorij:

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





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Anna-Maria Križanac

ANALIZA UZROKA NOĆNE I RANOJUTARŃJE
DUBOKE KONVEKCIJE NAD SJEVEROISTOČNIM
JADRANOM

Diplomski rad
Zagreb, 2020

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

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

Anna-Maria Križanac

Diplomski rad

ANALIZA UZROKA NOĆNE I RANOJUTARŃJE
DUBOKE KONVEKCIJE NAD SJEVEROISTOČNIM
JADRANOM

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

Neposredni voditelj: Barbara Malečić, mag. phy.-geophy.

Zagreb, 2020.

Zahvale

Kada osjećamo zahvalnost prema nekomu ili nečemu, potrebno ju je izreći. Stoga bih riječi na ovoj stranici uputila ljudima koji su mi omogućili da danas budem tu gdje jesam.

Prvo bih se htjela zahvaliti svojoj mentorici, izv. prof. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak, na prihvaćanju odgovornosti da bude smjerokaz kroz završnu i najodgovorniju etapu mog studija. Hvala Vam na odvojenom vremenu, strpljenju, motivaciji, savjetima i znanju koje ste mi ukazali tijekom studija, a posebno tijekom ovih zadnjih mjeseci.

Htjela bih se zahvaliti i Barbari Malečić na kontinuiranoj pomoći, savjetima i znanju kojeg sam dobila od nje tijekom izrade ovog rada. Hvala ti što si bila i kolegica i sumentorica u isto vrijeme.

Također se zahvaljujem prof. Hans-Dieter Betzu na ustupljenim LINET podacima o registriranim munjama.

Numeričke simulacije korištene u ovom radu dobivene su zahvaljujući projektu Severe weather over the Alpine-Adriatic region in a changing climate; SWALDRIC (Br. IZHRZO-180587).

Hvala prijateljima i kolegama koji su studij učinili zabavnijim, a ispitna razdoblja manje stresnijim. Posebno hvala tebi, Luka, na podršci i motivaciji koju mi daješ.

Na kraju bih se htjela zahvaliti svojim roditeljima i sestri koji su najzaslužniji za ovaj uspjeh. Hvala Vam na bezgraničnoj ljubavi i povjerenju. Hvala na strpljenju i podršci. Hvala što me ne prestajete motivirati i vjerovati u mene, čak i kad ja krenem sumnjati.

Sadržaj

U ovom radu napravljena je sinoptička i mezoskalna analiza pet odabranih slučajeva tuče u Tršćanskom zaljevu i Istri tijekom vremenskog razdoblja 2010.-2014. Analiza je napravljena s ciljem boljeg razumijevanja uzroka pojačane (rano)jutarnje konvektivne aktivnosti. Tip sinoptičkih uvjeta subjektivno je procijenjen na temelju sinoptičkih karata i profila radiosondažnih mjerenja u terminima 12:00 i 00:00 UTC s postaje Udine. Prilikom analiza svakog slučaja, mezoskalnim numeričkim modelom WRF, pokušali su se reproducirati uvjeti koji su pogodovali razvoju konvekcije i nastanku tuče. Modelirana polja uspoređena su s podacima prikupljenim na 34 meteorološke/klimatološke postaje nepravilno raspoređene u Istri. Provela se usporedba parametara tuče dobivenih specijalnim mjerenjima iz mreže tučomjera s rezultatima modela WRF-HAILCAST kao i usporedba mjerenih udara munja iz LINET mreže s prognoziranim potencijalom za razvoj munja iz modela WRF. Usporedbe provedene na pet odabranih slučajeva dale su zadovoljavajuće rezultate te ukazale na korisnost primjene ovih algoritama.

Numeričke simulacije dale su dalje uvid u prostorno-vremenske karakteristike konvekcije na sjevernom Jadranu te razlučile razne doprinose sinoptičkih i mezoskalnih procesa. U tri analizirana slučaja sinoptičko strujanje nad Istrom onemogućilo je značajniji razvoj termičko-generiranog strujanja manjih mezoskalnih dimenzija. Ipak u dva slučaja termičko-generirani vjetar manje skale se superponirao na sinoptički vjetar veće skale i tako imao upliv na razvoj konvekcije. Glavna je posljedica bila stvaranje niza značajnih zona konvergencije u polju strujanja iznad mora zbog (i) generiranja strujanja koje je dolazilo s kopna na more te (ii) modifikacije strujanja iz južnog u jugoistočni smjer zbog oblika i visine obale nad istarskim poluotokom. Time je stvorena prizemna konvergencija vjetra pospješila stvaranje/održavanje konvektivnih ćelija.

Ključne riječi: konvekcija, tuča, Istra, Tršćanski zaljev, WRF

Analysis of the causes of night and early morning deep convection over the north-eastern Adriatic

Abstract

In this paper, a synoptic and mesoscale analysis of five selected hail cases in the Gulf of Trieste and Istria during the period 2010-2014 was performed. The analysis was made with the aim of better understanding the causes of increased (early) morning convective activity. The type of synoptic conditions was subjectively assessed based on synoptic maps and profiles of radiosonde measurements at 12:00 and 00:00 UTC from Udine station. In the analysis of each case, using the mesoscale numerical model WRF, attempts were made to reproduce the conditions conducive to the development of convection and the occurrence of hail. The modeled fields were compared with data collected at 34 meteorological/climatological stations irregularly distributed in Istria. A comparison of hail parameters obtained by special measurements from the hail meter network with the results of the WRF-HAILCAST model was performed, as well as a comparison of measured lightning strikes from the LINET network with the predicted potential for lightning development from the WRF model. Comparisons conducted on five selected cases gave satisfactory results and indicated the usefulness of applying these algorithms.

Numerical simulations gave further insight into the spatial-temporal characteristics of convection in the northern Adriatic and distinguished various contributions of synoptic and mesoscale processes. In three analyzed cases, the synoptic flow over Istria prevented a significant development of the thermally-generated flow of smaller mesoscale dimensions. Yet, in two cases, the thermally-generated wind of a smaller scale was superimposed on the synoptic wind of a larger scale and thus influenced the development of convection. The main consequence was the creation of several significant zones of convergence in the field of currents above sea level due to (i) generation of airflow coming from land to sea and (ii) modifications of currents from south to southeast due to the shape and height of the coast over the Istrian peninsula. The resulting ground convergence of the wind facilitated the formation/maintenance of convective cells.

Key words: convection, hail, Istria, Gulf of Trieste, WRF

Sadržaj

Popis kratica	1
1 Uvod	2
1.1 Konvekcija	2
1.2 Kumulonimbus	3
1.3 Munje	6
1.4 Tuča	7
1.5 Istraživanje tuče u svijetu	8
1.5.1 Istraživanje tuče u Hrvatskoj	11
1.6 Motivacija i ciljevi	12
2 Podaci i metode	15
2.1 Geografski opis domene	15
2.2 Mjerenja meteoroloških parametara	16
2.2.1 Mjerenja tuče	17
2.3 WRF model	19
2.3.1 HAILCAST model	19
2.3.2 Indeks potencijala za razvoj munja (LPI)	21
2.4 SHARPy	21
2.4.1 Statistički parametri	22
3 Rezultati i diskusija	24
3.1 Odabrani slučajevi	24
3.2 Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja: 31.05.2010.	25
3.3 Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja: 24.05.2013.	31
3.4 Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja: 02.05.2014.	36
3.5 Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja: 27.05.2014.	41
3.6 Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja: 30.06.2014.	46
4 Zaključak	52
5 Literatura	54
6 Dodatak A	58
6.1 Indeksi nestabilnosti	58
6.1.1 Indeks podizaja	58
6.1.2 K indeks	59
6.1.3 Konvektivna raspoloživa potencijalna energija	59

Popis kratica

- AGS atmosferski granični sloj
- BouLac Bougeault-Lacarerre shema
- CAPE konvektivna raspoloživa potencijalna energija, engl. *Convective Available Potential Energy*
- Cb Kumulonimbus
- Cb cal Kumulonimbus calvus
- Cb cap Kumulonimbus capillatus
- ECMWF Europski centar za srednjoročne vremenske prognoze, engl. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*
- ESI indeks energetskeg smicanja, engl. *energy shear index*
- ESWD baza podataka o opasnim olujama u Eruopi (engl. *European Severe Weather Database*)
- GFS Globalni meteorološki model, engl. *Global Forecast System*
- HP jako oborinske superćelije, engl. *high precipitation supercells*
- LCL Nivo kondenzacije česti, engl. *Lifting Condensation Level*
- LFC Nivo slobodne kokvekcije, engl. *Level of free convection*
- LI Indeks podizanja (engl. *Lifted index*)
- LP slabo oborinske superćelije, engl. *low precipitation supercells*
- LPI Indeks potencijala za razvoj munja (eng. *Lightning potential index*)
- METAR franc. *MÉTéorologique Aviation Régulière*
- NCAR američki nacionalni centar za istraživanje atmosfere, eng. *National Center for Atmospheric Research*
- NCEP američki nacionalni centri za predviđanje zaštite okoliša, eng. *National Centers for Environmental Prediction*
- SPECI Specijalni izvještaj
- TKE Turbulentna kinetička energija
- WMO Svjetska meteorološka organizacija, engl. *World Meteorological Organization*
- WRF model engl. *Weather Research and Forecasting*
- WRF-ARW V3 eng. *Advanced Research WRF Version 3*
- WRF-NMM eng. *Nonhydrostatic Mesoscale Model*

Uvod

1.1 Konvekcija

Konvekcija, prijenos topline strujanjem zraka u više slojeve atmosfere, je najmanji kompaktni vremenski sustav koji može utjecati na cijelu troposferu. Sudjeluje u raspodjeli energije od toplijih prema hladnijim područjima Zemlje smanjujući velike temperaturne razlike; od velikog je značaja u tropskoj zoni, a od malog u polarnim regijama.

Postoji više tipova konvekcije. *Slobodna* konvekcija, nastaje zbog razlika u gustoći zraka te znači neometano dizanje zraka uvis. Razlikuje se od *prisilne* konvekcije, koja nastaje npr. pri dizanju zraka uz padine planina. Može se napraviti i podjela na *suha*, *plitku i duboku* konvekciju. Pod pojmom *suha* konvekcija podrazumijeva se konvekcija koja nije povezana s nastankom oblaka i koja se odvija unutar graničnog sloja. Prilikom *plitke* konvekcije nastaju slabo razvijeni kumulusi koji ne daju oborinu, dok se tijekom *duboke* konvekcije razvijaju kumulonimbusi.

Konvektivni fenomeni dugo su fokus meteoroloških istraživanja. U razdoblju nakon drugog svjetskog rata objavljeno je nekoliko knjiga (npr. Byers i Braham, 1949.) koje su predstavljale sveobuhvatnu sliku grmljavinskih oluja koja je tada bila poznata. Tijekom narednih godina izrađene su razne studije koje (i) klasificiraju inzenzitet konvekcije pomoću različitih ljestvica, (ii) opisuju termodinamičke uzroke nastanka te ukazuju na mogućnost njihove numeričke prognoze (Cotton *et al.*, 2010.).

U literaturi (Plant *et al.*, 2016.) navode se tri glavna uzroka konvekcije:

- sila uzgona koja uzrokuje slobodnu konvekciju,
- konvergencija koja uzrokuje prisilnu konvekciju,
- vertikalno smicanje vjetra koje može imati dodatnu ulogu u stvaranju organiziranih grmljavinskih oluja.

Postoji nekoliko faza konvektivnog razvoja. Prvu fazu, koja se naziva termička faza, pokreće sila uzgona. Njen izgled i snaga ovise o više parametara među kojima su: vremenski uvjeti, površinski albedo i vrsta tla. Tijekom ove faze, slobodna atmosfera se suprostavlja suhoj konvekciji jer njena temperatura sporije opada s visinom, nego prilikom adijabatičkog hlađenja. Kako se čest zrak podiže, dolazi do njenog zasićenja i započinje kondenzacija koja na visini uzrokuje pojavu oblaka *kumulus humilis*. Visina na kojoj započinje kondenzacija naziva se nivo kondenzacije česti (engl. *lifting condensation level*, LCL). Iznad ove visine, dolazi do zagrijavanja česti zraka latentnom toplinom koja se oslobađa prilikom kondenzacije. Stopa ohlađivanja zasićene česti zraka je tada manja od suhoadijabatičke stope ohlađivanja. Ovaj proces se može opisati tzv pseudoadijabatičkim procesom. Visina na kojoj uzdižuća čest postaje toplija od okoliša naziva se nivo slobodne konvekcije (engl. *level of free convection*, LFC). Dosezanje LFC-a predstavlja drugu fazu konvektivnog razvoja koja se naziva *kumulusna faza*. Ona ovisi o početnoj kinetičkoj energiji dobivenoj iz prve faze, vertikalnom temperaturnom gradijentu i sadržaju vodene pare u zraku koji se podiže. Vertikalni temperaturni gradijent ovisi o vremenskoj situaciji, a što je veća brzina hlađenja, veća je šansa da će doći do prijelaza iz prve u drugu fazu. Nakon kumulusne, slijedi faza *kumulus congestus* tijekom koje je čest zrak toplija od temperature okoliša. Kako bi se zadržalo ovo stanje

dolazi do kontinuirane kondenzacije koja osigurava otpuštanje latentne topline. Tijekom ove faze ni struktura "tornja" *kumulus congestusa* ni proces kondenzacije nisu homogeni. Prilikom ubrzavanja zagrijane česti, može doći do prodiranja hladnijeg zraka u oblak turbulentnim miješanjem koje hladi unutarnju temperaturu česti. Ova pojava se naziva uvlačenje zraka. Zbog ovog procesa, smanjuje se uzgon i dolazi do usporavanja česti. Istovremeno, dodatno hlađenje potiče dodatnu kondenzaciju, a samim time i dodatno oslobađanje latentne topline koja iznova zagrijava čest. Tijekom ovog procesa javljaju se karakteristični oblici kupola i pramenova na oblacima, a moguće je i stvaranje povoljnih uvjeta za pojavu munja. Ukoliko se stvore ti uvjeti dolazi do prijelaza u završnu fazu konvektivnog razvoja - fazu kumulonimbusa.

1.2 Kumulonimbus

Kumulonimbus (Cb) (lat. *cumulus*: gomila i *nimbus*: kiša), je gust i krupan oblak značajnog vertikalnog razvoja. Njegov gornji dio je barem djelomično gladak, vlaknast ili prugast i gotovo uvijek plosnat. Ovaj dio se često širi u obliku nakovnja ili velike perjanice (*incus*). Pod tamnom podnicom ovog oblaka često se javljaju niski čupavi oblaci spojeni s njom ili u obliku *virge* (WMO, 1975.). Osim vertikalnih, Cb imaju značajne horizontalne dimenzije pa ga se u cjelini vidi tek iz daljine. Ukoliko se promatrač nalazi ispod njega može ga razaznati po vrlo tamnoj podnici, grmljavini, pljuskovima i tući budući da se ove pojave javljaju jedino u ovom oblaku. Prema obliku razlikujemo dvije vrste Cb (slika 1.1):

- *Kumulonimbus capillatus* (Cb cap),
- *Kumulonimbus calvus* (Cb cal).

Ove dvije vrste se razlikuju po obliku gornjih dijelova: kod Cb cap (slika 1.1a) su vlaknaste ili prugaste strukture, često u obliku nakovnja, a kod Cb cal (slika 1.1b) su ti dijelovi nejasni i spljošteni te imaju izgled bjelkaste mase bez oštih kontura (WMO, 1975.).

Cb oblaci igraju važnu ulogu u globalnoj energetici i općoj cirkulaciji atmosfere učinkovito prenoseći vlagu te senzibilnu i latentnu toplinu u gornje dijelove troposfere i donju stratosferu. Utječu na radijacijske proračune troposfere, na kvalitetu troposferskog zraka i kemiju oborina.

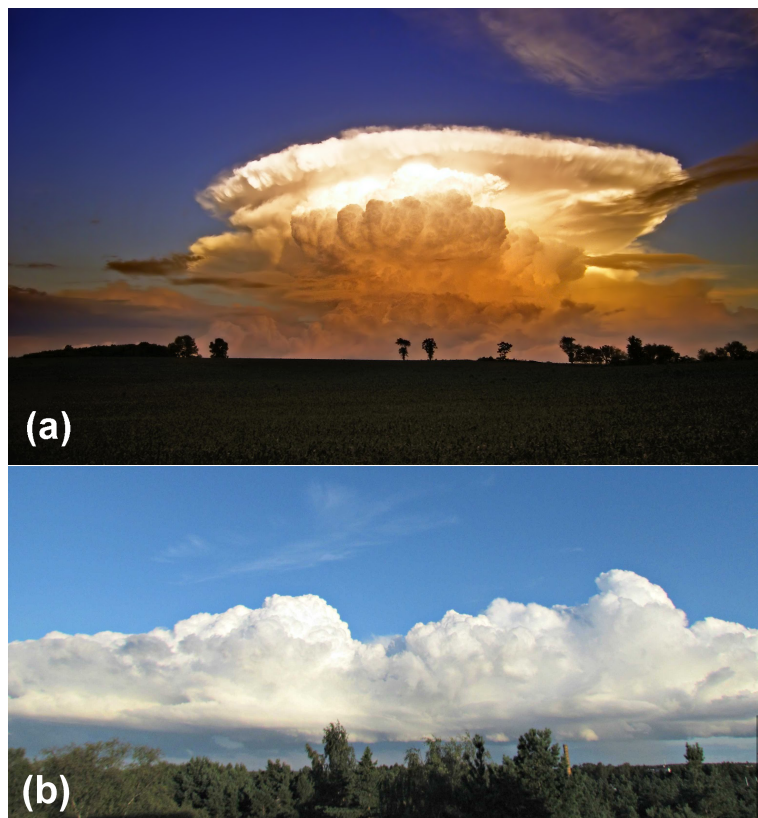
Osnova Cb je ćelija (Byers i Braham, 1949.), aktivni centar koji radar prepoznaje/identificira kao područje intenzivne oborine ili lokalni maksimum reflektivnosti radarskog odraza. Životni ciklus svake ćelije se sastoji od tri faze (Byers i Braham 1949.):

- kumulusna faza,
- zrela faza,
- faza rasipanja.

Prikaz ovih faza dan je na slici 1.2.

Fazu kumulusa karakterizira jedan ili više oblaka kumulusa u obliku tornjeva koji opstaju zahvaljujući konvergenciji vlažnog zraka nižih slojeva (slika 1.2a). Tijekom

ove faze uzlazno strujanje zauzima gotovo cijelu ćeliju, a u gornjem dijelu kumulusa se može stvoriti oborina. Spajanje kumulusnih elemenata u konvektivni sustav većih razmjera predstavlja prijelaz u zrelu fazu (slika 1.2b) koju karakteriziraju i uzlazna i silazna strujanja. Uzlazna strujanja se mogu protezati duž cijele troposfere, a njihova divergencija u podnožju tropopauze rezultira stvaranjem nakovnja. Uz nakovanj, često se javlja i kupola oblaka (zbog jakih vertikalnih gibanja) koja se može probiti do sloja stabilne stratosfere. S druge strane, divergencija silaznog strujanja zraka (ohladenog isparavanjem i topljenjem oborine) stvara frontu udara vjetra. Fronta forsira uzdizanje toplog i vlažnog zraka omogućujući razvoj novih kumulusa. Tijekom ove faze javljaju se jaki lokalizirani pljuskovi. Fazu rasipanja (slika 1.2c) karakterizira dominacija silaznog i slabljenje uzlaznog strujanja, jer se fronta udara vjetra udaljava od oblaka. Tijekom ove faze dominira lagana i kontinuirana oborina.



Slika 1.1: Prikaz vrsta Kumulonimbusa. (a) Prikaz oblaka *Kumulonimbus capillatus*¹. (b) Prikaz oblaka *Kumulonimbus calvus*².

Ovisno o broju ćelija razlikujemo:

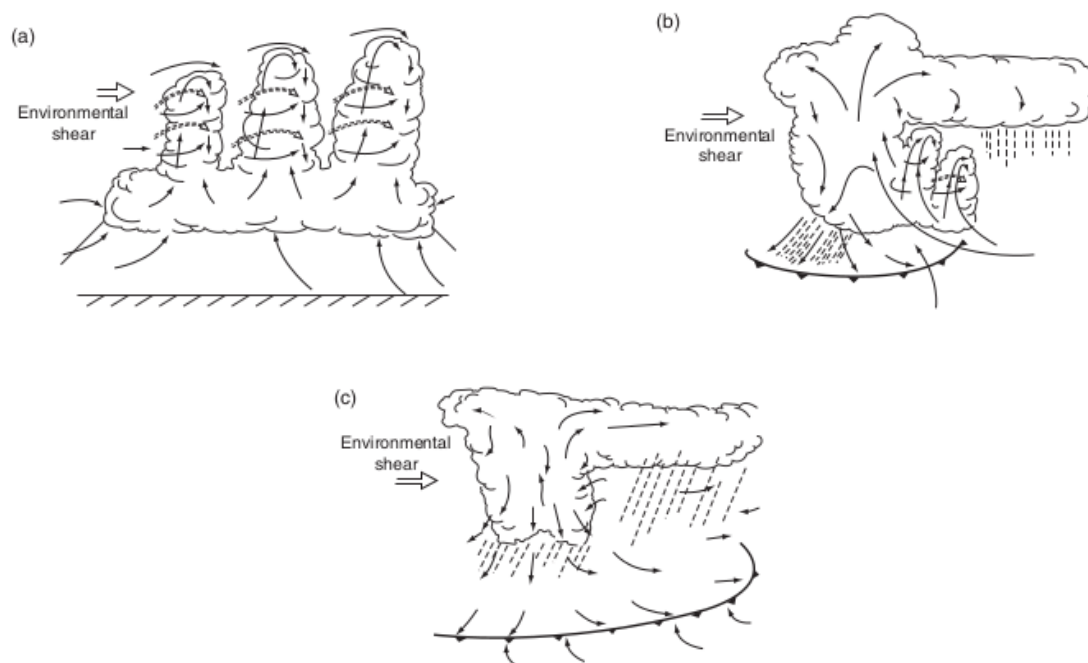
- jednoćelijske Cb,
- multićelijske Cb,
- superćelijske Cb.

Jednoćelijske Cb karakterizira slabo vertikalno smicanje vjetra (<10 m/s) u donja 4 km atmosfere. Kao posljedica uzlazna struja se proteže vertikalno uvis tijekom životnog

¹Izvor fotografije: <https://www.simply-selma.com/2012/09/clouds-101-cumulonimbus-capillatus-incus.html>

²Izvor fotograije: <https://cloudatlas.wmo.int/species-cumulonimbus-calvus-cb-cal.html>

ciklusa ćelije. Kod takve strukture silazna strujanja tj. istjecanje hladnog stabilnog zraka slabi uzlaznu struju nestabilnog toplog zraka te započinje odumiranje olujnog oblaka. Zbog relativno kratkog životnog vijeka (~ 30 min) i malih horizontalnih dimenzija (~ 10 km) ekstremne vremenske prilike kod jednoćelijskih oluja su vrlo rijetke, a uglavnom se javlja umjereni pljusak u trajanju od ~ 10 minuta.



Slika 1.2: Shematski prikaz životnog ciklusa kumulonimbusa. (a) *Kumulusnu fazu* karakterizira jedna ili više kula koje se hrane konvergencijom vlažnog zraka. (b) *Zrelu fazu* karakteriziraju uzlazna i silazna strujanja te razvoj oborine i oblika nakovnja. (c) *Fazu rasipanja* karakterizira dominacija silaznog strujanja Izvor: Cotton *et al.* (2010.)

Multićelijske Cb karakterizira umjereni jako vertikalno smicanje vjetra (~ 10 - 20 m/s) u donja 4 km atmosfere. Sastavljeni su od više jediničnih Cb u različitim fazama razvoja, a sumarno traju 6-10 sati. Vrlo često uzrokuju jake pljuskove u trajanju od nekoliko sati, pa posljedično može doći i do lokalnih poplava. Njihov dulji životni vijek omogućava nastanak i rast zrna tuče, kao i stvaranje silazne struje koja pri tlu može rezultirati jakim vjetrom s olujnim i orkanskim udarima (npr. Betz *et al.*, 2008.). Ukoliko se spoji više multićelijskih Cb može doći do stvaranja olujne mezoskalne fronte, s izuzetno jakim horizontalnim smicanjem vjetra, grmljavinom i jakim pljuskovima. Takve olujne formacije često se nazivaju olujnim prugama (engl. *squall-line*). Češće se javljaju u toplom sektoru ciklone, a rezultat su uzgonsko-inercijske nestabilnosti. Njihove horizontalne dimenzije su ~ 100 km, a traju od nekoliko sati do nekoliko dana.

U nekim slučajevima multićelijski Cb prerasta u superćelijski (npr. Vasiloff *et al.*, 1986.). Superćelijske Cb karakterizira jako vertikalno smicanje vjetra (> 20 m/s). Posljedično uzlazna struja je nagnuta s visinom pa ne dolazi do raspada superćelije zbog silazne struje u obliku oborine, odnosno uspostavlja se kvazi-stacionarno stanje oluje. Superćelijski Cb su jedini konvektivni oblaci koji razvijaju vlastitu rotaciju i nerijetko prelaze u mezoskalnu cirkulaciju. U određenim uvjetima može doći do tornadogeneze, a najčešći znak za to je karakteristični oblik "kuke" vidljive u polju brzina na temelju odraza Doppler radara. Superćelije možemo svrstati u tri kategorije (Doswell *et al.*,

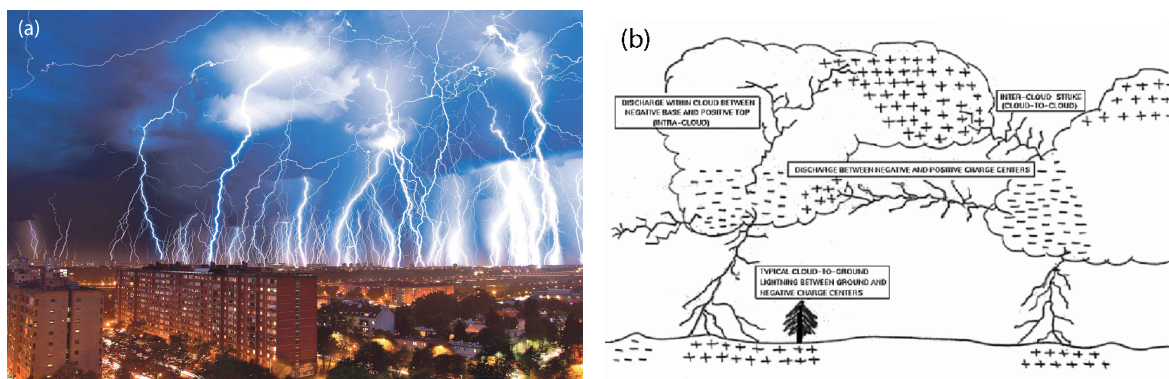
1990.):

- klasične superćelije,
- slabo oborinske superćelije (engl. *low precipitation supercells*, LP),
- jako oborinske superćelije (engl. *high-precipitation supercells*, HP).

S klasičnim superćelijama se često povezuje: umjerena oborina, tuča velikih razmjera, tornada, jaki udari vjetra. LP su manje od klasičnih, a njima se povezuje mala količina kiše, ali česta pojava velike i jake tuče te povremena pojava tornada. HP su veće od klasičnih superćelija i često se povezuju sa silovitom kišom i jakom tučom koja proizvodi veliku štetu, a tornada se javljaju zajedno s mezociklonom ili uz rub fronte.

1.3 Munje

Munja (slika 1.3a) je prirodno elektrostatičko pražnjenje tijekom kojeg se dva električki nabijena područja u atmosferi ili tlu privremeno izjednačuju, uzrokujući trenutno oslobađanje velike količine energije. Električni naboji u Cb-u se induciraju na elementima oblaka (jezgre kondenzacije, jezgre sublimacije, kapi kiše, ledene čestice i kristali) koji se zbog smicanja vjetra gibaju i sudaraju. Prilikom sudara nastaju lagane, pozitivno nabijene čestice koje vjetar nosi prema vrhu oblaka, a teže, negativno nabijene čestice padaju na dno Cb-a (slika 1.3b). Smatra se da postoji i malo područje pozitivnog naboja koje se nalazi pri dnu oblaka (Uman, 2001.).



Slika 1.3: (a) Pojava munja nad Zagrebom³. (b) Shematski prikaz raspodjele električnog naboja u oblaku pomoću jednostavnog dvoslojnog modela i nastanka munja oblak-tlo i oblak-oblak⁴.

Zbog turbulencije unutar samog oblaka, dolazi do pomicanja pojedinih čestica i područja istoimenog naboja što uzrokuje promjene jakosti električnog polja. Kada vrijednost električnog polja prijeđe kritičnu vrijednost od 1 MV/m, zrak prestaje biti dostatan izolator i dolazi do izbijanja električnog naboja (munje) koje se može dogoditi u više smjerova; (i) unutar istog oblaka (kada su područja naboja slične jačine), (ii) prema drugom oblaku, (iii) prema okolnom zraku ili (iv) prema tlu (Uman, 2001.).

³Izvor: <https://static.jutarnji.hr/images/live-multimedia/binary/2019/6/17/19/guu.jpg>

⁴Izvor: <https://www.researchgate.net/profile/AtaHussain/publication/266289213/figure/fig2/AS:667716339896325@1536207389262/Electric-charges-in-a-cumulonimbus-cloud-and-Intra-cloud-inter-cloud-cloud-to-ground.png>

Na Zemlji je frekvencija munja otprilike 44 ± 5 puta u sekundi, ili gotovo 1,4 milijarde bljeskova godišnje (Oliver, 2005.). Prosječni životni vijek munje je oko 0,2 sekunde, a on je sastavljen od većeg broja kraćih bljeskova (udara) koji traju oko 60 do 70 mikrosekundi⁵.

Iako su munje unutar istog oblaka i oblak-oblak učestalije, većina istraživanja se provela za munje oblak-tlo. Razlog tome je opasnost koju predstavljaju za ljudski život i njihovu imovinu. Naime, munje oblak-tlo su među glavnim uzročnicima smrtnosti povezane s vremenskim pojavama. Primjerice, u Sjedinjenim Državama neke studije (Ashley i Gilson, 2009.) tvrde da godišnje, više ljudi umre od posljedica udara munje, nego od tornada, uragana i snažnog vjetra. Jedino poplave odnesu više života (Curran *et al.*, 2000.). Munje se klasificiraju u četiri kategorije na temelju polariteta naboja koji se prenosi prema tlu. Razlikujemo: (i) silaznu negativnu munju, (ii) uzlaznu negativnu munju, (iii) silaznu pozitivnu munju i (iv) uzlaznu pozitivnu munju. Smatra se da oko 90% svih oblak-tlo munja pripada kategoriji (i) (Baba i Rakov, 2009.).

1.4 Tuča

Tuča (grad) je kruta oborina od ledenih čestica koje mogu biti prozirne, djelomično ili potpuno neprozirne. Obično su sferičnog, stožastog ili nepravilnog oblika s promjerom od 5 do 50 mm (WMO, 1992.), a u ekstremnim uvjetima promjer može biti i nekoliko desetaka centimetara.



Slika 1.4: Prikaz tuče⁶.

Tuča nastaje u olujama s dubokom konvekcijom, a na sami nastanak i veličinu tuče utječu brojni fizikalni procesi i parametri, kao što su: jaka konvektivna nestabilnost, velika količina vlage u prizemnim slojevima atmosfere i jako smicanje vjetra (npr. Newton, 1963.). Dodatno, na nastanak zrna tuče značajan utjecaj ima i koncentracija ledenih jezgi, jezgri kondenzacije te veličina čestica aerosola u oblaku (Danielsen, 1977.).

⁵<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/lightning2.html>

⁶Izvor: <https://images.app.goo.gl/P28eiB266nsNVzMX8>

Zrno tuče započinje svoj razvoj kao kapljica vode. Vertikalno smicanje podiže kapljice u gornje dijelove Cb-a (koji se nalaze na temperaturama između -50°C i -60°C). Zbog niske temperature kapljice postaju superohlađene, a do zamrzavanja će doći ukoliko kapljice dođu u kontakt s jezgrama kristalizacije. Daljnji rast tuče najznačajniji je u dijelovima Cb-a s temperaturama između -10°C i -25°C , a rezultat je sudara i spajanja čestica leda i superohlađenih kapljica vode.

Postoje dva načina rasta tuče, vlažni i suhi rast, koji proizvode "slojeviti izgled" tuče. Prilikom vlažnog rasta, jezgra tuče se nalazi u dijelu oblaka u kojem je temperatura zraka ispod ledišta, ali još uvijek nije jako niska. Nakon sudara sa superohlađenom kapljicom voda se ne smrzava odmah oko jezgre. Umjesto toga, tekuća voda se razlijeva preko jezgre tuče i polako se smrzava. Budući da je proces spor, mjehurići zraka mogu pobjeći što rezultira slojem prozirnog leda.

Prilikom suhog rasta, temperatura zraka je znatno ispod temperature smrzavanja, a kapljica vode se odmah smrzava prilikom sudara s jezgrom. Mjehurići zraka "zamrzavaju" se na mjestu, ostavljajući zamagljeni sloj leda.

Na ovaj način zrno tuče povećava svoju gustoću sve dok zrna tuče ne postanu prevelika i nadvladavaju vertikalno smicanje/uzdizanje. To rezultira padom tuče na zemlju. Prilikom pada iz oblaka zrna tuče se počinju topiti u donjim dijelovima oblaka gdje je temperatura viša od 0°C . Ako zrno tuče pada kroz područje uzlaznog gibanja može doći do znatnog otapanja unutar samog oblaka. Ako zrno tuče pada iz područja silaznog strujanja zraka pada većom brzinom pa ima manje dostupnog vremena za otapanje.

1.5 Istraživanje tuče u svijetu

Meteorolozi i klimatolozi koriste podatke o frekvenciji, karakteristikama i intenzitetu tuče kako bi unaprijedili svoje znanje o atmosferskim procesima i uvjetima koji dovode do stvaranja tuče.

Uz znanstvenu znatiželju, postoji i značajan ekonomski aspekt za istraživanje tuče. Razlog tomu je velika materijalna šteta koju tuča nanosi u ruralnim i urbanim sredinama (Počakal, 2012.). Tako je npr. 18.05.2000. tuča u Chicago (Illinois, SAD) prouzročila štetu u iznosu 572 milijuna dolara, a u Sofiji (Bugarska) 08.07.2014. u iznosu od 51 milijun eura⁷.

Stoga ne čudi da ljudi već stoljećima pokušavaju pronaći načine obrane od tuče. Tako su u 18. stoljeću Europljani pokušali spriječiti tuču pucanjem topova u oblake. U 20. stoljeću Amerikanci i Rusi su započeli s metodom zasijavanja oblaka (dodavanje kemijskih čestica (srebrnog jodida) u oblak uz pomoć raketa i zrakoplova).

Tučom najčešće pogođena područja nalaze se u umjerenim geografskim širinama. Na južnoj hemisferi su to područja Argentine, južne Afrike, Australije i Novog Zelanda. Na sjevernoj hemisferi su to područja južne Kanade, SAD-a i sjevernog Meksika. U Europi se tuča najčešće bilježi između 30° i 50° N; od Iberskog poluotoka preko srednje

⁷Izvor: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_costly_or_deadly_hailstorms

Europe do Kavkaza te u istim geografskim širinama sve do Kine (Počakal, 2012.). Pojava tuče je moguća i u višim geografskim širinama. Klimatologija tuče za Finsku (Tuovinen *et al.*, 2009.) je pokazala da je zabilježeno u prosjeku 10 slučajeva jake tuče tijekom 5 dana s jakom tučom zadnjih 10-ak godina.

Podaci o tuči mogu se dobiti iz više izvora: (i) iz novina i medija (npr. Tuovinen *et al.*, 2009.), (ii) iz podataka osiguravajućih kuća o šteti koju je tuča nanijela, (iii) iz sustava obrane od tuče i/ili sa standardnih meteoroloških postaja, odnosno (iv) iz podataka daljinskih mjerenja radara i satelita. U današnje vrijeme, ove informacije se objedinjuju s opažanjima posebno istreniranih promatrača oluja te se unose u archive poput baze podataka o opasnim olujama u Europi (ESWD – European Severe Weather Database⁸; Dotzek *et al.*, 2009.) od 2006. Koriste se i statistički i numerički modeli za procjenu/prognozu učestalosti tuče (npr. Púčik *et al.*, 2019.).

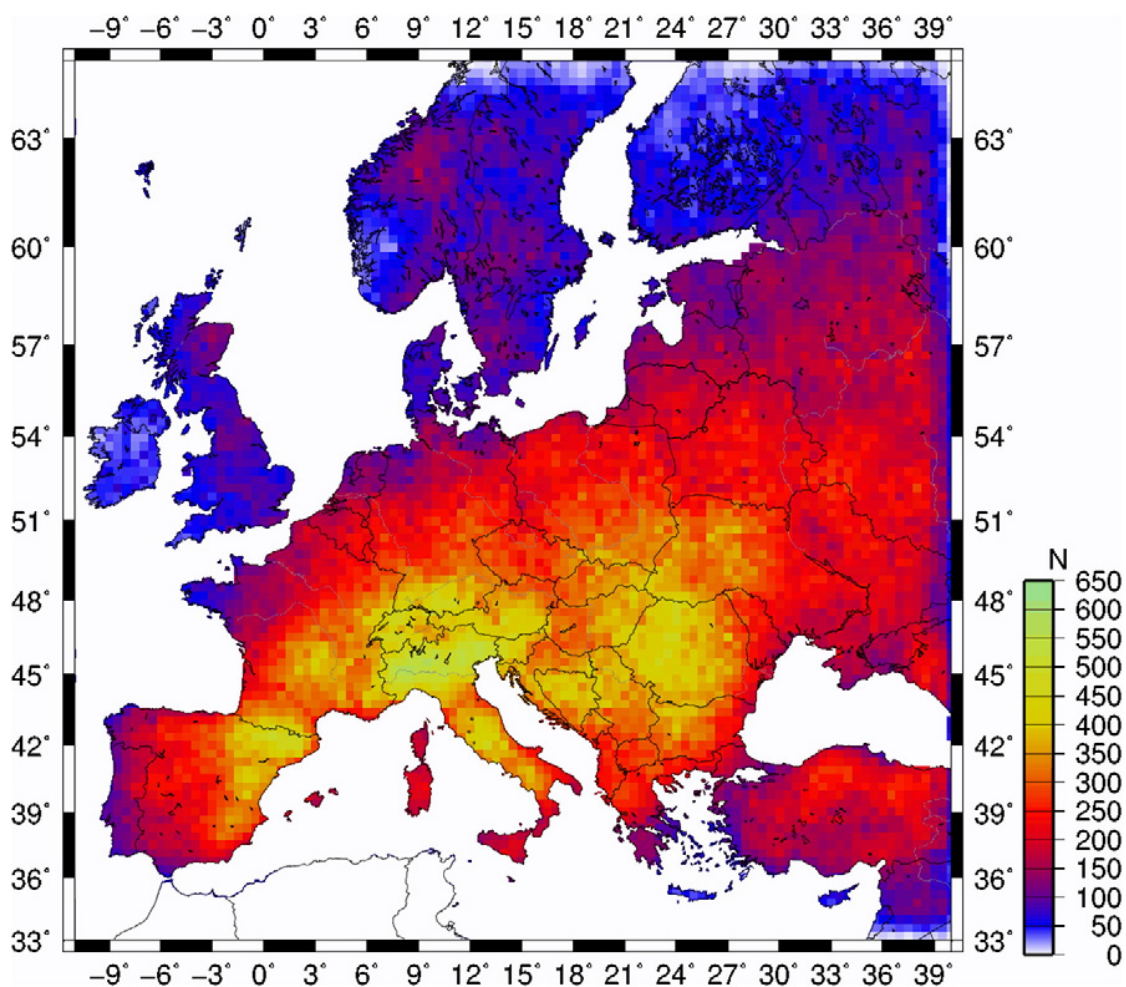
Unatoč tome, mjerenja/opažanja tuče su još uvijek opterećena nedostatkom široko rasprostranjenih, standardiziranih i operativnih sustava za promatranje uz geografsku pristranost prema gusto naseljenim područjima. Dodatno, pogreške u točnosti informacija otežavaju točno određivanje područja koja su pod utjecajem jakih grmljavinskih oluja i tuče. Naime, postoji vjerojatnost da motritelj prilikom vizualne procjene zrna može sugradicu ili ledenu kišu označiti kao tuču. Signali za tuču se procjenjuju iz radarske reflektivnosti iznad određenog praga (npr. Stržinar i Skok, 2018.) koji mora imati potvrdu u drugim meteorološkim podacima (npr. Auer, 1994.), a satelitska mjerenja indirektno ukazuju na pojavu tuče temeljem temperature vrha oblaka i detekcije vrhova oblaka koji su povezani s jakom konvekcijom (npr. Mikuš Jurković *et al.*, 2015.). Stoga se još uvijek koriste indeksi nestabilnosti kao mjera pred-konvektivnih uvjeta i pojave tuče u kombinaciji s različitim meteorološkim parametrima (npr. Taszarek *et al.*, 2018.). Oni prikazuju uvjete okoliša povoljne za grmljavinske oluje. Odnos između tih parametara i produkata konvekcije (munje, tuča, jaki udari vjetra) omogućuje njihovu primjenu u određivanju vjerojatnosti/prognoze pojave različitih vremenskih događaja. Tako se smatra da je pojava duboke konvekcije, odnosno pojava munja izrazito korelirana s indeksima nestabilnosti kao što su konvektivna raspoloživa potencijalna energija (engl. CAPE) iznad 400 J/kg i konvektivna inhibicija (CIN) ispod -50 J/kg (Taszarek *et al.*, 2018.).

Na slici 1.5 prikazana je procjena učestalosti tuče u državama Europe.

Središnja Europa je izložena opasnosti od tuče, osobito Njemačka, Švicarska i Austrija, gdje su dostupna opsežna istraživanja o frekvenciji tuče. Može se pretpostaviti da se frekvencija tuče smanjuje od zapada prema istoku i od juga do sjevera. Kontinentalnost je jedan od glavnih faktora učestalosti tuče, jer dovodi do nižeg sadržaja vlage i manje frontalnih sustava, a time i do manje povoljnih uvjeta za konvekciju (Punge i Kunz, 2016.). Učestalost tuče se povećava u predalpskom području Švicarske, Austrije i Slovenije. No, u središnjim Alpama (područje između najvećih vrhova), velika tuča je rijetka pojava (Punge *et al.*, 2014.).

Učestalost olujnih nevremena s tučom se u istočnom dijelu središnje Europe (Češka, Poljska, Slovačka i Mađarska) se povećava zbog orografije (Punge *et al.*, 2014.).

⁸Izvor: <https://www.eswd.eu/>



Slika 1.5: Prikaz procjenjene učestalosti tuče u državama Europe (Izvor: Punge i Kunz, 2016.).

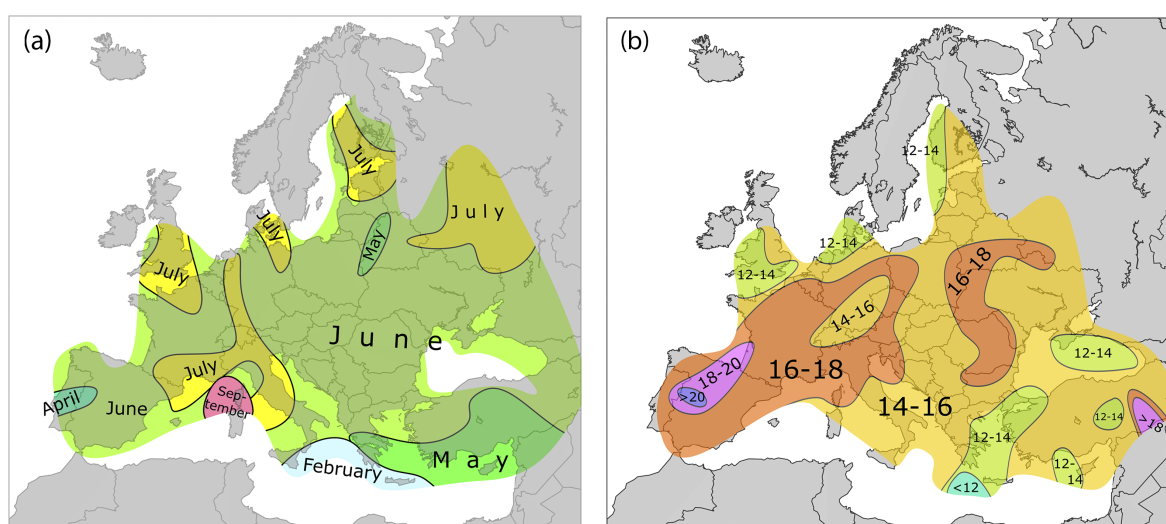
Na učestalost tuče u zapadnoj Europi glavni utjecaj ima blizina Atlanskog oceana koji povećava statičku stabilnost zbog smanjenog dnevnog i sezonskog hoda temperature. Stoga, dok je Francuska često pogodena jakom tučom, zemlje Beneluxa (Belgija, Nizozemska i Luksemburg) i Britanski otoci su pošteđeni takvih nevremena, odnosno pojava jake tuče je rijetka. Potonje regije karakterizira učestalost sustava niskog tlaka zraka i fronti što dovodi do čestih pojava sugradice i male tuče.

Klimom južne Europe, uključujući Italiju i Iberijski poluotok, dominira velika insolacija i blizina Sredozemlja, gdje su tople i vlažne zračne mase advektirane iz smjera juga prema zapadu. Nekoliko regija, poput sjeverne Italije, bilježe najveću učestalost tuče u Europi (npr. Punge *et al.*, 2014.). Osim Italije, značajne ekonomske štete zbog učestalosti jake tuče, trpi i Španjolska. U Portugalu tuča je češća na sjeveru Portugala tijekom zime i proljeća, s maksimumom u travnju (Santos i Belo-Pereira, 2018.).

U Jugoistočnoj Europi (uključujući zemlje Rumunjske, Moldavije, Bugarske, Grčke, Turske, Cipra i one na Balkanskom poluotoku) tuča se učestalo javlja u nekoliko žarišta, npr. Rumunjskoj (Punge i Kunz, 2016.). Osim sjevero-zapadne Rumunjske, Bugarska je izuzetno izložena tuči s prosjekom od 65 dana s tučom po godini. Sjeverna Makedonija, prema radarskim podacima za razdoblje 1977.-1982., ima prosjek od 50 dana s tučom u godini dana. Nasuprot ostalim zemljama na jugoistoku Europe, Grčka bilježi rijetke

dogadaje tuče, osobito na jugu zemlje, barem prema ograničenim mjerenjima tuče na meteorološkim stanicama, što također može uključivati ledenu kišu i sugradicu.

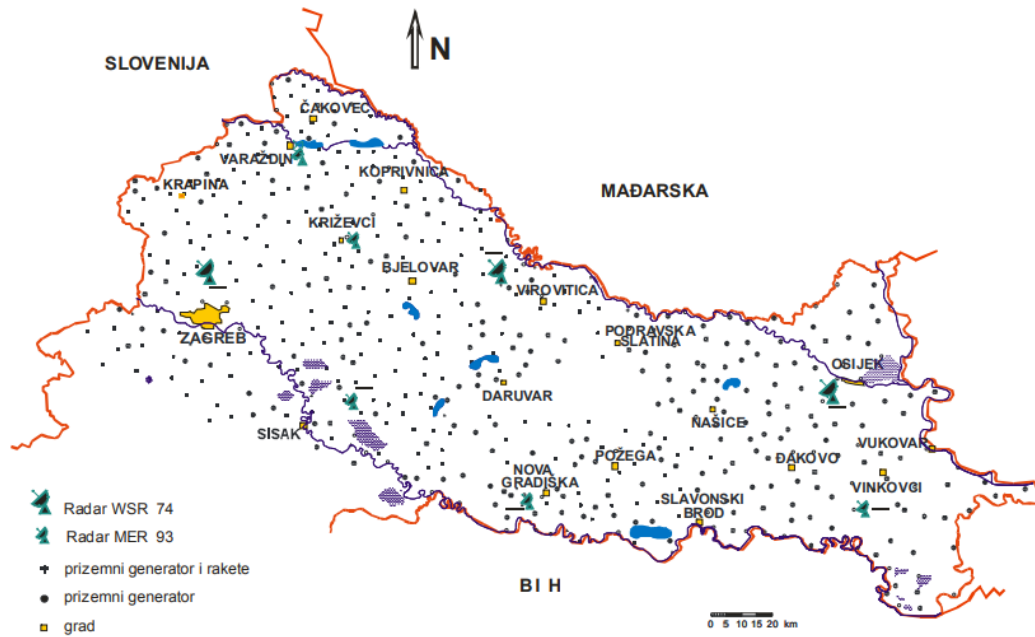
Treba naglasiti da je pojava tuče dominantna pojava tijekom toplog dijela godine (lipanj-srpanj, slika 1.6a) u višim geografskim širinama ($> 46^\circ$ N). Nasuprot tome prema jugu sezonski ljetni karakter pojave tuče slabi te postaje pojava koja se bilježi relativno učestalo i u drugim mjesecima; npr. u rujnu na Korzici, veljača iznad Krete i Jonskog mora ili u svibnju nad južnom Grčkom, Ciprom i južnom Turskom. Zanimljivo je da se godišnji hod velike tuče ne podudara s godišnjim hodom tornada iako oba spadaju u produkte duboke konvekcije. Iznad Sredozemlja, tornada se najčešće bilježe između kolovoza i listopada dok se tuča opaža uobičajeno od svibnja do lipnja (Antonescu *et al.*, 2016.; Púčik *et al.*, 2019.). Tijekom dana velika tuča se obično događa u popodnevним satima između 14-18 h po lokalnom vremenu; ipak ranije u istočnoj Europi od zapadne Europe (slika 1.6b). Slično su ukazali i rezultati studije Punge i Kunz (2016.).



Slika 1.6: (a) Prikaz mjeseca u kojem se tuča promjera > 2 cm najčešće pojavljuje te (b) dominantan period u danu kada se opaža tuča promjera > 2 cm. Rezultati su prikazani na mreži točaka s udaljenošću od $2^\circ \times 2^\circ$, a mrežne točke s 5 događaja i manje su izostavljene (Izvor: Púčik *et al.*, 2019.).

1.5.1 Istraživanje tuče u Hrvatskoj

Hrvatska se nalazi u području koje je, naročito u ljetnim mjesecima, izloženo čestim pojavama grmljavinskih oluja s tučom (slika 1.5). Tuča se mjeri na standardnim meteorološkim postajama (sinoptičkim i klimatološkim) pomoću tučomjera, najčešće na lansirnim postajama obrane od tuče postavljenih u Panonskoj nizini. Razlika u opažanjima između standardnih i lansirnih postaja javlja se u količini informacija o intenzitetu i fizičkim obilježjima tuče. Obično su dostupna tri podatka; (i) broj dana s tučom, (ii) opisno procijenjena veličina zrna tuče tijekom usporedbe s dimenzijama drugih poznatih predmeta (npr. grašak, lješnjak, orah, jaje) te (iii) broj zrna koji se opisuje kao gusta ili rijetka pojava (Počakal, 2012.). Više informacija o obilježjima tuče moguće je dobiti s lansirnih postaja (od 2001. godine u kontinentalnom dijelu) ili poligona (uspostavljenog 2002. godine u Hrvatskom zagorju, slika 1.7). Zbog količine dostupnih mjerenja, većina analiza podataka o tuči rađena je za kontinentalni dio Hrvatske (npr. Mikuš Jurković *et al.*, 2015.; Počakal *et al.*, 2018.) te do sada ne postoji nacionalna klimatologija tuče.



Slika 1.7: Karta lokacija tučomjera u kontinentalnom dijelu Hrvatske (crne točke), te položajima radara (Izvor: Počkal, 2012.).

Znanstvena istraživanja tuče dobivena s tučomjera u kontinentalnoj Hrvatskoj pokazala su da je u razdoblju od 2002. do 2009. godine došlo do povećanja srednjeg broja dana s grmljavinom (81) i tučom (41) u usporedbi s razdobljem od 1981. do 2001. godine (s grmljavinom 76 i tučom 34) (Počkal, 2012.). Također, uočeno je da se najintenzivnija i najučestalija tuča javlja u lipnju, kada su nestabilnost atmosfere i konvektivna aktivnost najveće (Mikuš *et al.*, 2012.), na području između Mure, Drave i Save (Počkal, 2012.).

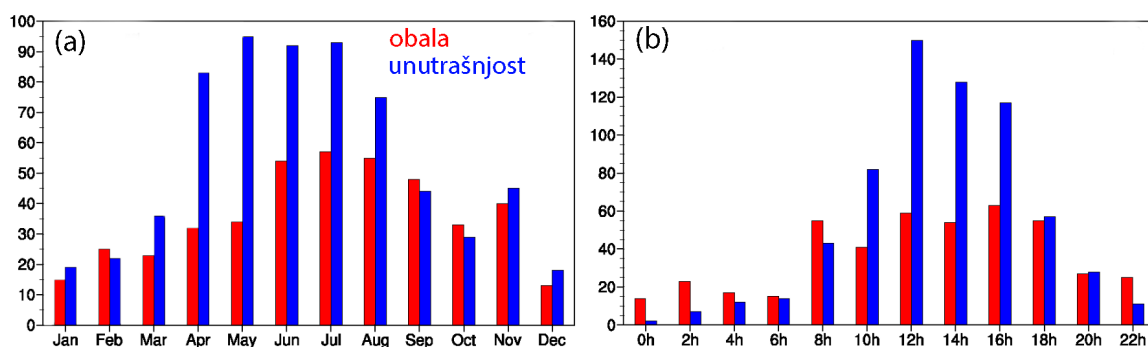
Prosječna dužina padanja tuče u Hrvatskoj iznosi 4.2 min, dok je na poligonu zabilježen slični uzlazni trend ali s dužim vremenskim intervalom od 6.5 min. Najvjerojatniji razlog duljem padanju tuče na poligonu u usporedbi s cjelokupnim područjem Hrvatske je utjecaj orografije na smjer i brzinu gibanja Cb ćelija, tj. dolazi do usporavanja ili stagnacije ćelija ispred planina ovisno o njezinom smjeru nailaska (Počkal, 2012.).

U sjeverozapadnoj Hrvatskoj, u razdoblju od 2002. do 2015. godine, 509 tučomjera zabilježilo je tuču na poligonu u Hrvatskom zagorju sa srednjim promjerom zrna od 8.2 mm i kinetičkom energijom od 28.6 J/m². Analiza promjera zrna tuče pokazuje da je 95.7 % svih zrna imalo promjer u intervalu 5.0-15.0 mm. Također, zabilježen je i negativni trend zrna tuče najmanjeg promjera (5.0-7.5 mm) te pozitivni trend zrna promjera 7.6-15.0 mm. To je moguće posljedica većih ili/i jačih uzlaznih struja i intenzivnijih grmljavinskih ćelija.

1.6 Motivacija i ciljevi

Konvekcija, odnosno tuča, u obalnom dijelu istražuje se pojačano tek zadnjih desetak godina. Nedavna istraživanja su vezana uz dostupnost mjerenja o munjama (od 2008. godine), izradi baze podataka o pijavicama (npr. Renko *et al.*, 2016.) te uz

dva projekta: (i) nedavno završeni projekt VITCLIC⁹ (2017.-2019.) tijekom kojeg je postavljen poligon tučomjera u Istri i (ii) trenutno aktivnog SWALDRIC-a¹⁰ u kojem se izrađuje klimatologija tuče uz jadransku obalu. Naš najveći poluotok Istra ima povećanu konvektivnu aktivnost (npr. Mikuš *et al.*, 2012.; Punge *et al.*, 2014.) osobito neki njeni djelovi (vrlo često linija Poreč-Pazin-Buje; Paškvan, 1955.). Tako npr. istočna obala Istre ima smanjenu vjerojatnost nastanka tuče zbog utjecaja planinskog lanca, a zapadna obala i središnji dio bilježe učestale pojave tuče. Ravni kotari u zaleđu Zadra i šireg područja Dubrovnika također predstavljaju vrlo konvektivno aktivne lokacije (Penzar *et al.*, 2001.).



Slika 1.8: Kumulativni broj događaja tuče (1948.-2017.) prikazanih kao mjesečne sume odvojeno za postaje uz obalu (crveno) od podataka za postaje u unutrašnjosti (plavo); (a) godišnji hod i (b) usrednjeni dnevni hod (Izvor: Jelić *et al.*, 2020).

Kao rezultat projekata nedavno je izrađena klimatologija tuče u Istri koristeći podatke o tuči s 35 meteoroloških postaja koji su omogućili izdvajanje baze od 1548 događaja tuče u 951 dan kroz razdoblje od 1948. do 2017. Na slici 1.8 su prikazani godišnji i dnevni hodovi dana i događaja s tučom za dvije skupine postaja (za detalje pogledati Jelić *et al.*, 2020.); onih obalnih sa zapadne obale Istre i onih smještenih u njejoj unutrašnjosti. Godišnji hod (slika 1.8a) pokazuje pojavu tuče tijekom cijele godine s očekivanim porastom pojave tuče tijekom toplijeg dijela godine (osobito ljeti) u oba skupa podataka. Međutim, kopneno područje (plavo) pokazuje nagli porast aktivnosti tuče početkom travnja koja traje do kolovoza, dok zapadna obala (crveno) pokazuje umjereniji porast tijekom proljetnih mjeseci i maksimum u srpnju. Oba skupa podataka pokazuju sekundarni maksimum u studenom. U dnevnom hodu unutrašnjosti Istre (plavo, slika 1.8b) uočava se tipičan hod za kontinentalne postaje s popodnevnom maksimumom za kojeg se veže preko 80% slučajeva tuče (od 10 do 18 h). Istovremeno obalne postaje (crveno) pokazuju manje izražen i varijabilniji dnevni hod. Vidljiva su tri lokalna maksimuma, oko 08 h, 12 h i 16 h te produljena popodnevna aktivnost do 20 h. Iako mogući uzroci nastanka (po)podnevne aktivnosti mogu biti posljedica dnevnog ciklusa zagrijavanja, razlozi nastajanja (rano)jutarnje povećane konvektivne aktivnosti nisu očiti. Zanimljivo je spomenuti da se spomenuto poklapa s učestalijom pojavom drugih produkata duboke konvekcije; dnevnom i prostornom raspodjelom munja u Tršćanskom zaljevu (npr. slika 6a u Feudale *et al.*, 2013.) kao i pojavom pijavica (08-09 UTC) koje su uočili Sioutas i Keul (2007.) te potvrdili Renko *et al.* (2016.). Razlozi mogu biti višestruki od kojih je jedan lokalni režim strujanja, odnosno stvaranje lokalne

⁹Izvor: Vinogradarstvo i klimatske promjene na području Hrvatske <https://www.pmf.unizg.hr/geof/znanost/klimatologija/vitcllic>

¹⁰Izvor: Severe weather over the Alpine-Adriatic region in a changing climate <https://www.pmf.unizg.hr/geof/znanost/meteorologija/swaldric/oprojektu>

zone konvergencije. Kako do sada nisu rađene numeričke simulacije takvih slučajeva, a mjerenja ne pokrivaju ove analize otvoreno je pitanje uzroka ove pojave. Upravo zato, analiza (rano)jutarnje duboke konvekcije predstavlja glavnu motivaciju ovog rada i jedna je od glavnih ciljeva.

Podaci i metode

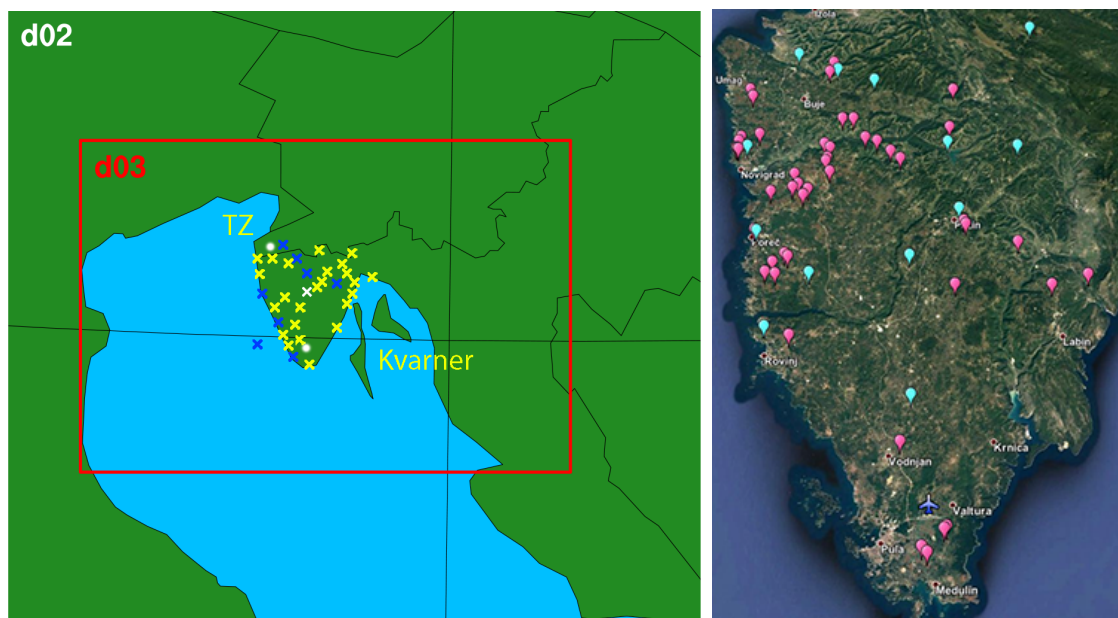
2.1 Geografski opis domene

Hrvatska je srednjoeuropsko-mediteranska zemlja, smještena tako da sadrži panonski, dinarski, jadranski i prealpski prostor. Geografske koordinate krajnjih točaka: najsjevernija Žabnik 46°33'N i 16°22'E; najjužnija otok Galijula 42°23'N i 16°21'E; najistočnija Ilok 45°2'N i 19°27'E; najzapadnija Bašanija 45°29'N i 13°30'E; najjužnija točka na kopnu je rt Oštra, 42°24'N i 18°32'E.

Pretežno je nizinska zemlja, čak 53% teritorija niže je od 200 m, oko 26% čine brežuljkasti krajevi i pobrđa visine 200–500 m, dok je 21% više od 500 m nadmorske visine. Najniži dijelovi nalaze se u sjeveroistočnom dijelu zemlje, koji je dio Panonske nizine, gdje se smjenjuju aluvijalne ravnice rijeka Save, Drave i Dunava s lesnim zaravnima Baranje i Srijema¹.

Prostor Hrvatske se regionalno može podijeliti na tri cjeline:

- nizinska ili panonska prirodna regija (obuhvaća 55% teritorija i 66% stanovništva)
- primorska ili jadranska prirodna regija (obuhvaća 31% teritorija i 31% stanovništva)
- gorska ili dinarska prirodna regija (obuhvaća 14% teritorija i 3% stanovništva).



Slika 2.1: (a) Prikaz dvije domene modela (d02 i d03) koje pokrivaju područje interesa s mjernim lokacijama. Mrežni korak srednje ugniježdene domene (d02) je 3 km, a najmanje domene korištene u analizi (d03) je 1 km. Bijelim znakom x označena je glavna postaja Pazin, plavim klimatološke postaje, žutim kišomjere postaje, a bijelim krugom su označeni aerodromi Portorož i Pula. Oznaka TZ označava Tršćanski zaljev. (b) Poligon u Istri (mreža tučomjera; mjerenja su provedena od 2017. -2019.)

¹<http://croatia.eu/index.php?view=article&id=7&lang=1>

Područje od interesa u ovom radu je sjeverno hrvatsko primorje koje čine Istra i Kvarner, te Tršćanski zaljev (slika 2.1). Istra je najveći hrvatski, a ujedno i jadranski poluotok. Na području Istre se izmjenjuje niz geomorfoloških oblika, od kojih se mogu izdvojiti tri reljefne cjeline: brdoviti sjever s krškim oblicima, niže flišno pobrđe u središnjoj Istri i niske vapnenačke zaravni. Osnovna značajka poluotoka je sredozemna klima s više od 2000 sunčanih sati godišnje, ali zbog blizine Alpa u unutrašnjosti klima prelazi u kontinentalnu. Kvarnerski zaljev je, u širem smislu, sjeverni dio jadranskog mora smješten između velebitske i istarske obale². Ova regija je spoj brdovite unutrašnjosti, priobalja te otoka, između kojih se veličinom ističu Krk, Cres, Lošinj, Rab i Pag. Obala zaljeva je vrlo razvedena, a na osnovu otočnih nizova može se rastaviti na: Riječki zaljev (sjever), Velebitsko-vinodolski kanal (dio između obale Hrvatskoga primorja i otoka Krka, Raba i Paga), Kvarnerić (između otočkog niza Krka, Raba i Paga s jedne, i Cresa i Lošinja s druge strane). Kvarnerski zaljev je pod utjecajem kontinentalne klime zbog utjecaja rubova visokih planina koje ga okružuju.

Jadransko more spada u kategoriju toplih mora. Ljeti, na otvorenom moru, temperature površine nalaze se u rasponu od 23 °C do 25 °C, a zimi od 14 °C do 16 °C. Varijacije u temperaturi između toplijeg južnog i hladnijeg sjevernog Jadrana iznosi 8 °C do 10 °C. Dubina mora na području domene je 50 m, a u Riječki zaljev je malo dublji (50-60 m).

Tršćanski zaljev je poluzatvoreni bazen smješten u sjevernoistočnom dijelu Jadranskog mora. Iako je relativno malih dimenzija (oko 20 km x 20 km; prosječna dubina 17 m; maksimalna dubina 26 m), igra važnu ulogu u hidrografskim svojstvima Jadranskog mora. Složena dinamika ovog područja je posljedica unosa slatke vode iz rijeka Furlanske ravnice i krškog terena, utjecaja vodene mase koja teče prema sjeveru duž istočne jadranske obale, dinamike plime i oseke te djelovanja vjetera. Udari bure (koji mogu doseći brzinu veću od 30 ms⁻¹) potiču vertikalno mješanje vode, stvaraju površinski odljev iz zaljeva i dubinski otok (Mosetti i Mosetti, 1990.).

2.2 Mjerenja meteoroloških parametara

U ovom radu koristio se niz meteoroloških mjerenja. Prizemna meteorološka mjerenja bila su dostupna sa Zračne luke Portorož i Pula (bijeće točke na slici 2.1) u obliku METAR ključa koji su uključivali sljedeće informacije; datum i sat, vjetar, vidljivost, trenutni vremenski uvjeti, naoblaka, temperatura zraka i temperatura rosišta, tlak, pojave (npr. pojava grmljavine, količina oborine...). Također koriste se i radiosondažna mjerenja iz Udina (46.03° N, 13.18° E, h=94 m), kao postaje koja je najbliža području interesa kod prikaza vertikalnih osobina atmosfere. Mjerenja vertikalnih profila atmosfere omogućavaju proračun indeksa nestabilnosti navedenih u tablici 2.1 i Dodatku A.

Daljinska mjerenja munja bila su dostupna iz LINET baze podataka s točnošću detekcije lokacije od 100 m (Betz *et al.*, 2009.). Dostupni podaci o munjama pokrivaju područje od 10° E do 25° E, te od 35° N do 66° N, dok je područje Hrvatske pokriveno sa šest senzora, od kojih je jedan u blizini Zagreba te ostalih pet u priobalnom području (u blizini Rijeke, Zadra, Splita, Korčule i Dubrovnika). Svaki senzor ima radijus djelovanja od otprilike 100 km, unutar kojeg je u stanju optimalno detektirati broj munja, njihovu

²<https://www.tailor-travels.com/hr/istrazi-hrvatsku/istra-i-kvarner/geografija-istra>

Tablica 2.1: Opis indeksa nestabilnosti korištenih u radu. Detalajn opis može se naći u Dodatku A.

Indeks nestabilnosti	Oznaka i vrijednost indeksa	Stanje atmosfere
Indeks podizanja (engl. <i>Lifted index</i> , LI)	$LI \geq 0$	Stabilno, uz mogućnost slabe konvekcije za $1 < LI < 3$ uz prisutno jako dizanje
	$-3 < LI < 3$	Granično nestabilno
	$-6 < LI \leq -3$	Umjereno nestabilno
	$-9 < LI \leq 6$	Jako nestabilno
	$LI \leq -9$	Ekstremno nestabilno
K indeks (KI)	$KI < 20$	Stabilno
	$20 \leq KI \leq 30$	Moguće grmljavinsko nevrijeme
	$KI > 30$	Velika vjerojatnost za grmljavinsko nevrijeme
	$K = 40$	Najbolji potencijal za grmljavinsko nevrijeme
Konvektivna raspoloživa potencijalna energija (engl. <i>Convective available potential energy</i> , CAPE)	$CAPE < 0$	Stabilno
	$0 \leq CAPE < 1000$	Granično nestabilno
	$1000 \leq CAPE < 2500$	Umjereno nestabilno
	$2500 \leq CAPE \leq 3500$	Jako nestabilno
	$CAPE > 3500$	Ekstremno nestabilno

raspodjelu u prostoru i vremenu, amplitude i predznake.

Slike radarskog odraza koje prekrivaju Istru i sjeverozapadni dio Hrvatske dobivene su s radarske postaje Lisca u Sloveniji (46.07° N, 15.28° E, $h=943$ m). Vrijednosti veće od 35 dBz na radarskoj slici upućuju na nastanak duboke konvekcije. Za analizu su se koristili maksimalni intenzitet refleksivnosti konvektivnih oblaka u razmacima od 30 min.

2.2.1 Mjerenja tuče

Podaci o tuči, dobiveni s meteoroloških postaja i postaja obrane od tuče u Hrvatskoj, raspoložu samo s podacima o broju dana s tučom u mjesecu/godini te s podacima o mjestu i vremenu pojave tuče, dok se same fizičke karakteristike daju samo opisno – uspoređujući veličinu zrna tuče s dimenzijama drugih poznatih predmeta (npr. grašak, lješnjak, orah, jaje; Počakal, 2012.).

Potreba za što objektivnijim i preciznijim podacima o fizičkim karakteristikama i intenzitetu tuče, rezultirala je osmišljavanjem mjernog instrumenta nazvanog *tučomjer*

(Počakal, 2012.). Tučomjer se sastoji se od stalka (na 1 m visine od tla) i horizontalno položene mjerne ploče dimenzija 0.25 x 0.25 x 0.02 m (slika 2.2). Materijal ploče, s jedne strane treba biti mekan da bi zrna tuče udarom u ploču na njoj ostavila trag, a s druge strane treba biti otporan na djelovanje različitih vanjskih utjecaja.

Uz pomoć tučomjera moguće je odrediti promjer i količinu zrna tuče koji su pali na horizontalnu plohu na osnovu otisaka koji ostave (npr. Long *et al.*, 1980.). Budući da različiti tučomjeri koriste materijale različite tvrdoće i elastičnosti, ploče je potrebno baždariti kako bi se moglo odrediti stvarni promjeri zrna tuče. Poznavajući promjer, moguće je odrediti ukupnu masu i kinetičku energiju (govori o intenzitetu tuče) koristeći metodu Mezeixa i Dorasa (1981.).



(a) Tučomjer (stalak i ploča)



(b) Tragovi tuče na ploči

Slika 2.2: Prikaz tučomjera i traga tuče³.

Podaci koje dobivamo s jedne ploče tučomjera su sljedeći:

- datum, sat i trajanje padanja tuče
- maksimalni promjer zrna (mm)
- ukupni broj zrna/m² za svaki interval (2.5 mm) veličine: 5.0 - 7.5; ... 37.5 - 40.0 mm
- srednji promjer svih zrna (mm)
- masa (g/m²)
- kinetička energija (J/m²)

³Izvor: https://www.pmf.unizg.hr/geof/znanost/klimatologija/vitclic/upute_za_tucomjere

Prema tipu istraživanja tučomjeri se postavljaju u prostoru na dva načina: na određene lokacije, lansirne i generatorske postaje, meteorološke postaje, poljoprivredna dobra i ostala pogodna mjesta, ili se postavljaju pravilne mreže tučomjera – poligoni na određeno područje (Počkal, 2012.). Postavljanje tučomjera na postaje počelo je 2001. godine, a do danas je postavljeno 730 tučomjera na sve glavne meteorološke postaje te lansirne i generatorske postaje u kontinentalnom dijelu Hrvatske. Udaljenosti između tučomjera u mreži lansirnih i generatorskih postaja iznosile su najčešće 3 - 7 km što znači da je prosječna udaljenost bila oko 5.5 km. Gusta mreža tučomjera u formi poligona postavljena je početkom 2002. godine na području Hrvatskog zagorja koje bilježi velik broj dana s tučom u Hrvatskoj (2.4 dana/god).

2.3 WRF model

WRF (engl. *Weather Research and Forecasting*) model je mezoskalni numerički model koji se koristi kao alat za prognozu vremena (verzija WRF-NMM (engl. *Nonhydrostatic Mesoscale Model*)), ali i kao alat za istraživanje atmosfere (verzija WRF-ARW; engl. *Advanced Research WRF*). Verziju WRF-ARW razvija i održava odjel za mezoskalnu i mikroskalnu meteorologiju pri američkom nacionalnom centru za istraživanje atmosfere (NCAR, engl. *National Center for Atmospheric Research*), a verzija WRF-NMM razvijena je na američkim nacionalnim centrima za predviđanje zaštite okoliša (NCEP, engl. *National Centers for Environmental Prediction*). Više o modelu može se naći u Skamarock *et al.* (2008.).

U ovom radu korištene su sljedeće karakteristike, a prikazane su u tablici 2.2. Osim odabira standardnih postavki za opis kratkovalnog i dugovalnog zračenja, opisa graničnog sloja i tla, mikrofizičkih karakteristika oblaka te korištenje kumulusne parametrizacije, koriste se i dvije dodatne opcije za određivanje karakteristika tuče (HAILCAST model) i munja (Indeks potencijala za razvoj munja, LPI). Same simulacije se računaju na više ugnježđenih domena prikazanih na slici 2.1a s tri različita mrežna koraka 9 km, 3 km, i 1 km koje komuniciraju u oba smjera te 97 vertikalnih nivoa do 50 hPa plohe u sve tri domene. Najveća domena (d01) obuhvaća Apeninski poluotok, zapadni dio Balkanskog poluotoka te Alpe (nije prikazano). Srednja domena (d02) obuhvaća veći dio Jadrana i hrvatske obale, Sloveniju te zapadnu i sjeverozapadnu Hrvatsku. Domena interesa (d03) s razlučivanjem od 1 km obuhvaća šire područje Istre (slika 2.1a). S obzirom na kompleksan teren uključena je opcija koja uvažava dnevni hod intenziteta sunčevog zračenja na obroncima (engl. *topographic shading*). Početni i rubni uvjeti su preuzeti iz analize ECMWF centra na rezoluciji 0.125° na standardnim izobarnim plohama svakih 6 sati. Topografija i tipizacija pokrova zemljišta preuzete su iz USGS (*United States Geological Survey*) baze podataka rezolucije 30" te od MODIS satelita na rezoluciji od ~450 m. Simulacije su pokretane 12 sati prije uočene konvekcije radi uvažavanja početne nepouzdanosti modela (engl. *spin-up time*).

2.3.1 HAILCAST model

U istraživačku verziju modela dodana je opcija HAILCAST. To je 1-D model koji prognozira svojstva zrna tuče; njegovu veličinu, gustoću i terminalnu brzinu. HAILCAST je revidirana verzija modela oblaka i tuče koju je razvio Poolman (1992.), a koju su unaprijedili Brimelow *et al.* (2002) te Jewell i Brimelow (2009.).

Tablica 2.2: Postavke numeričkih simulacija u WRF modelu.

Parametrizacije	WRF
Kratkovalno i dugovalno zračenje	Dudhia & RRTM
Kumulusna naoblaka (primijenjena u domeni A ($\Delta x = 9$ km))	Kain-Fritsch
Mikrofizika	Morrison-2-Moment
Model tla	5-layer
Atmosferski granični sloj	Bougeault-Lacarre
Prizemni atmosferski sloj	Noah MP
Visine vertikalnih među-nivoa u prvih 1 km, z (m)	5, 16, 28, 41, 54, 67, 81, 95, 110, 125, 142, 159, 177, 195, 215, 235, 256, 278, 302, 328, 369, 433, 525, 663, 838, 1025...
Uključene dodatne opcije	HAILCAST & Indeks potencijala za razvoj munja (eng. <i>Lightning potential index</i> , LPI)

Kako bi se dobili simulirani vertikalni profili temperature, vertikalne brzine, sadržaja leda i tekuće vode oblaka koriste se profili temperature, vlage i horizontalnog vjetera (uz početnu pretpostavku njihove stacionarnosti). Osim stacionarnosti, glavne pretpostavke koje model koristi su sljedeće: konstantna gustoća leda (900 kg/m^3), sferični oblik zrna tuče te početni dijametar embrija od $300 \mu\text{m}$. Dodatno, u oblaku led postoji na temperaturama u rasponu od -20°C do -40°C , a njegova količina se određuje eksponencijalnom relacijom (Vali i Stansbury, 1965.). Također, konfiguracija modela omogućava uvažavanje procese dodavanja vode prilikom uzlaznog strujanja (Adams-Selin i Ziegler, 2016.).

Prilikom unaprjeđenja modela Brimelow *et al.* (2002.) su ograničili trajanje uzlaznog gibanja zraka na temelju indeksa koji povezuje energiju i smicanje vjetera (engl. energy shear index, ESI). ESI indeks je produkt površinske konvektivne raspoložive potencijalne energije (CAPE-a) i smicanja vjetera na području između 850 hPa i 6 km iznad tla. Što je veća vrijednost ESI indeksa, to je omogućeno dulje trajanje uzlaznog strujanja (Adams-Selin i Ziegler, 2016.).

Model rasta zrna tuče ubacuje vodeni embrio, kojem je dana početna brzina od 4 m/s, u bazu oblaka. Pri svakom vremenskom koraku računa se vertikalna pozicija embrija na osnovu njegove konačne i interpolirane brzine uzlaznog strujanja za tu visinu. Kako vrijeme prolazi, embrio se podiže te akumulira tekuću vodu na svojoj putanji, a zamrzava se pri temperaturi iznad -8°C . Nakon zamrzavanja, jednadžba toplinske ravnoteže se računa pri svakom vremenskom koraku, a temperatura tuče postaje promjenjiva vremenska varijabla. U ovisnosti o svojoj unutarnjoj temperaturi i temperaturi oblaka, zrno tuče može ući u suhi ili vlažni režim rasta (Adams-Selin i Ziegler, 2016.). Zrno tuče nastavlja rasti sve do trenutka kada postane premasivno i nadvlada uzlazno strujanje. Tada, pod utjecajem gravitacije, kreće padati prema tlu.

Konačna brzina pada računa se prema Rasmussen i Heymsfield (1987.) metodi koja uključuje i Reynoldsov broj prilikom izračuna. Jednom kada zrno tuče padne ispod baze oblaka, profil vlage oblaka postavljen je na vrijednost 0.

2.3.2 Indeks potencijala za razvoj munja (LPI)

Duboki kovektivni procesi karakterizirani su intenzivnim vertikalnim gibanjima te pripade česti nerijetko dosežu zonu razdvajanja naboja (engl. *lightning charging zone*), zonu između 0 °C i -20 °C izoterme (Laham *et al.*, 2004.). Uz uvjet da postoje intenzivna vertikalna gibanja i velike koncentracije čestica leda i solike, u ovoj se zoni odvija process razdvajanja naboja i pojava munja. Sudaranje ovih čestica, uz prisutnost superohlađene vode, nužni je uvjet za process razdvajanja naboja u oblaku (Sanders, 2008.).

LPI (Yair *et al.*, 2010.) definiran je kao volumni integral ukupnog toka mase leda i tekuće vode u zoni razdvajanja naboja te postiže najveće vrijednosti u prisutnosti velikih vertikalnih brzina kada su omjeri čestica solike i ostalih konstituenata (snijeg, led i voda) relativno jednaki. LPI (Jkg^{-1}) dobivamo kao:

$$\text{LPI} = \frac{1}{V} \int \int \int \varepsilon w^2 dx dy dz$$

gdje je V volumen, w vertikalna brzina, a ε bezdimenzionalna veličina koja ovisi o mikrofizičkim svojstvima oblaka, omjeru mješanja vode, leda i solike. Dakle, LPI je kinetička energija vertikalne brzine skalirana s potencijalom za razdvajanje naboja. Potencijal za razdvajanje naboja ovisi o omjeru hidrometeora u zoni razdvajanja naboja. Stoga, LPI ukazuje na potencijal za razdvajanje naboja u oblaku putem neinduktivnog led-solika mehanizma, odnosno, ukazuje na područja koja na temelju mikrofizičkih svojstava pokazuju mogućnost električne aktivnosti (Yair *et al.*, 2010.).

2.4 SHARPPy

Na temelju reanaliza bilo je potrebno izračunati statičku (ne)stabilnost nad područjem Istre za što se koristio program SHARPPy (engl. *The Sounding and Hodograph Analysis and Research Program in Python*). SHARPPy predstavlja besplatni paket za analizu i grafički prikaz radiosondažnih podataka za operativne i istraživačke svrhe. Temelji se na termodinamičkom dijagramu (engl. *Skew-T*) te je nastao kao rezultat suradnje Nacionalne agencija za istraživanje oceana i atmosfere/Centar za prognozu oluja (NOAA/SPC, engl. *National Oceanic and Atmospheric Administration/Storm Prediction Center*) i studenata meteorologije na Sveučilištu u Oklahomi. Prvi put je predstavljen meteorološkoj zajednici na konferenciji Američkog meteorološkog društva (engl. *American Meteorological Society*) 2012. godine (Blumberg *et al.*, 2017.).

Kao ulazne podatke SHARPPy koristi vertikalne profile tlaka, temperature, temperature rosišta te u i v-komponente vjetra (brzina i smjer). Izlazni podaci su termodinamički indeksi nestabilnosti (npr. CAPE, CIN, KI...) i kinematički indeksi (npr. smicanje vjetra, srednji vjetar...). Moguće ih je dobiti i u numeričkom i u grafičkom obliku.

2.4.1 Statistički parametri

Za potrebe ovog rada analizirani su mjereni podaci s onima dobivenima iz numeričkih proračuna modela WRF i SHARPy.

Verifikacija ekstremnih (rijetkih) događaja poput tuče i munja predstavlja izazovan zadatak zbog izražene prostorne i vremenske varijabilnosti. Važno je spomenuti da se ove vremenske pojave ne moraju nužno dogoditi (za razliku od npr. tlaka koji se kontinuirano mjeri) čak i u dužem vremenskom razdoblju. Zbog toga je nerealno očekivati da će se prognoze modela visoke rezolucije u potpunosti slagati s opaženim događajima na maloj skali. Potrebno je napomenuti da se prognoza koja ima mala prostorna ili vremenska odstupanja smatra dobrom, ali je standardne metode verifikacije (korijen srednje kvadratne pogreške, standardna devijacija, ...) kažnjavaju.

U slučaju da takav događaj verificiramo standardnim metodama, koje zahtjevaju prostorno i vremensko slaganje prognoze i opažanja, nailazimo na problem dvostruke kazne. Problem dvosturke kazne javlja se kada je prognoza pomaknuta vremenski i/ili prostorno u odnosu na opažanja. Tada prognozu standardnim verifikacijskim metodama dvosturko kažnjavamo, jednom za opažen-ali-ne-prognozioran događaj i jednom za prognoziran-ali-ne-opažen događaj.

Kako bi se reducirala vremenska varijabilnost između prognoziranih i opaženih događaja tuče, analiziraju su se polja s 24-satnim periodom. Za određivanje prostorne varijabilnosti koriste se tzv. verifikacijske "fuzzy" metode. To su metode koje ne zahtjevaju precizno prostorno i vremensko preklapanje između prognoziranog i opaženog događaja. Odnosno, takve metode dopuštaju prostorni i/ili vremenski pomak prognoze i opažanja u okviru definiranog prozora te se prognoza evaluira koristeći kategoričke metrike. Pri tome se koriste tablice kontigencije koja uspoređuje simulirane i opažene događaje (tablica 2.3).

Tablica 2.3: Primjer tablice kontigencije.

Simulirani događaj	Opaženi događaj		
	Da	Ne	Parcijalna suma
Da	Opažen simulirani događaj (a)	Neopažen simulirani događaj (b)	Simulirani događaj (a+b)
Ne	Opažen nesimulirani događaj (c)	Točno nesimulirani događaj (d)	Nesimulirani događaj (c+d)
Parcijalna suma	Opaženi događaj (a+c)	Neopaženi događaj (b+d)	Ukupna suma (a+b+c+d=n)

Na temelju tablice kontigencije određuju se vrijednosti verifikacijskih metrika prikazanih u tablici 2.4. Omjer neostvarenih prognoza (FAR) je mjera pouzdanosti modela. FAR daje udio prognoziranih događaja koji se nisu ostvarili. Mali broj neopaženih simuliranih događaja uvijek su poželjni, ali ne po cijenu podcjenjivanja stvarne opasnosti. Vrijednosti FAR-a variraju između 0 i 1. Što mu je vrijednost niža, model je uspješniji.

Uspješna prognoza (HR) mjeri udio promatranih događaja koji su točno prognozirani. HR daje mjeru pristranosti modela. Što je ovaj udio veći, model ima bolje rezultate. Vrijednosti HR-a variraju između 0 i 1, a što je vrijednost viša, model je bolji.

SEDI pruža, za razliku od ostalih kategoričkih metrika, značajne rezultate u slučaju rijetkih događaja kada se stopa uspješnih prognoza i stopa neostvarenih prognoza smanjuju prema nuli. Vrijednosti SEDI indeksa nalaze se u intervalu $[-1, 1]$, a približava se maksimalnoj vrijednosti (1) što je prognoza modela uspješnija.

Tablica 2.4: Tablični prikaz osnovnih podataka o korištenim metrikama. Oznake: a = opaženi simulirani događaj, b = neopažen simuliran događaj, c = opažen nesimulirani događaj, d = točno nesimulirani događaj.

Metrika	Formula
Omjer neostvarenih prognoza (engl. <i>false alarm ratio</i> , FAR)	$\text{FAR} = \frac{b}{a+b}$
Uspješna prognoza (engl. <i>Hit rate</i> , HR)	$\text{HR} = \frac{a}{a+c}$
Indeks simetrične ekstremne ovisnosti (engl. <i>Symmetric extremal dependence index</i> , SEDI)	$\text{SEDI} = \frac{\log(\text{FAR}) - \log(\text{HR}) - \log(1 - \text{FAR}) + \log(1 - \text{HR})}{\log(\text{FAR}) + \log(\text{HR}) + \log(1 - \text{FAR}) + \log(1 - \text{HR})}$

Rezultati i diskusija

3.1 Odabrani slučajevi

Na temelju dostupne baze podataka prikazane na slici 1.8 radila se selekcija slučajeva koji su se simulirali. Pri tome su korištena dva kriterija koje slučajevi trebaju ispunjavati: (i) vremenska pojava tuče (uočena u ranojutarnim ili prijepodnevnim mjerenjima tuče na tučomjerima postavljenima u Istri, slučajevi S1-S4) ili pojava ranojutarnje pijavice (slučaj S5) te (ii) relativno dobra dokumentiranost u mjerenjima. Iz navedenog odabrano je pet slučajeva (dana) u razdoblju 2010. - 2014. te su neke osobine kao što su vrijeme i lokacija zabilježene tuče/munje/pijavice uz prevladavajući tip sinoptičkih uvjeta prikazani u tablici 3.1. Tip sinoptičkih uvjeta procjenjen je subjektivno na temelju sinoptičkih karta¹ te radiosondažnih profila² u terminima 12:00 i 00:00 UTC s postaje Udine.

Tablica 3.1: Tablični prikaz osnovnih podataka o izabranim slučajevima

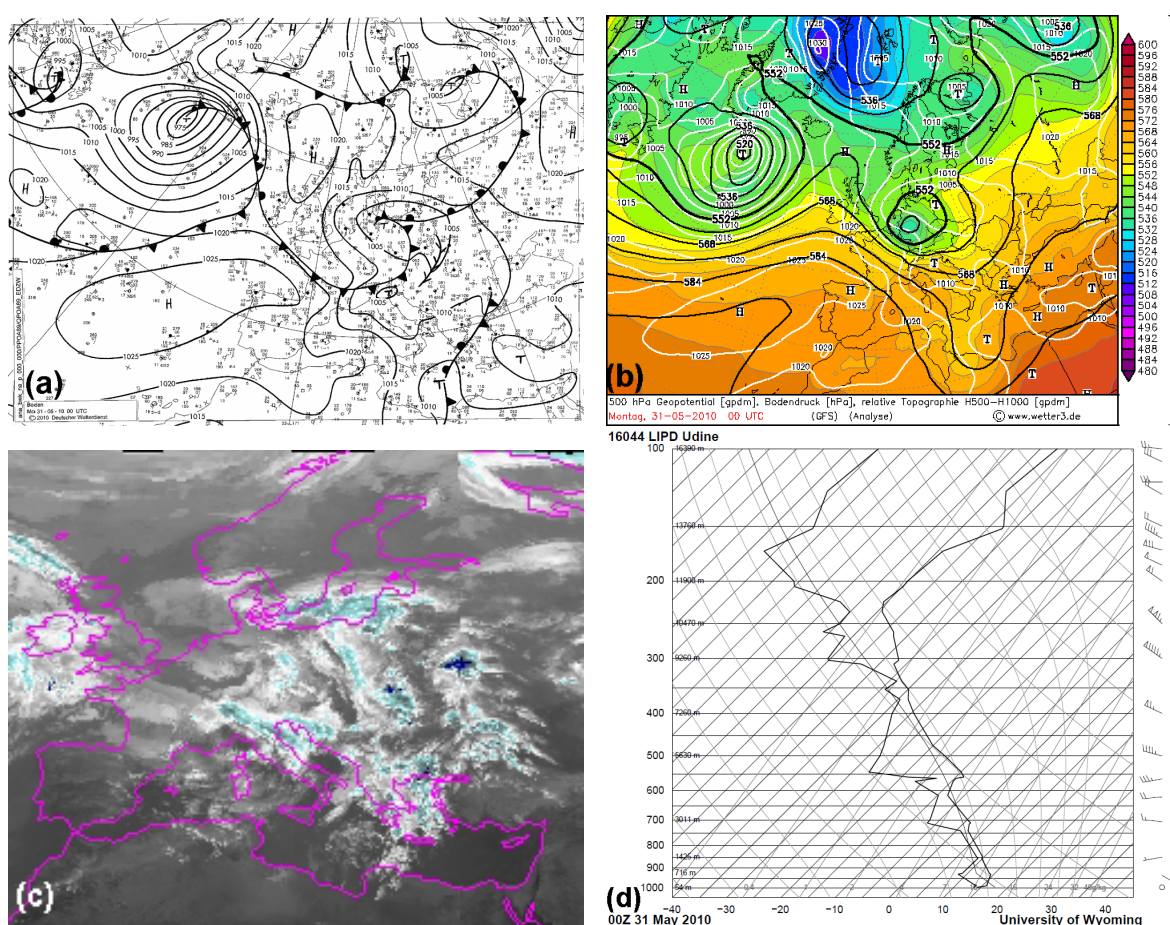
Oznaka	Datum	Lokacija pojave i vrijeme zabilježene opažene tuče/pijavice	Sinoptički tip vremena uz prevladavajući smjer vjetra
S1	31.05.2010.	6 postaja; Veprinac (06:15 i 09:10 CET), Pazin (07:30 CET), Grdinići (06-12:00 CET), Letajbrana (09:45 CET), Lupoglav Istarski (11:00 CET), Lovranska draga (12-18:00 CET)	Donji dio ciklone uz visinsko W-NW strujanje (iznad 850 hPa)
S2	24.05.2013.	10 postaja; Baderna (06-12:00 CET), Barbariga (10:10 CET), Pazin (07:45 CET), Rovinj (08:42 CET, 09:26 CET, 09:49 CET), Sv. Petar u šumi (10:15 CET), Umag (07:40 CET), Medulin (06-12:00 CET), Filarija (17:05 CET)	Prednji dio ciklone uz visinsko strujanje južnih smjerova (SW vjetar iznad 700 hPa)
S3	02.05.2014.	3 postaje; Baderna (08:00 CET), Vodice Istarske (14:00 CET), Sv. Petar u šumi (16:00 CET)	Prednji dio ciklone uz NE-E visinsko strujanje iznad 850 hPa
S4	27.05.2014.	4 postaje; Pazin (09:20 CET), Čepić (10:15 CET), Vela Učka (10:45 CET), Veprinac (14:22 CET)	Prednji dio doline uz visinsko strujanje južnih smjerova (SE-SW vjetar iznad 850 hPa)
S5	30.06.2014.	Pijavice kod Novigrada (oko 09:00 CET)	Prednja strana ciklone uz prolazak hladne fronte, SW strujanje po visini (iznad 925 hPa)

¹Izvor: www1.wetter3.de

²Izvor: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

3.2 Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja: 31.05.2010.

Analizirajući prizemne karte, od 30.05.2010. uočava se pomicanje hladne fronte prema jugoistoku kontinenta kao dijela sustava niskog tlaka zraka čiji se centar nalazi sjeverno od Jadrana iznad Atlantika (slika 3.1a). Prethodeći fronti javlja se i linija nestabilnosti. Sam prizemni ciklonalni sustav povezan je s dubokom visinskom dolinom koja se premještala preko Hrvatske i spuštala do obala sjeverne Afrike sljedećih dana (slika 3.1b). Sam sustav niskog tlaka je dosta intenzivan. Vidljiv je u srednjim slojevima atmosfere (500 hPa ploha) kao intenzivna visinska ciklona (engl. *cut-off low*) koja se nad Jadranom zadržavala sljedećih tri dana utječući na vremenske prilike u Hrvatskoj. Tijekom ovog razdoblja, radiosondažna mjerenja pokazuju dominaciju zapadne-sjeverozapadne struje zraka nad Istrom koja donosi vlažan i relativno nestabilan zrak (slika 3.1d) te uzrokuje stvaranje većeg oblačnog sustava (slika 3.1c).

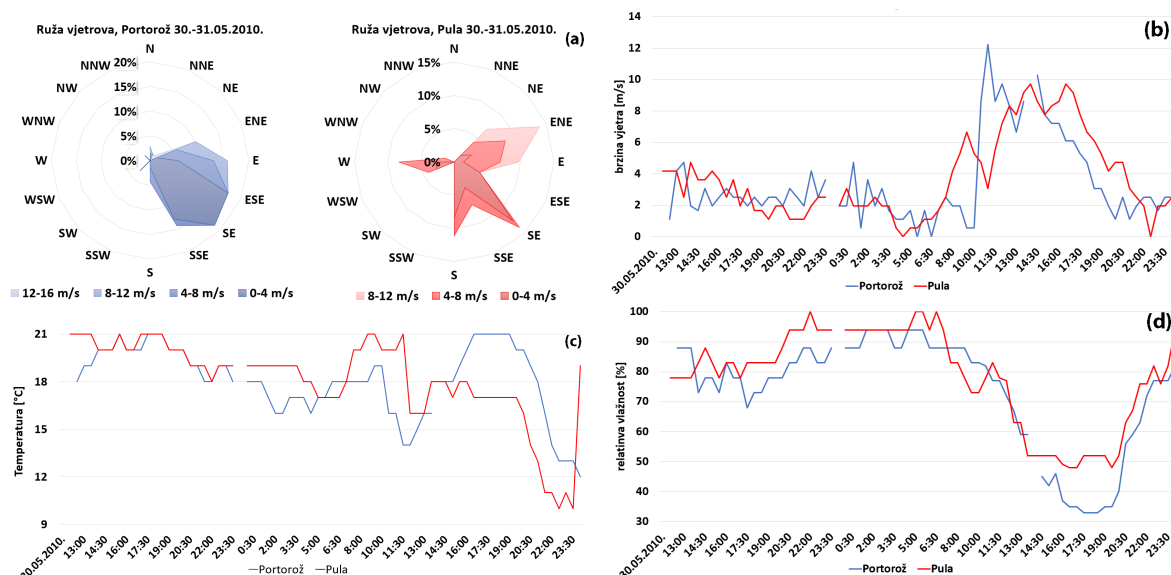


Slika 3.1: (a) Prizemna dijagnostička i (b) visinska sinoptička karta Europe za 31.05.2010. 00:00 UTC (Izvor:www1.wetter3.de). (c) Satelitska snimka atmosfere nad Europom u 00:00 UTC, 31.05.2010. (Izvor: <https://www.ncdc.noaa.gov/gibbs/>). (d) Radiosondažni profili nad Udinama u 00:00 UTC, 31.05.2010. (Izvor: <http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)

Vertikalni profil atmosfere nad Udinama pokazuje zakretanje vjetra po visini od jugoistočnih smjerova iznosa manjih od 6 m/s ispod 850 hPa do zapadnih smjerova s linearnim porastom do 23 m/s na 500 hPa te 59 m/s na 250 hPa plohi u slobodnoj troposferi. Time ukazuje na postojanje značajnog smicanja u prvih 6, odnosno 10 km iznad tla. Na visinama između 850-740 hPa gdje je razlika između temperature zraka

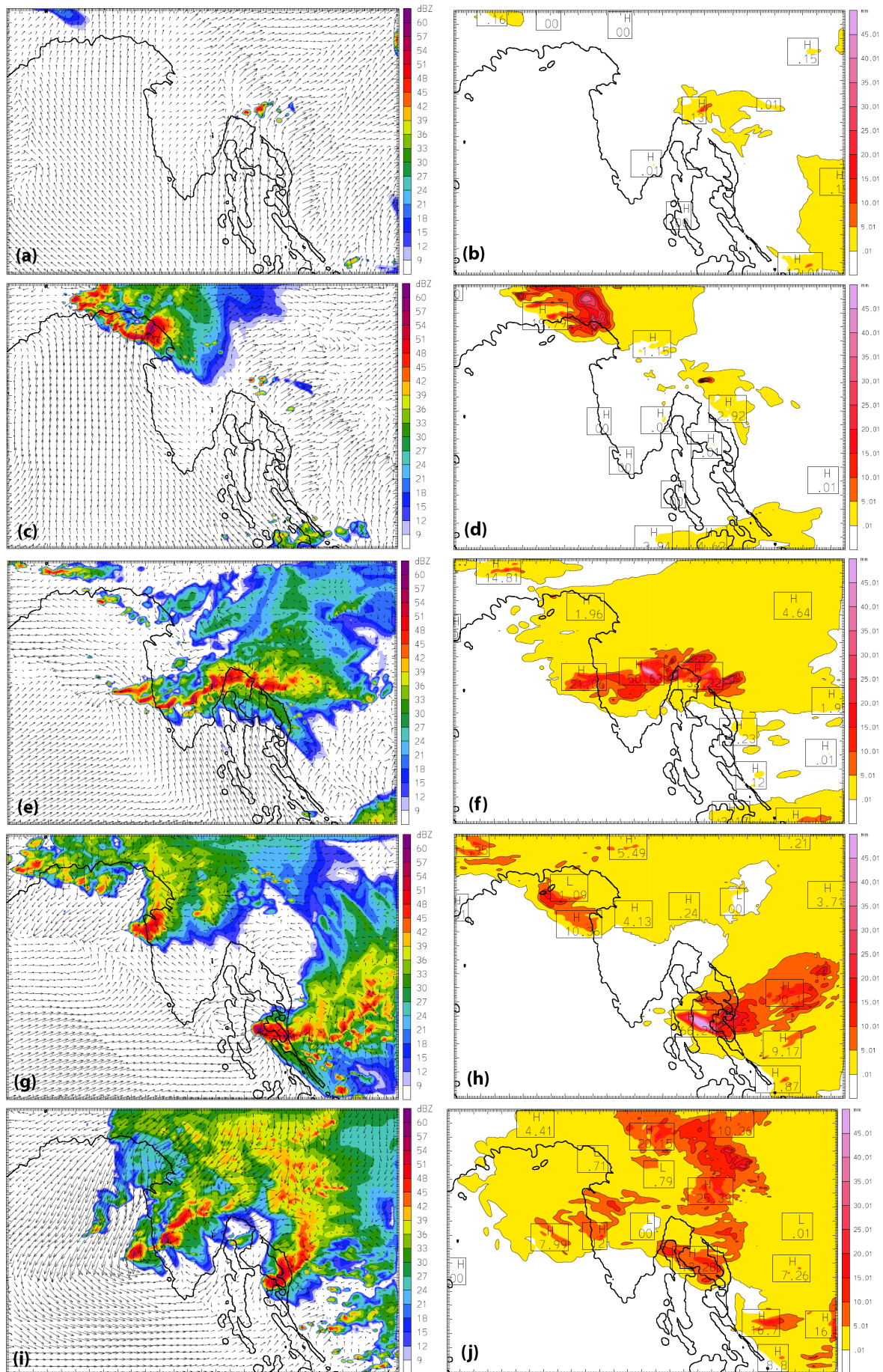
i temperature rosišta mala, dolazi do stvaranja oblaka. Konkretno, u ovom terminu dolazi do stvaranja niskih, kumulusnih oblaka na 850 hPa plohi. Dodatno, radiosondažna mjerenja ukazuju i na stvaranje visokih oblaka, što satelitska snimka atmosfere (slika 3.1c) potvrđuje. Iako vrijednost K indeksa ($KI = 27.40$) ukazuje na mogući razvoj grmljavinskog nevremena, ostali indeksi nestabilnosti u 00:00 UTC u Udinama daju slab potencijal za razvoj duboke konvekcije ($CAPE = 13.26 \text{ Jkg}^{-1}$, $LI = 2.10$).

Tijekom 30.-31.05.2010., na postaji Zračna luka Portorož zabilježene su niže vrijednosti tlaka (nije prikazano) te vrlo visoke noćne vrijednosti relativne vlažnosti (slika 3.2d). Vlažnost zraka tijekom popodneva počinje opadati na polovicu svoje noćne vrijednosti, što je popraćeno povećanjem dnevnog zagrijavanja te povećanjem u brzinama vjetra. Smjer vjetra ukazuje na jače jugoistočno strujanje, osobito na području Portoroža. Mjereni jugo s brzinama oko 10 m/s ne dopušta značajniji razvoj termički generiranih strujanja na obali. Nakon juga i prolaska fronte razvija se bura iz NE i ENE smjera. Slični vremenski uvjeti su prevladavali i na Zračnoj luci Pula.

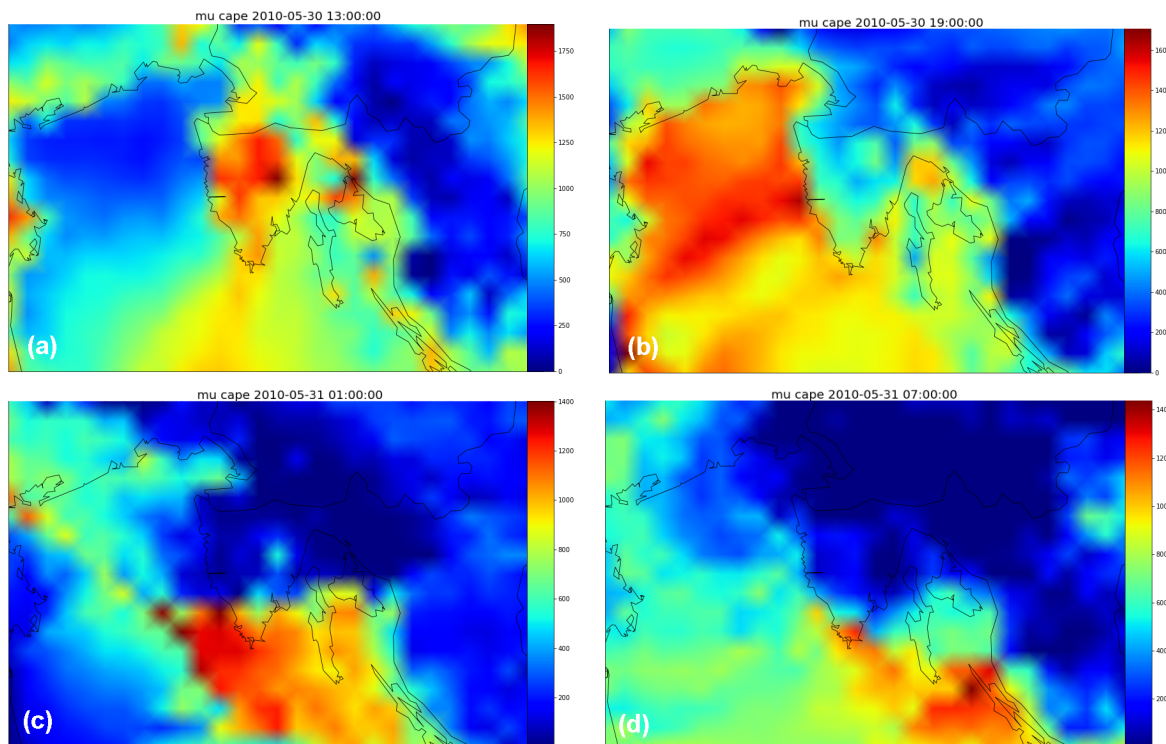


Slika 3.2: Prikaz (a) smjera ($^{\circ}$) i (b) brzine vjetra (m/s), (c) temperature ($^{\circ}\text{C}$) te (d) relativne vlažnosti (%) na Zračnim lukama Portorož (plavo) i Pula (crveno) za razdoblje od 12:00 CET 30.05.2010. do 23:30 CET 31.05.2010.

Prema modeliranim poljima, u popodnevnim satima 30.05.2020. dominira južni vjetar te se stvaraju sporadične Cb ćelije u zaleđu Rijeke (slika 3.3a, b). Dolazak fronte oko 21:00 CET sjeverno od Tršćanskog zaljeva pospješuje stvaranje konvektivnih ćelija nad sjevernom obalom Jadrana; te područje tišina i jugozapanjaka zamjenjuje jugo. Silazna gibanja (slika 3.3c) sjevernog smjera tijekom zrele faze stvaraju s nasuprotnim južnim strujanjem zonu konvergencije nad morem što omogućava lakše dizanje zraka i stvaranje novih malih konvektivnih ćelija (kćeri). Jugo donosi i vlagu u prizemnim slojevima, a iznad mora se detektira povećana CAPE (iz WRF; slika 3.4) te povećani tok latentne topline (nije prikazano). Intenzitet sjeverno pozicioniranog sustava koji se spušta prema jugoistoku prelazi 48 dBZ, praćen je i značajnom akumuliranom satnom oborinom koja prelazi 40 mm. Oba parametra ukazuju na moguću pojavu tuče u području istraživanja. Tijekom sljedećih sati, dolazi do razvoja nekoliko ciklusa konvektivnih sustava koji prelaze područje.



Slika 3.3: (lijevo) Maksimalni modelirani intenzitet refleksivnosti oblaka (dBZ) i polje strujanja (m/s) na 10-m visine iznad tla te (desno) ukupna količina oborine u zadnjih sat vremena (mm) iz modela WRF za 30.-31.05.2010. u pet termina: (a, b) 18:00 CET, (c, d) 22:00 CET, (e, f) 02:00 CET, (g, h) 05:30 CET i (i, j) 08:30 CET. Pri tome se intervali intenziteta međusobno razlikuju za 3 dBZ (prikazano na legendi).



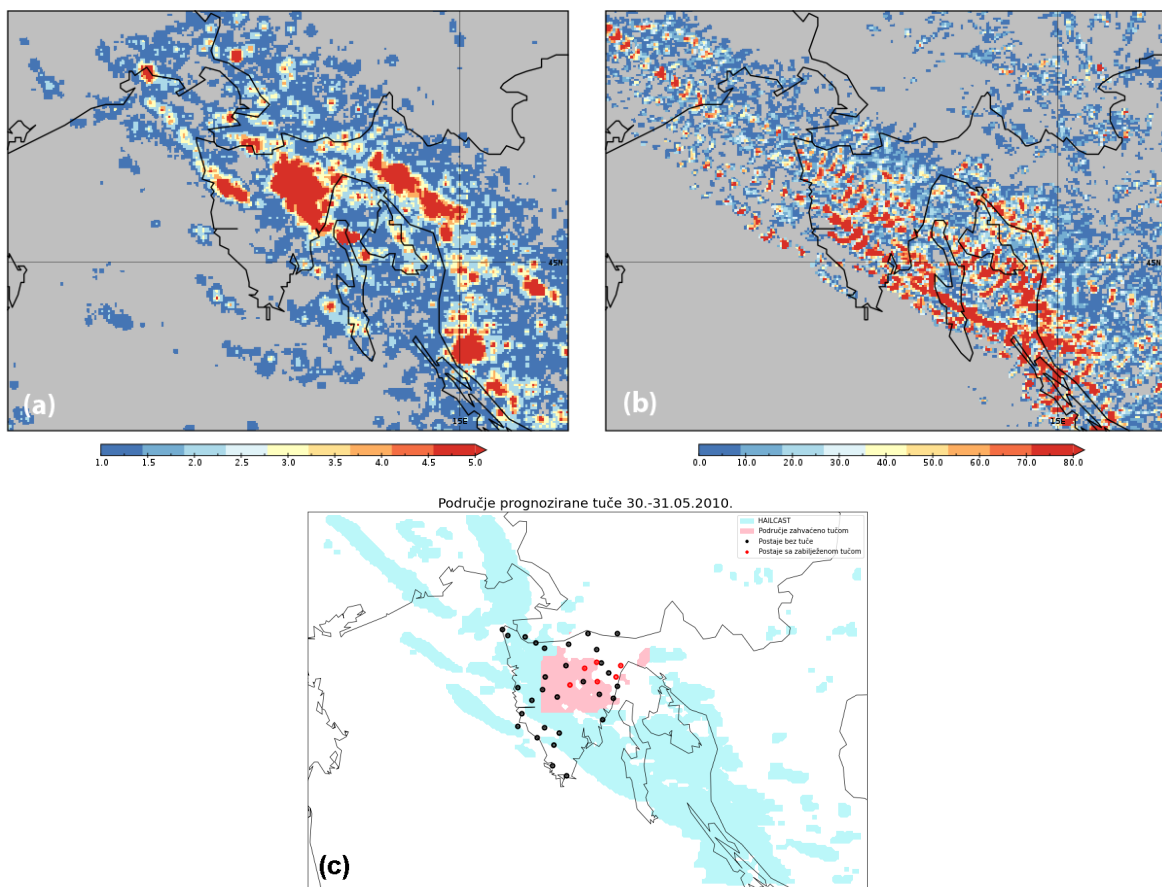
Slika 3.4: Prognozirane vrijednosti CAPE-a iz modela WRF i SharpPy u (a) 13:00 CET 30.05.2010., (b) 19:00 CET 30.05.2010., (c) 01:00 CET 31.05.2010. te (d) 07:00 CET 31.05.2010. nad domenom d03.

Drugi u nizu nastaje nakon 04:00 CET sjeverozapadno od Istre (slika 3.3g,h) čemu doprinosi i značajna konvergencija prizemnog strujanja iz više smjerova (W, SE i NE) generiranog sinoptičkim uvjetima i modificiranog raspodjelom kopna i mora te oblikom obale. Njegov intenzitet je oko 50 dBZ-a uz nešto slabiju satnu oborinu. Sustav zahvaća gornji dio poluotoka te kreće prema istoku i nestaje oko 07:00 CET. Treći sustav predstavlja nekoliko manjih ćelija koje su mijenjale svoj intenzitet (vidljivo kroz radarski odraz), površinu i prostornu poziciju spuštajući se prema jugu. Atmosferski uvjeti omogućili su generiranje male konvektivne ćelije u blizini Portoroža (oko 09:00 CET). Karakteristike trećeg generiranog sustava su da je dao još manje ukupne satne oborine uz životni vijek koji je završio oko 10:00 CET. Prolazak ranojutarnjih konvektivnih sustava prati razvoj jake bure, vidljive osobito u područjima mlazeva u Tršćanskom zaljevu. Prolaskom fronte i jačanjem bure konvektivna aktivnost nad Istrom zamire.

U dominaciji sinoptičkog strujanja u području interesa, termički generirana strujanja (s mezo-gamma-skale) se nisu značajnije razvila. Ipak dolazi do stvaranja značajne zone konvergencije u polju strujanja nad sjevernim Jadranom. Konvergentna zona uvjetovana je konvergencijom strujanja koje dolazi s kopna na more bez obzira radi li se o mezoskalnom (kopnenjaku) ili sinoptičkom (buri) strujanju iznad konkavne obale Tršćanskog zaljeva; modifikaciji juga iz južnog u jugoistočni smjer zbog oblika obale te južnog smjera nad otvorenim more. Time se stvaraju i područja povećanog CAPE-a nad morem što pospješuje stvaranje i održavanje konvektivnih sustava.

Potencijal za oluju u Tršćanskom zaljevu i Istri uočava se već desetak sati prije prognozirane pojave tuče. Rijetke informacije indeksa nestabilnosti u Udinama popunilo se podacima iz WRF-a koja su dala bolju prostornu-vremensku razdiobu. Nad Tršćanskim zaljevom vrijednosti CAPE-a prelaze 500 Jkg^{-1} , KI 32, a LI se spušta na

-4 osam sati prije dolaska tuče. Sve je popraćeno pojavom električnog sijevanja (slika 3.5a,b). Iako na mjestima model precjenjuje, odnosno, podcjenjuje potencijal za pojavu munja, ipak se uočava dobro slaganje s količinom opaženih munja na prostoru domene. S vremenom indeksi nestabilnosti se mijenjaju i poprimaju ekstremne (maksimalne i minimalne) vrijednosti (u radu je prikazana samo vremenska evolucija CAPE-a (slika 3.4)). CAPE maksimalnu vrijednost poprima dva sata prije prolaska prognozirane tuče i prelazi 1000 Jkg^{-1} , a na mjestima vrijednosti dosežu i 1400 Jkg^{-1} . Nakon prolaska tuče vrijednosti nad ovim područjem uglavnom opadaju na vrijednosti $< 500 \text{ Jkg}^{-1}$. Kao i CAPE, LI postiže ekstremnu vrijednost dva sata pred tuču. Minimalna vrijednost se spušta na -6, nakon čega se povećava ne prelazeći nulu. KI svoj maksimum (KI ~ 34) doseže neposredno pred dolazak tuče. Prolaskom tuče, njegove vrijednosti su niže, ali se ne spuštaju ispod 26.



Slika 3.5: Prostorna distribucija (a) akumuliranih 24-satnih mjerenih udara munja iz LINET mreže, (b) akumuliranog 24-satnog modeliranog potencijala za munje (LPI [J/kg]) iz modela WRF za 31.05.2010. (c) tuče u razdoblju od 12:00 CET 30.05.2010. do 19:00 CET 31.05.2010. Crni kružići označavaju mjerne postaje koje nisu zabilježile tuču, a crveni kružići mjerne postaje na kojima je tuča opažena. Tirkizna boja označava prostornu distribuciju akumulirane modelirane tuče WRF modelom, a ružičasto dozvoljeno odstupanje od postaje koja je zabilježila tuču unutar radijusa od 15 km.

U unutrašnjosti Istre vrijednosti CAPE-a na mjestima prelaze 1500 Jkg^{-1} , KI doseže vrijednost 34, a LI se spušta na -5 devet sati prije dolaska tuče. Dva sata pred tuču, CAPE-a poprima maksimalne vrijednosti. Na mjestima uz obalu vrijednosti CAPE-a prelaze 1500 Jkg^{-1} i za 500 Jkg^{-1} su više nego u unutrašnjosti. Dolaskom tuče

CAPE slabi. Za razliku od CAPE-a, vrijednosti KI su veće u unutrašnjosti i pred tuču poprimaju ekstremne vrijednosti ($KI \sim 35$). Vrijednosti KI ostaju veće od 20 sve do 09:00 CET sljedećeg jutra. LI se ponaša slično kao i u Tršćanskom zaljevu s jednom razlikom, a to je da mu vrijednosti s vremenom postaju pozitivne.

Prikaz prostorne raspodjele prognoziranog tuče nad područjem domene d03 tijekom vremenskog razdoblja od 12:00 CET 30.05.2010. do 19:00 CET 31.05.2010. dan je na 3.5c. Prema prognozi, tuča je zahvatila većinu Tršćanskog zaljeva i Istre premještajući se sa sjeverozapada prema jugoistoku, što je u skladu sa sinoptičkom situacijom. S druge strane, mjerenja pokazuju da tuču tijekom ovog razdoblja (tablica 3.2) zabilježilo samo šest postaja. Ovo prostorno nepodudaranje prognoze i mjerenja može se opravdati izrazitom lokaliziranošću tuče koja može pasti neposredno pored tučomjera koji je zbog svojih malih dimenzija neće zabilježiti. Dodatno, za određene lokacije, zbog nepostojanja tučomjera, nije moguće ni potvrditi ni opovrgnuti prognozu modela na tom području. Slični razlozi mogu objasniti i vremensku nepodudaranje između prognoze i mjerenja (tablica 3.2). Zbog toga se, prilikom verifikacije modela, dozvolilo odstupanje od postaje koja je zabilježila tuču unutar radijusa 15 km (ružičasto označeno područje na slici 3.5c). Uzimajući u obzir dozvoljeno odstupanje, izračunate su kategoričke metrike (tablica 3.5c) čiji su iznosi prikazani u tablici 3.3. Unatoč relativno visokoj vrijednosti FAR metrike, prognoza se može okarakterizirati uspješnom zbog iznosa druge dvije metrike.

Tablica 3.2: Tablični prikaz prognoziranog i zabilježenog vremena opažanja tuče.

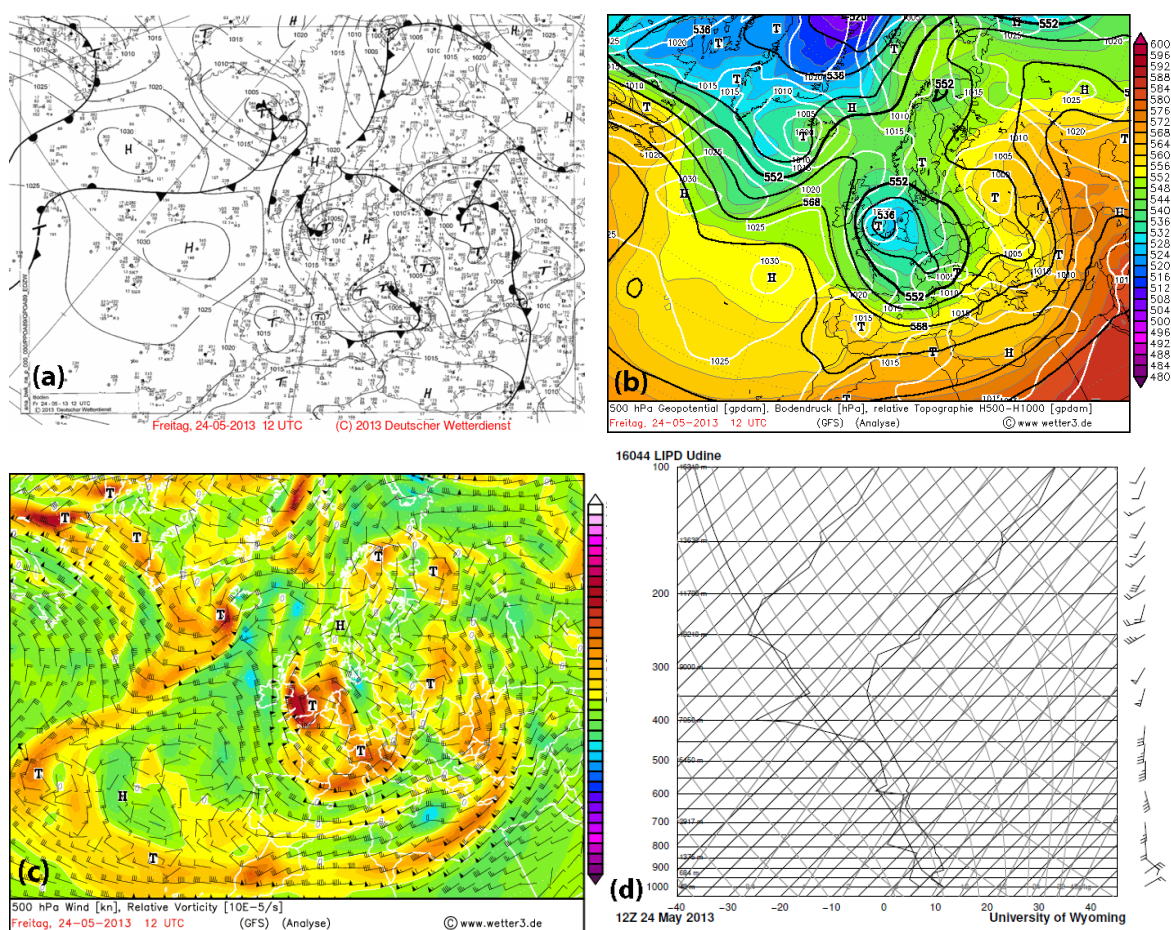
Lokacija	Prognozirano vrijeme tuče	Vrijeme opažanja tuče
Grdinići	00:00 CET i 05:30 CET	06:00-12:00 CET
Letaj brana	01:00 CET i 7:40 CET	09:45 CET
Lovranska draga	00:50 CET	12-18:00 CET
Lupoglav Istarski	05:40 CET	11:00 CET
Pazin	00:00 CET, 05:20 i 07:20 CET	07:30 CET
Veprinac	Nije prognozirano	06:15 CET i 09:10 CET

Tablica 3.3: Tablični prikaz rezultata kategoričkih metrika.

Metrika	Slučaj				
	S1	S2	S3	S4	S5
FAR	0.476	0.214	0.625	0.435	/
HIT	0.846	0.733	0.600	0.867	/
SEDI	0.525	0.677	0.037	0.599	/

3.3 Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja: 24.05.2013.

Ovaj slučaj obilježio je prolazak Genovske ciklone i pripadne okludirane fronte koja je utjecala na vremenske prilike u jugoistočnoj Europi (slika 3.6a). Ciklonalni sustav povezan je s dubokom visinskom dolinom koja se spuštala sa sjevera prema jugu kontinenta (slika 3.6b). Na srednjim slojevima, ovaj sustav niskog tlaka zraka je vidljiv kao intenzivna visinska cikliona oko koje mlazna struja kruži južnom stranom (slika 3.6c). Mlazna struja ima važnu ulogu u općem strujanju zraka u atmosferi, a usko je povezana s atmosferskim frontama niskoga tlaka zraka i ciklone. Štoviše, dio znanstvenika smatra da zbog valova u mlaznoj struji nastaju ciklone i ostali atmosferski poremećaji. Spomenuti sinoptički uvjeti donijeli su nepovoljne vremenske uvjete (zahlađenje, obilne količine oborine, tuču pa čak i snijeg) na područje Hrvatske³. Tijekom ovog perioda, radiosondažna mjerenja ukazuju na dominaciju visinskog južnog i jugozapadnog strujanja zraka koje donose vlažan i relativno nestabilan zrak na područje interesa.



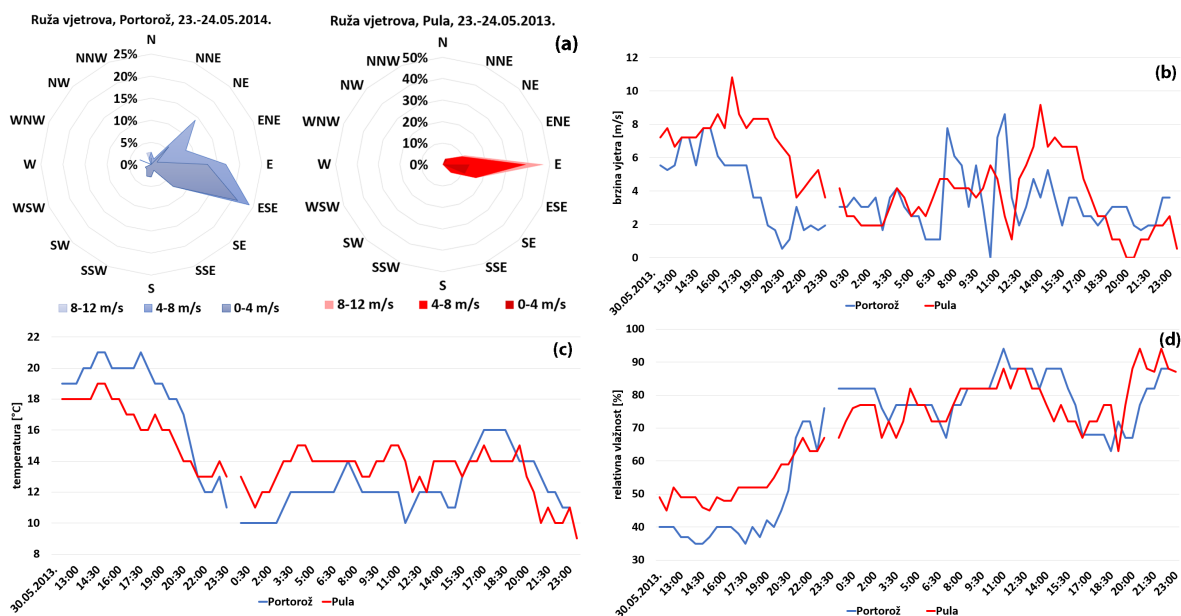
Slika 3.6: (a) Prizemna dijagnostička i (b) visinska sinoptička karta Europe. (c) Mlazna struja na 500 hPa plohi i relativna vrtložnost nad Europom (osjenčeno) za 24.05.2013. u 12:00 UTC (Izvor: www1.wetter3.de). (d) Radiosondažni profili nad Udinama 24.05.2013. u 12:00 UTC. (Izvor: <http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)

Vertikalni profil atmosfere nad Udinama pokazuje izraženo zakretanje vjetra po visini, od sjeveroistočnog vjetra iznosa 8 m/s ispod 850 hPa do vjetra južnih smjerova s linearnim porastom do 18 m/s te jugo-jugozapadnih smjerova iznosa 28 m/s u slobodnoj

³Izvor: <https://www.istramet.hr/vijesti/pula-pod-vodom-iako-kolicine-kise-i-nisu-velike/>

troposferi. Izraženo vertikalno smicanje vjetra cijelom visinom atmosfere, ukazuje na njen potencijal u razvoju konvekcije koja se ne iščitava iz vrijednosti konvektivnih indeksa kroz period od 24 sata (npr. CAPE = 0.00 Jkg⁻¹, KI = 22.60, LI = 7.57 u 00:00 UTC; ovim vrijednostima prethodile su sljedeće vrijednosti CAPE = 6.02 Jkg⁻¹, KI = 24.40, LI = 4.27, mjerene 24.05.2014. u 00:00 UTC). U ovom terminu, do stvaranja oblaka dolazi na 650 hPa plohi. Istovremeno, na srednjem dijelu Jadrana, koji prethodi nailasku mezoskalne ciklone, nestabilnost atmosfere na području Zadra vidljiva je u smicanju vjetra (u slobodnoj atmosferi brzina vjetra prelazi 45 m/s; nije prikazano), ali i u vrijednostima konvektivnih indeksa (CAPE = 361.8 Jkg⁻¹, KI = 20.90, LI = -1.39).

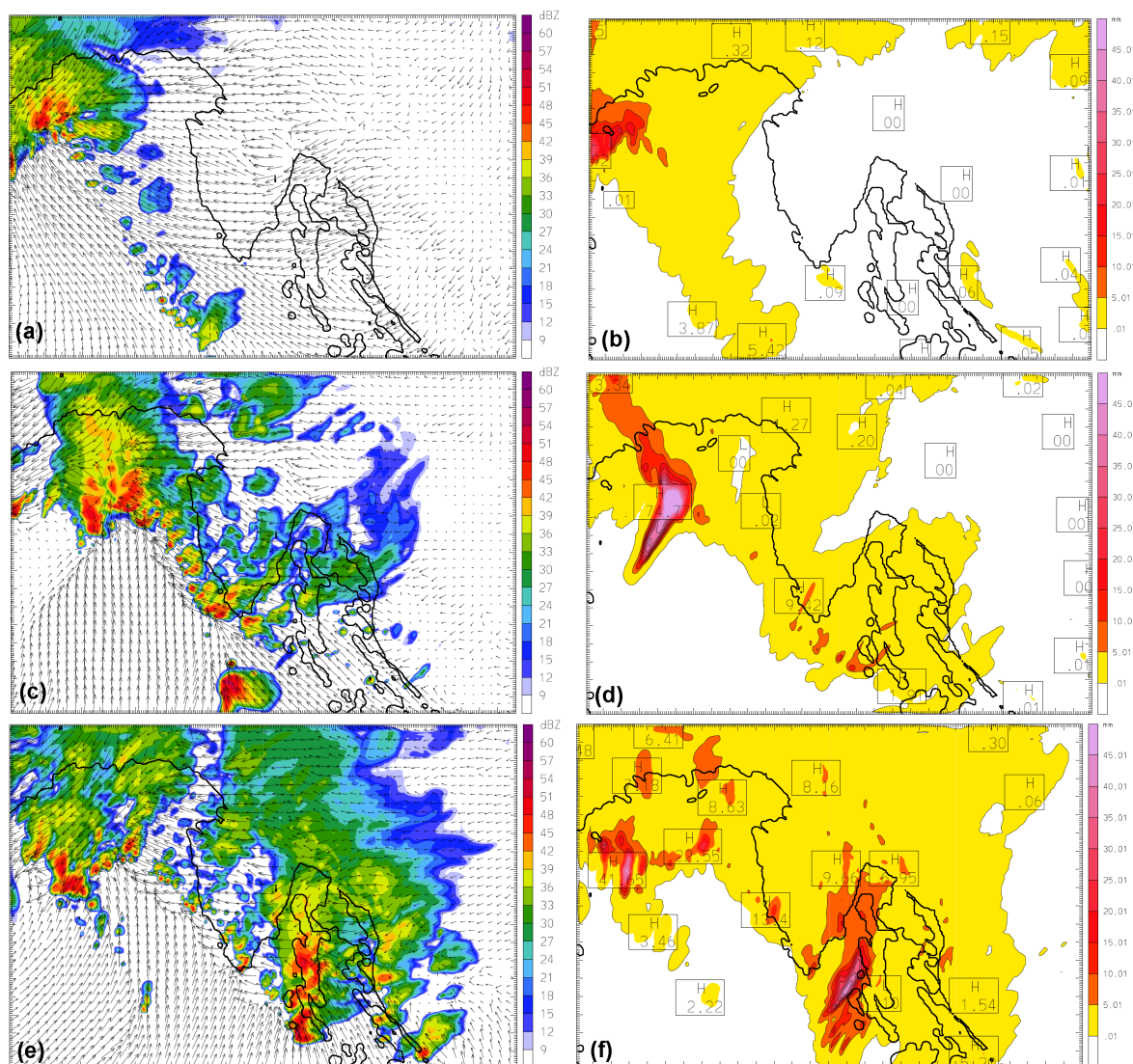
U vremenskom razdoblju od 23. do 24.05., na postaji Zračna luka Portorož, zabilježene su niže vrijednosti tlaka zraka (nije prikazano) te vrlo visoke vrijednosti relativne vlažnosti (slika 3.7d) tijekom jutarnjih sati i ranog poslijepodneva. Ovo je popraćeno padom temperature zraka koji ne pokazuje izraženi temperaturni hod i povećanom brzinom vjetra kao posljedicom prisustva mezoskalne ciklone. Ruža vjetra za obje zračne luke pokazuje dominaciju vjetra istočnih smjerova; na Zračnoj luci Portorož izmjena vjetra od ESE do ENE smjera te levant iznad Zračne luke Pula.



Slika 3.7: Prikaz(a) smjera (°) i (b) brzine vjetra (m/s), (c) temperature zraka (°C) te (d) relativne vlažnosti (%) na Zračnim lukama Portorož (plavo) i Pula (crveno) za razdoblje od 12:00 CET 23.05.2013. do 23:30 CET 24.05.2013.

Raspored strujanja prati sektore u mezoskalnoj cikloni s centrom (oko 999 hPa) smještenim nad sjevernim Jadranom koji se ne pomiče znatnije toga dana. Analizom modeliranih WRF polja uočava se puhanje vjetra istočnih smjerova (od sjeveroistočnog do jugoistočnog) nad područjem domene (što je u skladu sa slikom 3.7a). Tijekom vremena, na otvorenom moru, vjetar prelazi u južni i jugoistočni uzrokujući stvaranje sporadičnih Cb ćelija nad Istrom i Tršćanskim zaljevom (nije prikazano u radu). Tijekom noći stvara se veći sustav ćelija nad Tršćanskim zaljevom kojeg istočna struja odnosi prema Italiji (slika 3.8a) i koji se tijekom noći raspada. Ciklona kontinuirano stvara konvektivne ćelije; novi konvektivni sustav generira se na sjeverozapadu domene. Oko 03:30 CET zonu konvergencije na sjeveru stvara vjetar NE smjera (iza fronte), a na jugu domene jug-jugoistočnjak (ipred fronte) koji donose vlažan i nestabilan zrak. Na

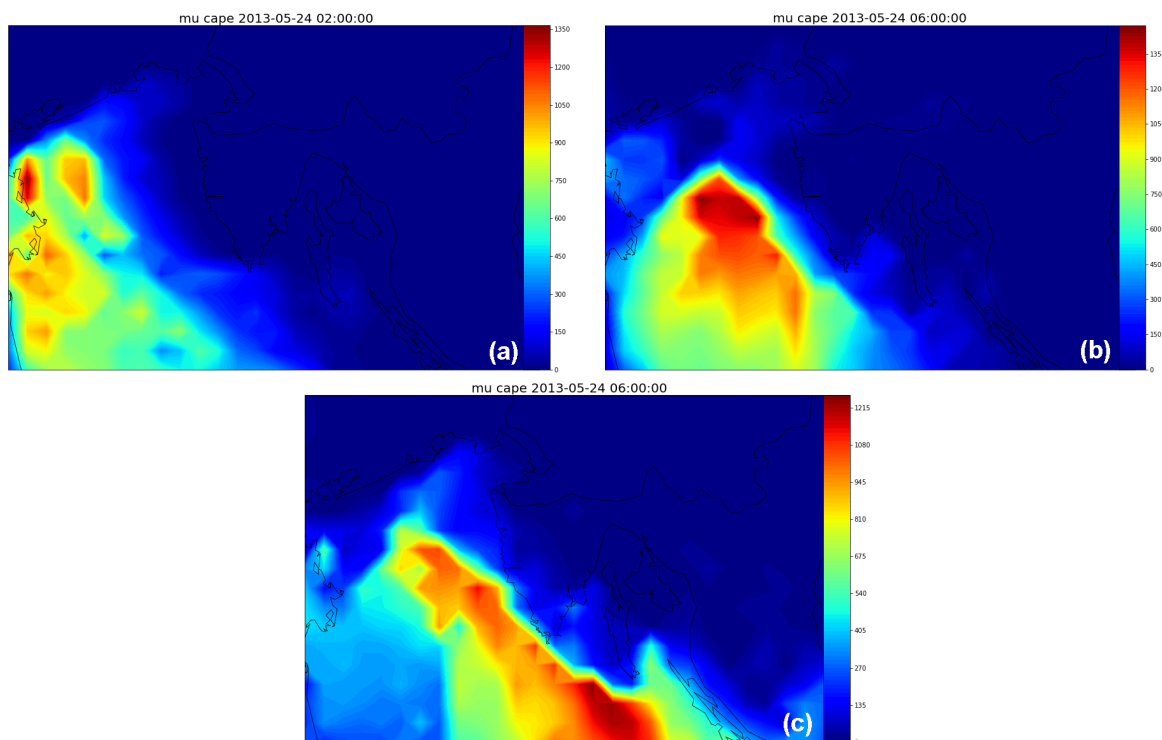
ovaj način se pospješuje dizanje i razvoj konvektivnih ćelija (slika 3.8c). U jutarnjim satima, sustavi se približavaju području interesa te ga oko 07:30 CET većinski prekriva, ali bez veće količine akumulirane satne oborine nad Istrom i Tršćanskim zaljevom (slika 3.8d, e). Tijekom narednog vremena konvektivni sustav prelazi preko otoka Cresa i Krka. Intenzitet sustava pozicioniranog na Cresu prelazi 48 dBZ uz značajnu akumuliranu satnu oborinu koja prelazi 40 mm. Tijekom ostatka dana dolazi do razvoja nekoliko ciklusa konvektivnih sustava koji prelaze područjem interesa.



Slika 3.8: (lijevo) Makimalni modelirani intenzitet refleksivnosti oblaka (dBZ) i polje strujanja (m/s) na 10-m visine iznad tla te (desno) ukupna količina oborine u zadnjih sat vremena (mm) iz modela WRF za 23.-24.05.2013. u tri termina: (a, b) 03:30 CET, (c, d) 07:30 CET i (e, f) 10:30 CET.

Tijekom ovog perioda prevladavala su sinoptička strujanja koja nisu omogućila razvoj lokalnog vjetra. Sustav sniženog polja tlaka zbog svoje strukture generira pojavu konvergencije vjetra duž fronti i omogućava stvaranje konvektivnih ćelija (prisilnom konvekcijom). Modelirane vrijednosti modela WRF u kombinaciji sa SHARPPy-jem daju prostornu raspodjelu indeksa nestabilnosti (slika 3.9). Sat vremena prije pojave tuče na zapadu domene, vrijednosti CAPE-a prelaze 600 Jkg^{-1} , a na mjestima dosežu vrijednost preko 1200 Jkg^{-1} (slika 3.9a) u toplom sektoru ciklone prije hladne fronte.

Kako vrijeme odmiče, vrijednosti CAPE indeksa se povećavaju idući od zapada prema istoku, a maksimum se postiže u 07:00 CET, kada CAPE prelazi 1400 Jkg^{-1} (slika 3.9b). Postizanjem ovih vrijednosti, vrijednosti CAPE-a slabe nad središtem domene, ali rastu na jugu dosežući vrijednosti oko 1200 Jkg^{-1} (slika 3.9c). Za razliku od prethodnog slučaja, CAPE ukazuje na vjerojatnost nastanka konvekcije sat vremena prije njenog formiranja. KI tijekom ovog perioda daje ranije indikacije za razvoj konvektivne aktivnosti nad područjem domene. Već sedam sati ranije, na većini područja na kojem je prognozirana tuča vrijednosti KI su veće od 28 (nije prikazano), a maksimalna vrijednost doseže 34. Prolaskom tuče, njegove vrijednosti slabe, ali nakon nekog vremena opet započinju rasti ukazujući na ponovno povećanje konvektivne aktivnosti. LI također ukazuje na potencijal za oluju nekoliko sati prije nego što je tuča prognozirana. Na većini područja vrijednosti LI su negativne ($LI \sim -2$), a na mjestima padaju i do -6 (nije prikazano u radu). Prolaskom tuče, vrijednosti LI rastu i postaju pozitivne. Sve je popraćeno pojavom električnog pražnjenja (slika 3.10a, b). Vidljivo je dobro prostorno slaganje između mjerenih i modeliranih podataka, iako model na mjestima precjenjuje potencijal za pojavu munja.

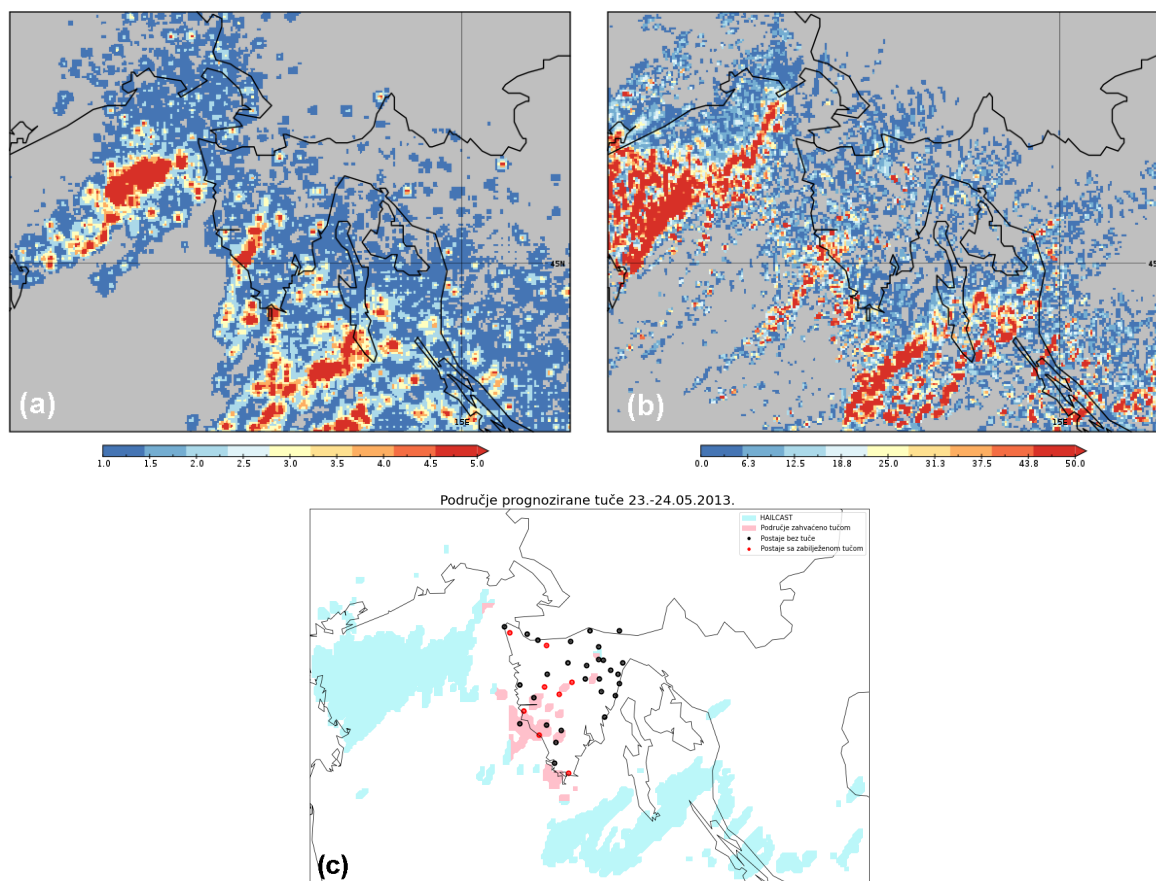


Slika 3.9: Prognozirane vrijednosti CAPE-a iz SharpPy u (a) 02:00 CET, (b) 07:00 CET te (c) 10:00 CET 24.05.2013. nad domenom d03.

Prikaz prostorne raspodjele prognozirane tuče nad područjem domene d03 tijekom vremenskog razdoblja od 12:00 CET 23.05.2013. do 00:00 CET 25.05.2013. dan je na slici 3.10c. Model je veći postotak tuče prognozirao nad područjem Jadranskog mora, a tek mali postotak nad Istrom i otokom Cresom. Unatoč tome, čak deset postaja je zabilježilo tuču u ovom periodu (tablica 3.4). Kao i u prethodnom slučaju napravljena je verifikacija prognoze pri čemu je dozvoljeno odstupanje od postaje koja je zabilježila tuču unutar radijusa 15 km (ružičasto označeno područje na slici 3.10c). Vrijednosti metrika (tablica 3.3) ukazuju na dobru prognozu modela.

Tablica 3.4: Tablični prikaz prognoziranog i zabilježenog vremena opažanja tuče.

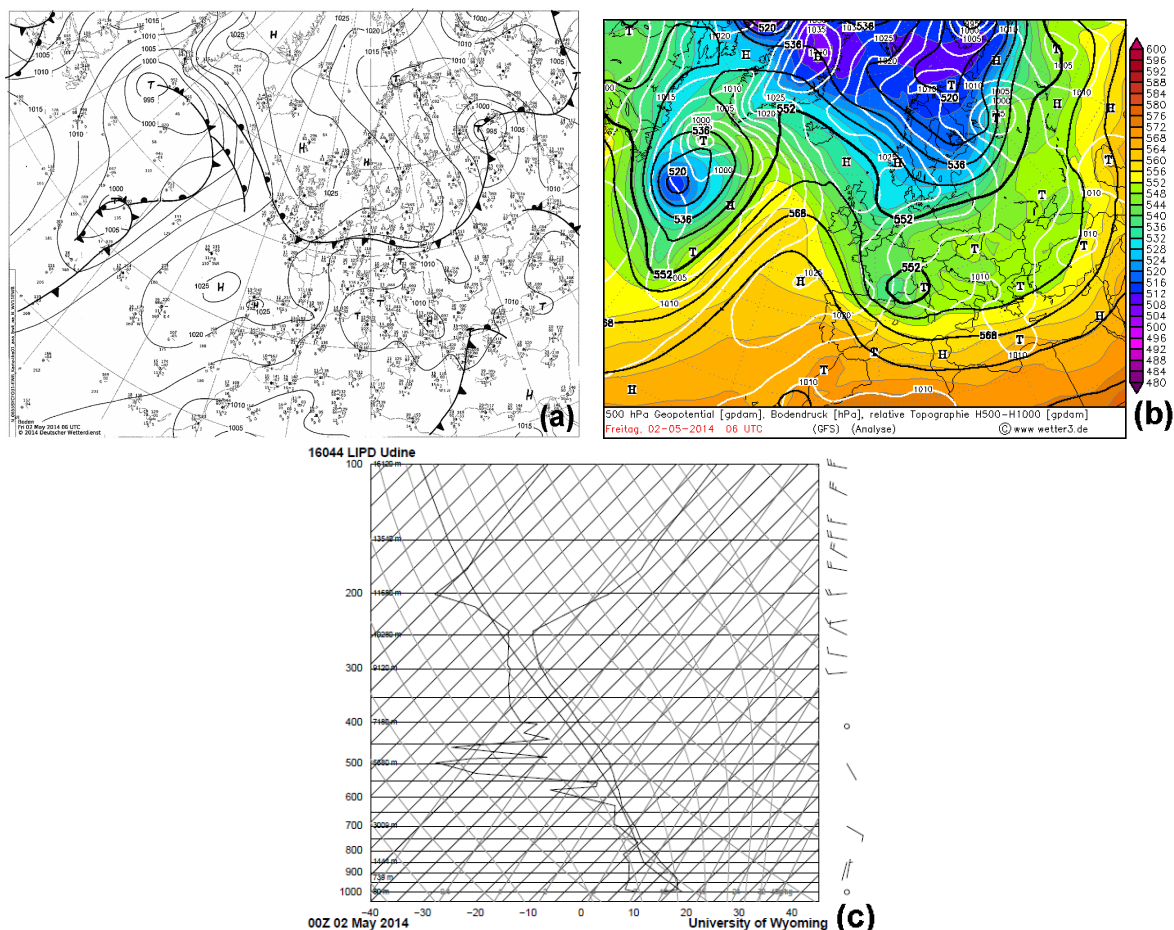
Lokacija	Prognozirano vrijeme tuče	Vrijeme opažanja tuče
Baderna	Nije prognozirano	6:00-12:00 CET
Barbriga	11:40 CET	10:10 CET
Filarija	Nije prognozirano	17:05 CET
Medulin	Nije prognozirano	6:00-12:00 CET
Pazin	17:20 CET	7:45 CET
Rovinj	11:10 CET	08:42 CET, 09:26 CET i 09:49 CET
Sveti Petar u šumi	16:20 CET	10:15 CET
Umag	Nije prognozirano	07:40 CET



Slika 3.10: Prostorna distribucija (a) akumuliranih 24-satnih mjenjenih udara munja iz LINET mreže, (b) akumuliranog 24-satnog modeliranog potencijala za munje (LPI [J/kg]) iz modela WRF za 24.05.2013. i (c) tuče u razdoblju od 12:00 CET 23.05.2013. do 00:00 CET 25.05.2013. Crni kružići označavaju mjerne postaje koje nisu zabilježile tuču, a crveni kružići mjerne postaje na kojima je tuča opažena. Tirkizna boja označava prostornu distribuciju akumulirane modelirane tuče WRF modelom, a ružičasto dozvoljeno odstupanje od postajekojaja je zabilježila tuču unutar radijusa od 15 km.

3.4 Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja: 02.05.2014.

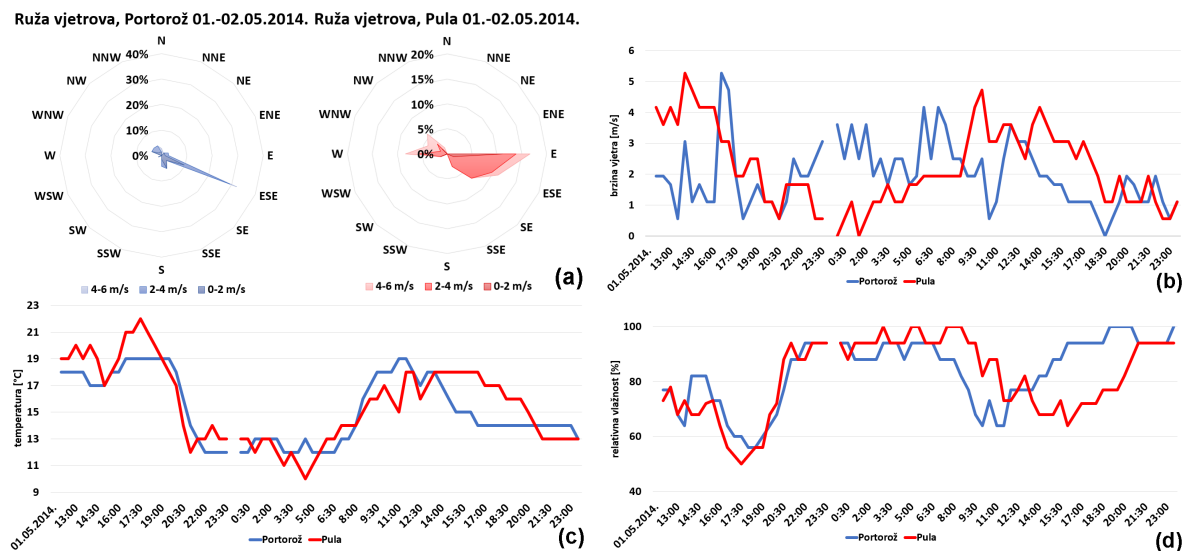
Od 01.05. do 03.05.2014. prema jugu Europe se spušta hladna fronta koja je dio sustava niskog tlaka čiji se centar nalazi na sjeveroistoku kontinenta (slika 3.11a). Prizemni ciklonalni sustav povezan je s dubokom visinskom dolinom koja se spušta od sjevera Starog kontinenta pa sve do obala sjeverne Afrike (slika 3.11b). Kombinacija ovih čimbenika utjecala je na nepovoljne vremenske prilike nad područjem Hrvatske i Italije, gdje su prema medijima⁴, zabilježene veće količine oborina, pojave grmljavinskih nevremena i tuče, te slučajevi tornada (Italija) i pijavica. Nestabilnost atmosfere se osjetila i u Sloveniji - mjerenja (METAR) na Zračnoj luci Portorož bilježe pojavu grmljavinskih nevremena. Vertikalni profil atmosfere nad Udinama, u noći 02.05.2014., dan je na slici 3.11c. Duž cijele visine atmosfere prevladava slab vjetar, a nema ni intenzivne promjene smjera vjetra po visini, što znači slabo smicanje. Ovi mirni uvjeti pogodovali su stvaranju sloja niskih oblaka na 770 hPa plohi. Vrijednost K indeksa ($KI = 26.90$) ukazuje na mogućnost nastanka grmljavinskog nevremena. Nulta vrijednost konvektivne raspoložive potencijalne energije ($CAPE = 0.00 \text{ Jkg}^{-1}$) i pozitivna vrijednost indeksa podizanja ($LI = 2.55$) pokazuju da se u ponoć konvekcija već počela razvijati.



Slika 3.11: (a) Prizemna dijagnostička i (b) visinska sinoptička karta Europe za 02.05.2014. 06:00 UTC (Izvor: www1.wetter3.de) te (c) termodinamički dijagram radiosondaže u Udinama u 00:00 UTC, 2.05.2014. (Izvor: <http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

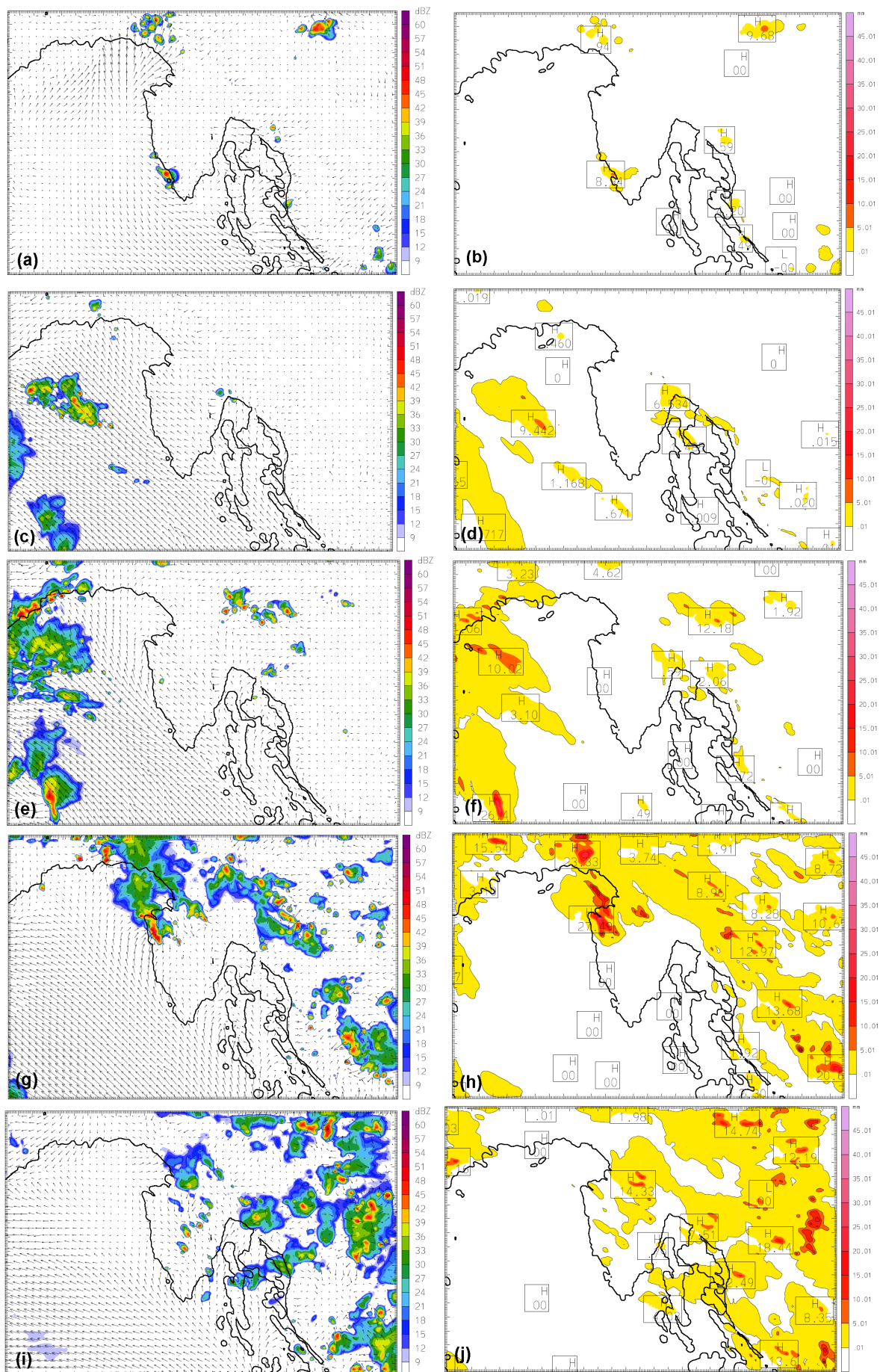
⁴Izvor: <https://www.crometeo.hr/supercelijski-oblak-s-katastrofalnom-tucom-pogodio-sjeverozapad-istre-foto/>

Tijekom vremenskog razdoblja 01.-02.05.2014., mjerna postaja Zračna luka Portorož zabilježila je niže vrijednosti tlaka, odnosno detekciju sustava sniženog tlaka zraka (nije prikazano) te vrlo visoke noćne vrijednosti relativne vlažnosti (slika 3.12d). Tijekom jutarnjih sati vlažnost počinje opadati te gubi 40% svoje vrijednosti u skladu s dnevnim hodom temperature. Ovo smanjenje je popraćeno povećanjem temperature i smanjenjem brzine vjetra (slika 3.12c, b). Smjer vjetra ukazuje na pretežno jugo-jugoistočno strujanje. Slični vremenski uvjeti su prevladavali i na Zračnoj luci Pula.



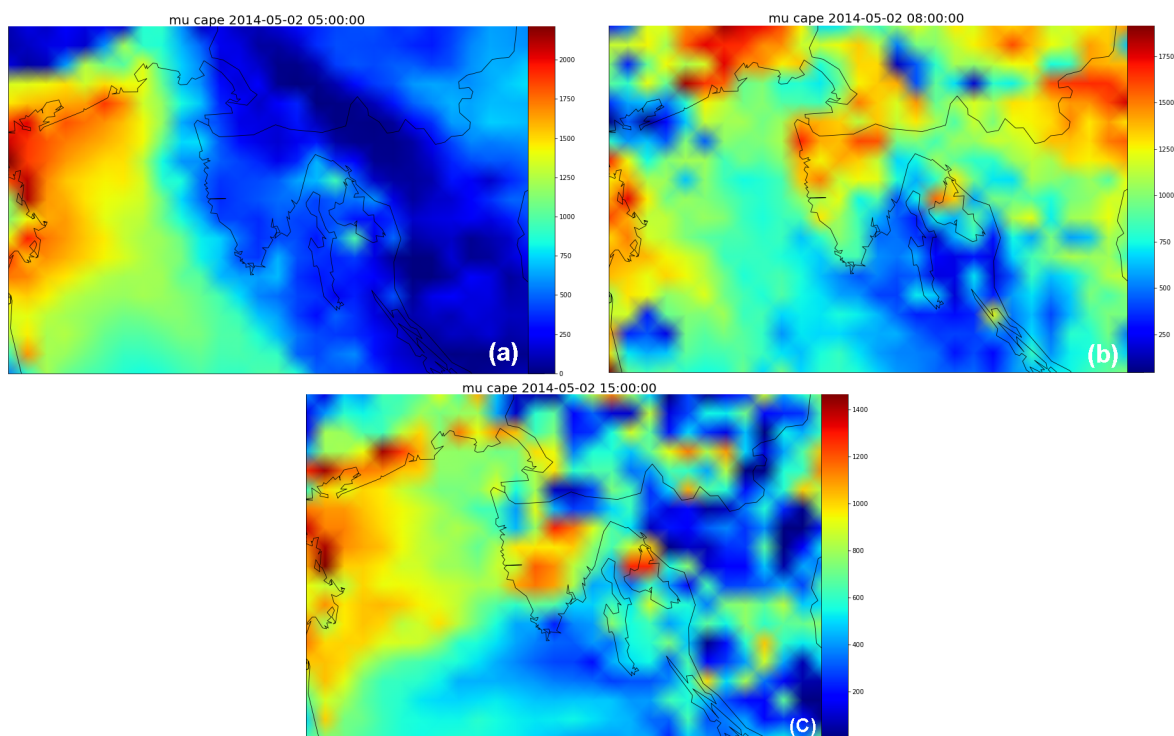
Slika 3.12: Grafički prikaz (a) smjera (°) i (b) brzine vjetra (m/s), (c) temperature (°C) te (d) relativne vlažnosti (%) na Zračnim lukama Portorož (plavo) i Pula (crveno) za razdoblje od 12:00 CET 01.05.2010. do 23:30 CET 02.05.2014.

Modelirane vrijednosti vjetra ukazuju na prevladavanje strujanja prema obali jugozapadnog smjera uz sjevernu obalu Jadrana, a sjeverozapadnjaka na jugu domene u popodnevnim satima 01.05.2014. godine. Relativno slabi gradijenti prizemnog tlaka omogućuju razvoj termički generiranog vjetra u polju sniženog tlaka zraka bilo zbog diskontinuiteta kopno-more bilo uz padine planina. S vremenom područje sjeverozapadnjaka zamjenjuju jugo i jugozapadnjak. Ovi vjetrovi donose vlažan zrak koji potpomaže stvaranje mjestimičnih Cb ćelija nad sjevernom i južnom obalom Istre (slika 3.13a). Tijekom ovog perioda iznad mora se detektira područje povećane vrijednosti CAPE-a i toka latentne topline (nije prikazano). U ranojutarnjim satima 02.05.2014. nad morem raste brzina vjetra koji pretežno puše iz smjera jugoistoka naznačujući približavanje ciklone i donoseći vlažan zrak hrani sustav konvektivnih ćelija koje dolaze iz smjera sjeveroistočne Italije (nije prikazano). Tijekom narednih sati dolazi do stvaranja novog ciklusa kovektivnog sustava lociranog nad sjeverozapadnim područjem interesa (slika 3.13c). Intenzitet ovog sustava prelazi 48 dBZ, a praćen je i značajnom akumuliranom satnom oborinom koja prelazi 30 mm što ukazuje na moguću pojavu tuče nad ovim područjem. Ipak, nad Istrom nema razvijenog konvektivnog sustava osim jedne lokalne kratkotrajne Cb ćelije uz zapadnu obalu što bi približno odgovaralo položaju postaje Baderna (tablica 3.1).



Slika 3.13: (lijevo) Makimalni modelirani intenzitet reflektivnosti oblaka (dBZ) i polje strujanja (m/s) na 10-m visine iznad tla te (desno) ukupna količina oborine u zadnjih sat vremena (mm) iz modela WRF za 01.-02.05.2014. u četiri termina: (a, b) 18:00 CET 01.05.2014., (c, d) 08:00 CET, (e, f) 09:00 CET, (g, h) 14:00 CET i (i, j) 17:00 CET 02.05.2014.

Brzina prevladavajućeg juga opada od zapada prema istoku od 10 m/s uz talijansku obalu do 4-6 m/s uz obalu Istre. Kako je razlika temperature u korist kopna (ono je toplije od mora za oko 5 °C) te uz slabe gradijente prizemnog tlaka, na sinoptičko strujanje se superponiraju termički generirana strujanja. Vjetar struji prema kopnu duž zapadne istarske obale i prema Tršćanskom zaljevu tvoreći divergenciju strujanja. Takav režim strujanja popraćen povećanom CAPE (slika 3.14) i smicanjem vjetra (oko 8 m/s u prvih 6 km) rezultirao je lokalnim Cb ćelijama na području Portoroža i uz padine Ćićarije. Prema podacima dobivenim koristeći Sharppy i WRF, polja indeksa nestabilnosti na područje domene d03 pokazuju potencijal za oluju već nekoliko sati prije prognozirane tuče. U 05:00 CET CAPE na zapadu domene prelazi vrijednosti od 1000 Jkg^{-1} , a na mjestima i 2000 Jkg^{-1} . Niže vrijednosti (CAPE 500 Jkg^{-1}) su prognozirane na području Istre i Tršćanskog zaljeva (slika 3.14a). Kroz narednih par sati ove vrijednosti se povećavaju na području cijele domene, a vrijednosti nad Istrom su dvostruko veće nego nad Tršćanskim zaljevom (nije prikazano). U 08:00 CET (sat vremena prije prognozirane tuče), sjever i sjeverozapad Istre poprimaju maksimalne vrijednosti CAPE-a ($> 1500 \text{ Jkg}^{-1}$) dok su nad Tršćanskim zaljevom vrijednosti znatno manje (slika 3.14b). Nakon toga, vrijednosti ovog indeksa lagano opadaju, ali ostaju veće od 750 Jkg^{-1} do ranih poslijepodnevni sati.

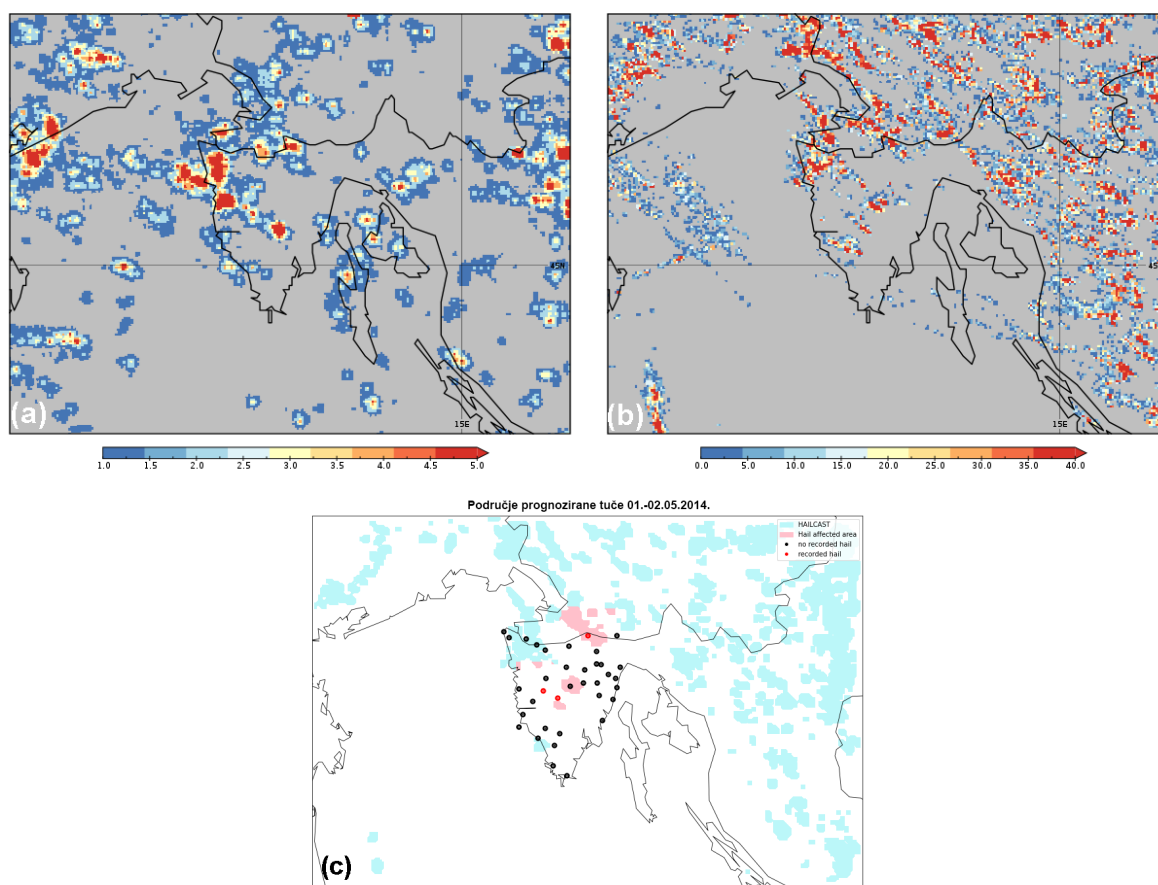


Slika 3.14: Prognozirane vrijednosti CAPE-a iz Sharppy WRF-a u (a) 05:00 CET, (b) 08:00 CET i (c) 15:00 CET 02.05.2013. nad domenom d03.

Vrijednosti KI su visoke nad cijelom domenom nekoliko sati pred dolazak prognozirane tuče na područje interesa (nije prikazano). Maksimum (KI > 32) se nalazi nad središnjim dijelom sjevernog Jadrana. Područje Istre i Tršćanskog zaljeva imaju nešto niže vrijednosti (KI ~ 30). Neposredno pred tuču vrijednosti su niže, ali i dalje ukazuju na mogućnost nastanka grmljavinskog nevremena, pogotovo na jugu Istre. U narednim satima model prognozira povećanje vrijednosti KI nad sjeverom Istre i Tršćanskog zaljeva, dok na jugu vrijednost opada. Maksimalna vrijednost se postiže u 10:00 CET nad sjeverozapadom Istre (sat vremena prije prognoziranog drugog ciklusa tuče).

Tablica 3.5: Tablični prikaz prognoziranog i zabilježenog vremena opažanja tuče.

Lokacija	Prognozirano vrijeme tuče	Vrijeme opažanja tuče
Baderna	nije prognozirano	08:00 CET
Sveti Petar u Šumi	16:00 CET	16:00 CET
Vodice	10:00 CET	14:00 CET



Slika 3.15: Prostorna distribucija (a) akumuliranih 24-satnih mjerenih ukupnih udara munja iz LINET mreže, (b) akumuliranog 24-satnog modeliranog potencijala za munje (LPI [J/kg]) iz modela WRF za 02.05.2014. i (c) tuče u razdoblju od 12:00 CET 01.05.2014. do 00:00 CET 03.05.2014. Crni kružići označavaju mjerne postaje koje nisu zabilježile tuču, a crveni kružići mjerne postaje na kojima je tuča opažena. Tirkizna boja označava prostornu distribuciju akumulirane modelirane tuče WRF modelom, a ružičasto dozvoljeno odstupanje od postajekoja je zabilježila tuču unutar radijusa od 15 km.

Poput prethodnih indikatora oluje, indeks podizanja ukazuje na nestabilno stanje atmosfere na zapadu domene. S vremenom mu vrijednosti postaju negativnije i poprima minimalnu vrijednost ($LI = -5$) sat vremena prije prognozirane tuče nad područjem sjeverozapadne Istre (nije prikazano). Nad Tršćanskim zaljevom i u unutrašnjosti Istre vrijednost indeksa je nešto viša ($LI = -3$). Vrijednosti ostaju negativne do kasnih

poslijepodnevnih sati.

Modelirani potencijal za munje pokazuje izraženiju električnu aktivnost ($\sim 40 \text{ Jkg}^{-1}$) nad Tršćanskim zaljevom, sjeverozapadom i središnjim dijelom Istre (slika 3.15b). Unatoč mjestimičnim podcjenjivanjima i precjenjivanjima potencijala, prognoza se u ukupnosti dobro podudara s mjerenjem ukupnih munja iz LINET mreže (slika 3.15a). Mjesta sa zabilježenim sijevanjem se preklapaju s mjestima na kojima je model prognozirao tuču u razdoblju od 12:00 CET 01.05.2014. do 00:00 CET 03.05.2014. (slika 3.15c).

Prema prognozi, tuča je zahvatila dio Tršćanskog zaljeva, sjeverozapadnu Istru te okolicu Pazina, mjesta za koja su i indeksi nestabilnosti pokazali najveći potencijal za nastanak oluje. Tijekom ovog razdoblja, tri mjerne postaje su zabilježile događaj tuče (tablica 3.5). Kao i u prethodnim slučajevima, u sklopu procesa verifikacije, izračunate su kategoričke metrike (tablica 2.4). Njihove vrijednosti (tablica 3.3) upućuju da je prognoza modela lošija u odnosu na prethodne dvije, a razlog može biti vrlo sporadičan i povremen razvoj konvektivnih ćelija nad poručjem Istre.

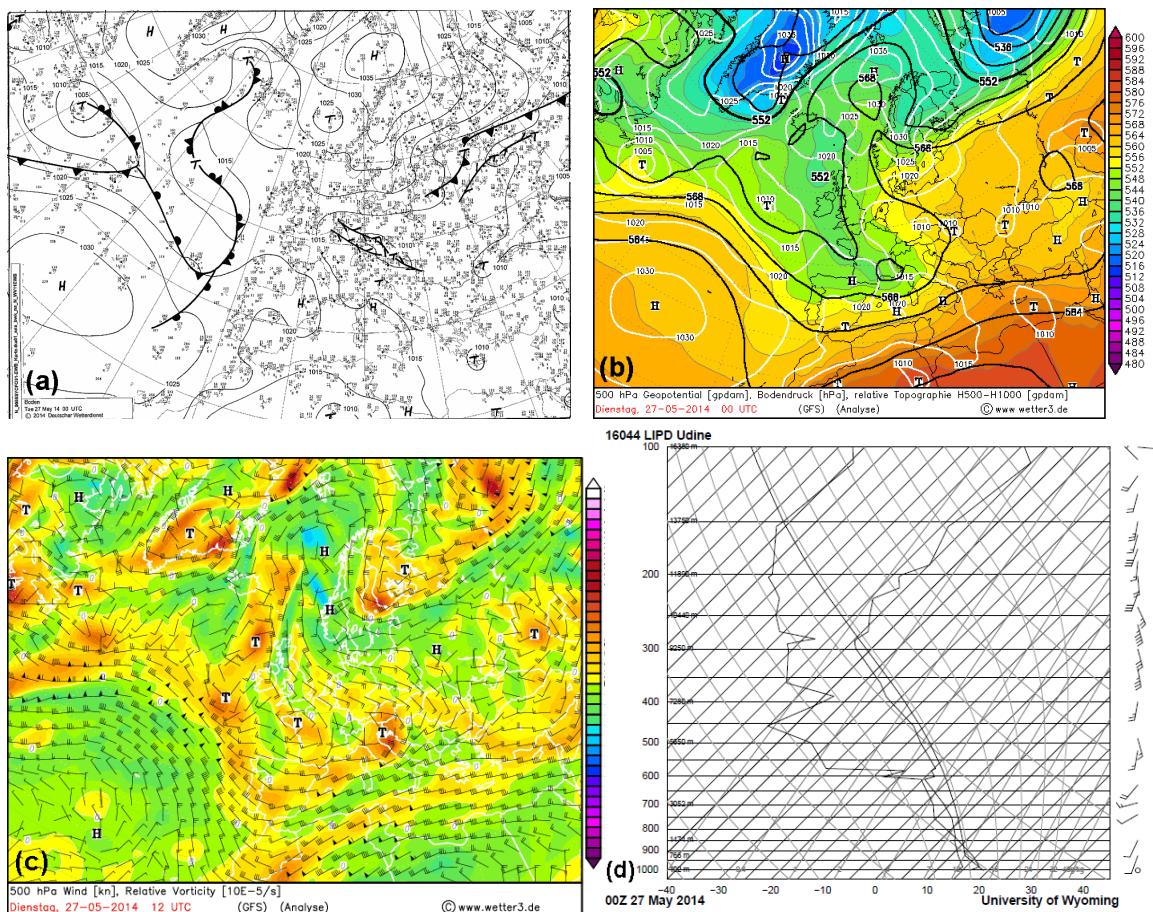
3.5 Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja: 27.05.2014.

Na području Hrvatske 27.05.2014. zabilježeni su olujni vremenski uvjeti; u rano jutro, jako grmljavinsko nevrijeme s tučom zahvatilo je područje središnje i sjeverozapadne Istre⁵. Ovi vremenski uvjeti uzrokovani su dubokom visinskom dolinom u polju tlaka koja se premještala preko Europe prema istoku (slika 3.16). Nad Istrom prevladavaju relativno slabi gradijenti u prizemnom polju tlaka zraka do 07:00 CET 27.05.2014., a nakon toga započinje povećanje gradijenta prizemnog tlaka, zbog približavanja centra niskog tlaka zraka smještenog sjeverozapadno od Istre. Sustav niskog tlaka zraka vidljiv je u srednjim slojevima atmosfere kao visinska ciklona oko čije se južne strane kreće jaka mlazna struja (slika 3.16c). Tijekom ovog perioda radiosondažna mjerenja pokazuju dominaciju južne struje zraka koje donosi vlažan i relativno nestabilan zrak na područje interesa.

Radiosondažni profil nad Udinama 27.05.2014. u 00:00 CET (slika 3.16d) ukazuje na blago zakretanje vjetra po visini s linearnim porastom brzine od 5 m/s u prizemnim slojevima do 23 m/s u slobodnoj troposferi. Slab vjetar u graničnom sloju i topla noć pogodovali su razvoju naoblake u nižim slojevima troposfere. Uz spomenute parametre, vrijednosti indeksa nestabilnosti ($\text{CAPE} = 626.4 \text{ Jkg}^{-1}$, $\text{KI} = 31.50$, $\text{LI} = -1.76$) također ukazuju na nestabilno stanje atmosfere s velikom mogućnošću razvoja grmljavinskog nevremena. Tijekom narednih 12 sati, vrijednosti ovih indeksa su se tek blago snizile, a sam vertikalni profil ukazuje na veliku količinu vlage, kao i znatan vertikalni razvoj oblaka (nije prikazano u radu).

Tijekom vremenskog razdoblja od 26. do 27.05.2014., na postaji Zračna luka Portorož (Slika 3.17) zabilježene su niže vrijednosti tlaka, visoke noćne vrijednosti relativne vlažnosti, relativno neometanim temperaturnim hodom. Brzine vjetra su relativno male ispod 4 m/s do 07:00 CET 27.05.2014., a nakon toga rastu do 7-8 m/s.

⁵Izvori: (i) Meteorološki i hidrološki bilten DHMZ-a, (ii) <https://www.crometeo.hr/olujni-utorak-foto/>

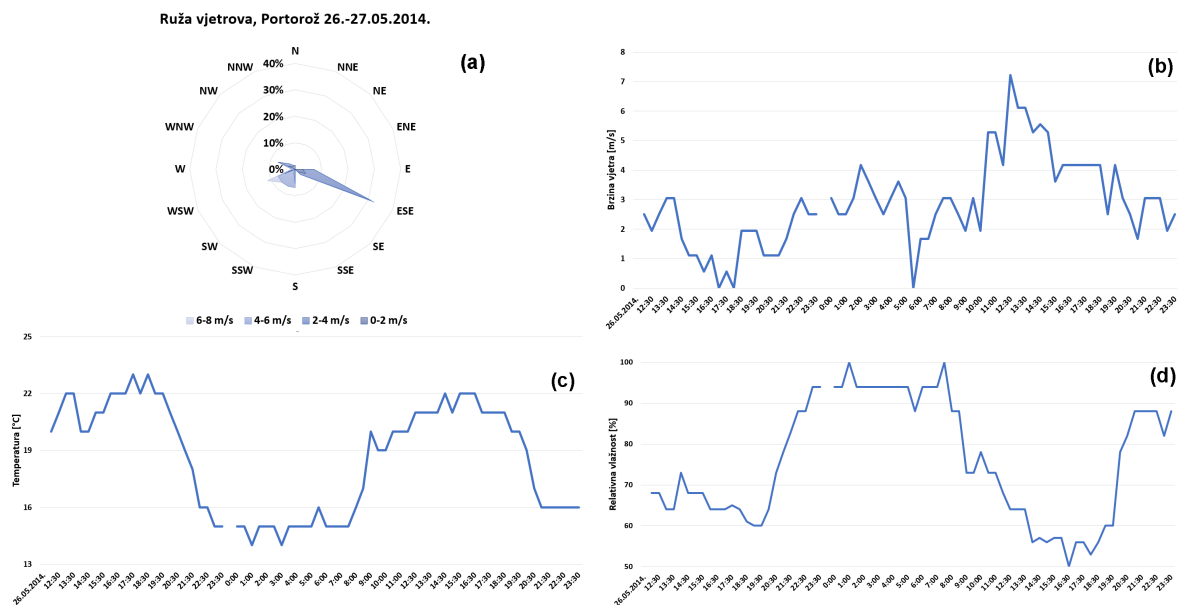


Slika 3.16: (a) Prizemna dijagnostička i (b) visinska sinoptička karta Europe. (c) Mlazna strujana 500 hPa plohi i relativna vrtložnost nad Europom (osjenčeno) za 27.05.2014. 00:00 UTC (Izvor:www1.wetter3.de). (d) Radiosondažni profili nad Udinama u 00:00 UTC, 27.05.2014. (Izvor: <http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)

Podaci za Zračnu luku u Puli nisu bili dostupni.

Prema modeliranim vrijednostima vjetra, u podnevnim satima 26.05.2014. vjetar je slab do umjeren (do 8 m/s) varijabilnih smjerova ovisno o području domene. Uz obalu vjetar je naobalnog smjera te predstavlja superpoziciju termički generiranog strujanja i sinoptičkog vjetra. Uz istočnu jadransku obalu varijabilni vjetar (sjeverozapadnog do jugozapadnog smjera) potpomaže stvaranje i razvoj više manjih konvektivnih sustava nad područjem Tršćanskog zaljeva i sjeverozapadne Istre (slika 3.18a, b). Navedeni sustavi su na područje interesa donijeli obilnu akumuliranu satnu količinu oborina (do 24 mm). Dublje u unutrašnjosti vjetar je također dosta varijabilan i po smjeru i magnitudama zbog utjecaja topografije.

Tijekom vremena, na otvorenom moru, vjetar prelazi u južni i jugozapadni, bez znatnije konvektivne aktivnosti, ali uz pojavu kopnenjaka iznad Istre (slika 3.18c). Pomicanjem doline, stvaraju se novi manji konvektivni sustavi koji se pak advekcijom SW vjetra približavaju području interesa. U narednim satima uočavaju se zone konvergencije koje uzrokuju spajanje i jačanja ova dva sustava. Intenzitet novonastalog sustava prelazi 48 dBZ, a na mjestima i 60 dBZ, uzrokujući obilnu količinu akumulirane satne oborine (i do 57 mm) malo iznad Tršćanskog zaljeva (slika 3.18e, f). Ovo je popraćeno povećanjem toka latentne topline (nije prikazano). U jutarnjim satima, sustav slabi, no dolazi do



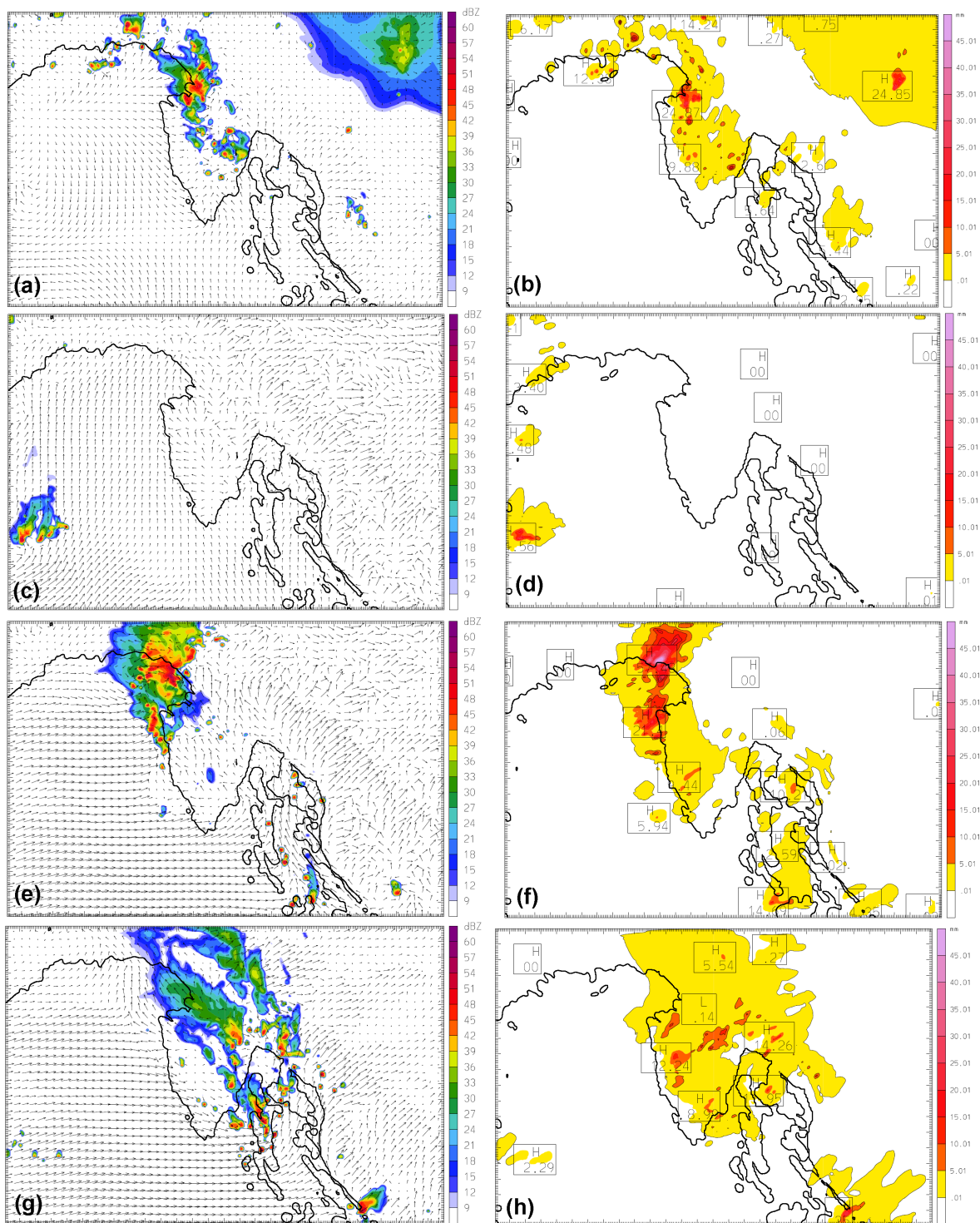
Slika 3.17: Prikaz (a) smjera ($^{\circ}$) i (b) brzine vjetra (m/s), (c) temperature ($^{\circ}$ C) te (d) relativne vlažnosti (%) na Zračnoj luci Portorož za razdoblje od 12:00 CET 26.05.2014. do 23:30 CET 27.05.2014.

stvaranja sporadičnih ćelija, ali i novog sustava na području Kvarnerskih otoka i zaleđu Rijeke (slika 3.18g, h).

Rijetke informacije o vrijednostima indeksa nestabilnosti u Udinama upotpunjene su vrijednostima dobivenim modelima WRF i SharpPy. Prema njima, u 21:00 CET (26.05.2014.) nad Jadranskim morem vrijednosti CAPE-a prelaze 1000 Jkg^{-1} , a maksimum vrijednosti uočava se na jugozapadnom dijelu domene gdje dosežu vrijednosti veće 2500 Jkg^{-1} . Istovremeno, vrijednosti na kopnu su niske i ne ukazuju na potencijal razvoja konvektivne oluje (slika 3.19a). U narednim satima vrijednosti CAPE-a rastu, a oko ponoći vrijednosti CAPE-a nad površinom Istre prelaze 1000 Jkg^{-1} , a slične vrijednosti su prognozirane i nad Tršćanskim zaljevom. Maksimalna vrijednost ($> 2000 \text{ Jkg}^{-1}$) je locirana nad morskom površinom (slika 3.19b). Za naredni period model predviđa blagi pad pa ponovni rast vrijednosti CAPE-a. Maksimumi se uočavaju u 06:00 CET (27.05.2014.) nad područjem interesa što je prikazano na slici 3.19c. Vrijednosti ekstrema nad Istrom su 1600 Jkg^{-1} , a nad Tršćanskim zaljevom $\sim 1000 \text{ Jkg}^{-1}$.

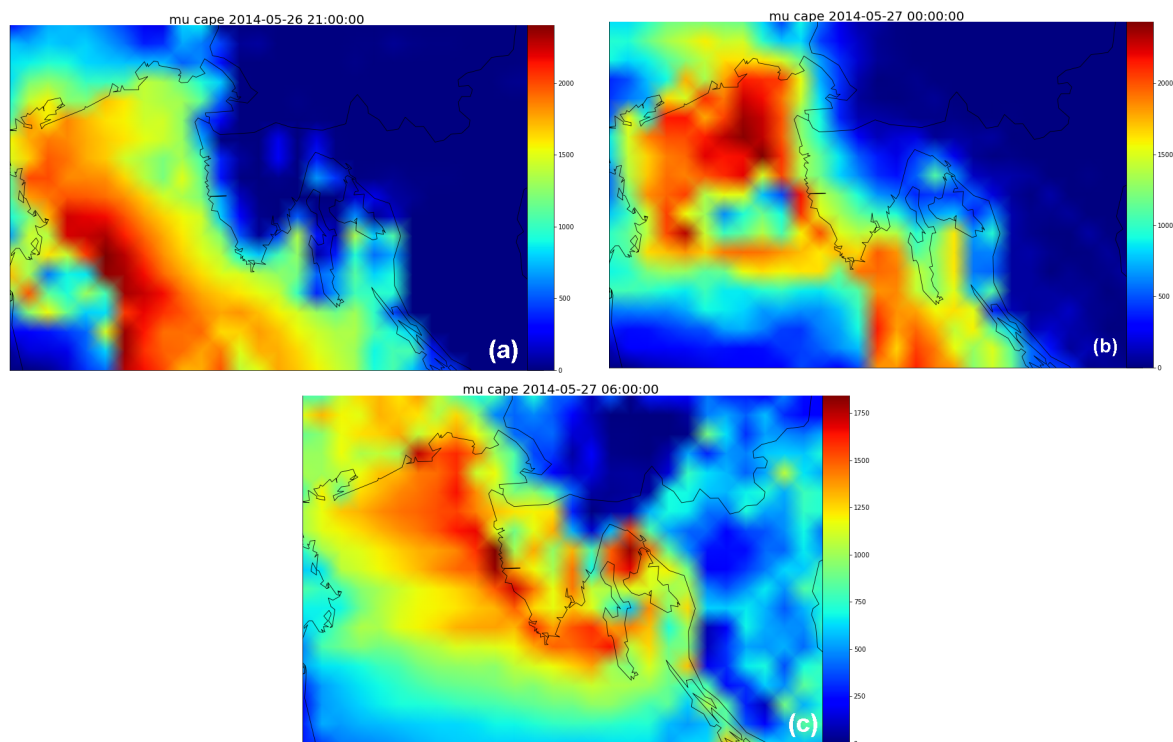
Slično kao i CAPE, vrijednosti LI i KI potvrđuju veći potencijal za razvoj konvektivne aktivnosti nad morem. U 20:00 CET vrijednosti KI su maksimalne na jugozapadnom dijelu domene i dosižu vrijednost 35, a nad područjem Istre i Tršćanskog zaljeva variraju između 20 i 26 (nije prikazano). Nad istim područjem vrijednosti LI su minimalne ($LI \leq -5$), a nad kopnom prelaze u pozitivne vrijednosti. Tijekom narednih sati vrijednosti indeksa se počinju ukazivati na mogućnost razvoja konvektivne aktivnosti nad područjem interesa, a slabe na zapadu. Maksimalne vrijednosti KI se postižu u 04:00 CET i one nad Tršćanskim zaljevom iznose 33, a na zapadnoj obali Istre 36. Vrijednosti LI u ovo vrijeme tek padaju ispod nule, a minimum dostižu tek u 06:00 CET ($LI \sim -4$) nad područjem interesa. U narednim satima, vrijednosti KI indeksa padaju, a indeksa podizanja rastu i postaju pozitivne (nije prikazano).

Kao i u prethodnim slučajevima, model na mjestima precjenjuje/podcjenjuje



Slika 3.18: (lijevo) Makimalni modelirani intenzitet refleksivnosti oblaka (dBZ) i polje strujanja (m/s) na 10-m visine iznad tla te (desno) ukupna količina oborine u zadnjih sat vremena (mm) iz modela WRF za 26.-27.05.2014. u četiri termina: (a, b) 14:30 CET, (c, d) 22:00 CET 26.05.2014., (e, f) 04:00 CET i (g, h) 07:00 CET 27.05.2014.

potencijal za munje. No, unatoč tomu, mjerene vrijednosti broja munja iz LINET mreže (slika 3.20a) dobro se poklapaju s prognozom akumuliranog potencijala za munje iz modela WRF (slika 3.20b). Mjesta sa zabilježenim sijevanjem se preklapaju sa mjestima na kojima je model prognozirao tuču u razdoblju od 12:00 CET 26.05.2014. do 00:00 CET 28.05.2014. (slika 3.20c).

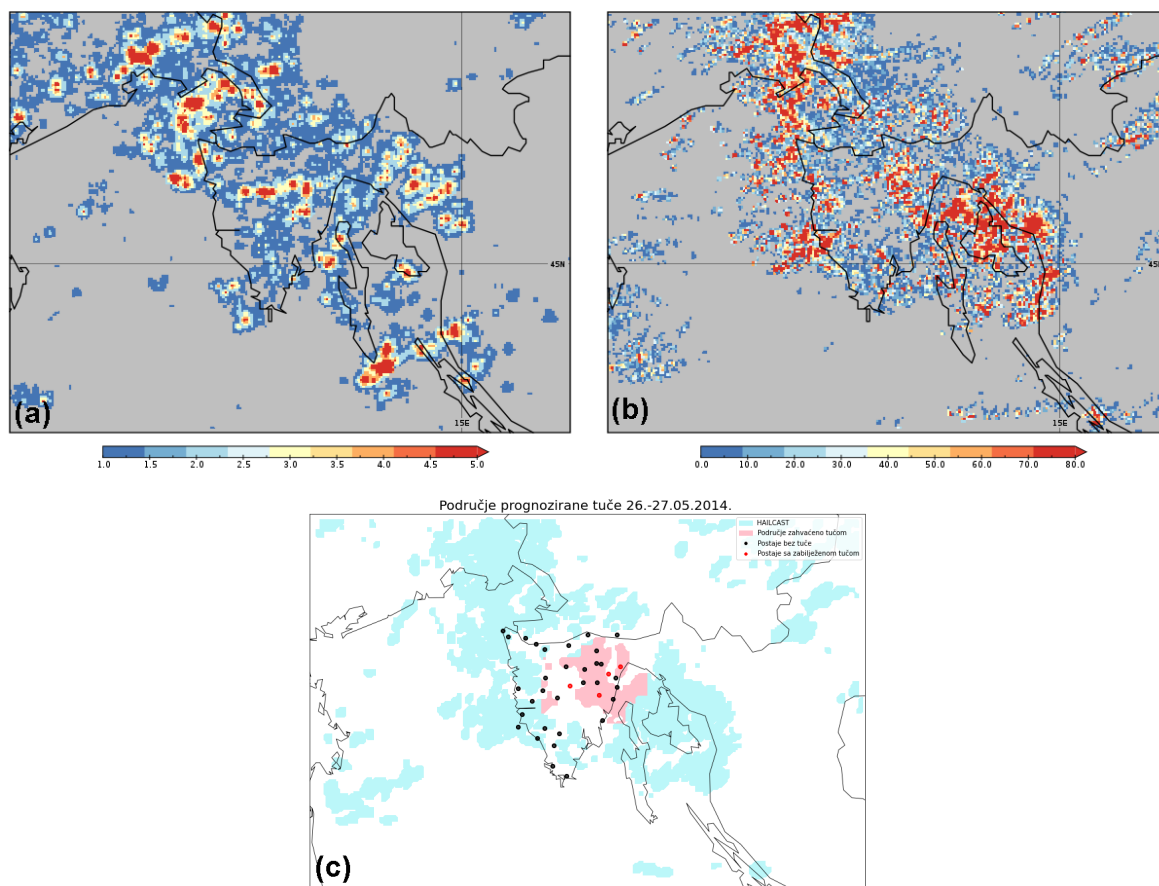


Slika 3.19: Prognozirane vrijednosti CAPE-a iz SharpPy WRF-a u (a) 00:00 CET 26.05.2014, (b) 00:00 CET i (c) 06:00 CET 27.05.2014. nad domenom d03.

Tablica 3.6: Tablični prikaz prognoziranog i zabilježenog vremena opažanja tuče.

Lokacija	Prognozirano vrijeme tuče	Vrijeme opažanja tuče
Čepić	09:30 CET	10:15 CET
Pazin	nije prognozirano	09:20 CET
Vela Učka	nije prognozirano	10:45 CET
Veprinac	10:00 CET	14:22 CET

Model je u razdoblju od 12:00 CET 26.05.2014. do 00:00 28.05.2014. prognozirao pojavu tuče nad Tršćanskim zaljevom i većim područjem Istre. No, mjerenja pokazuju da su četiri postaje zabilježile događaj tuče (tablica 3.6). Vrijednosti kategoričkih metrika izračunatih u sklopu procesa verifikacije (tablica 3.3) upućuju na dobru prognozu modela unatoč većem iznosu FAR metrike.

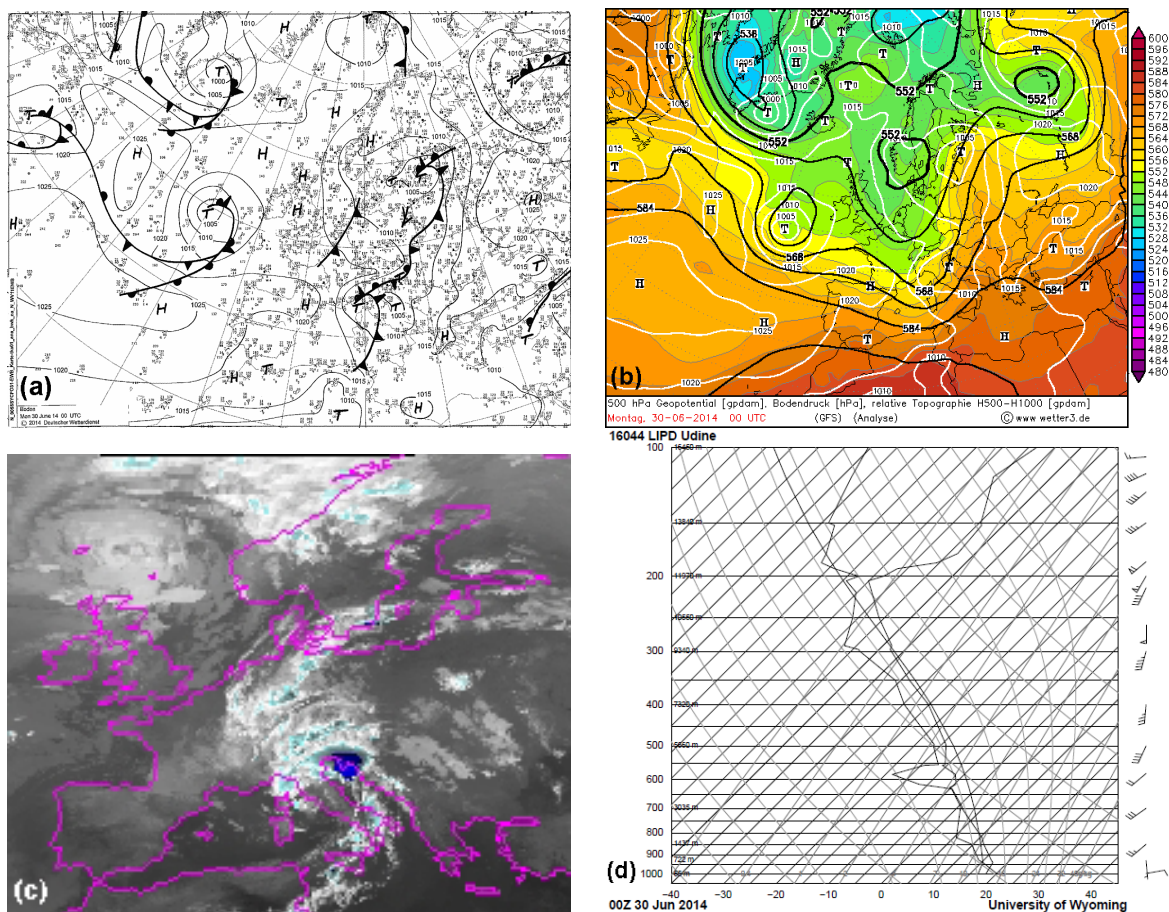


Slika 3.20: Prostorna distribucija (a) akumuliranih mjenjenih ukupnih munja iz LINET mreže, (b) akumuliranog modeliranog potencijala za munje (LPI) iz modela WRF za 27.05.2014. i (c) tuče u razdoblju od 12:00 CET 26.05.2014. do 00:00 CET 28.05.2014. Crni kružići označavaju mjerne postaje koje nisu zabilježile tuču, a crveni kružići mjerne postaje na kojima je tuča opažena. Tirkizna boja označava prostornu distribuciju akumulirane modelirane tuče WRF modelom, a ružičasto dozvoljeno odstupanje od postaje koja je zabilježila tuču unutar radijusa od 15 km.

3.6 Sinoptička i mezoskalna analiza slučaja: 30.06.2014.

Posljednji analizirani slučaj obuhvaća vremensko razdoblje od 12:00 UTC 29.06. do 00:00 UTC 01.07.2014. godine. Tijekom ovog razdoblja preko područja interesa se premještala Geonovska ciklona i pripadna hladna fronta (slika 3.21a) koja je uzrokovala znatan pad temperature na području Jadrana. Prizemni ciklonalni sustav povezan je s dubokom visinskom dolinom koja se narednih dana spušta s područja Skandinavije prema obalama sjeverne Afrike (slika 3.21b). Radiosondažna mjerenja pokazuju dominaciju južnog strujanja koje donosi vlažan i nestabilan zrak na područje interesa (slika 3.21c) te uzrokuju stvaranje većeg oblačnog sustava (slika 3.21d).

Radiosondažna mjerenja nad Udinama ukazuju na nestabilnost atmosfere već od ponoći 29.06.2014. Vertikalni profil atmosfere u tom trenutku pokazuje podudaranje iznosa temperature rosišta i temperature česti sve do srednjih slojeva atmosfere (nije prikazano), a južni vjetar, koji s visinom prelazi u jak zapadnjak, donosi vlažan i nestabilan zrak. Uz sve navedeno, vrijednosti indeksi nestabilnosti ($CAPE = 619.6 \text{ Jkg}^{-1}$; $KI = 38.3$; $LI = -3.42$) govore da su svi preduvjeti za nastanak duboke konvekcije

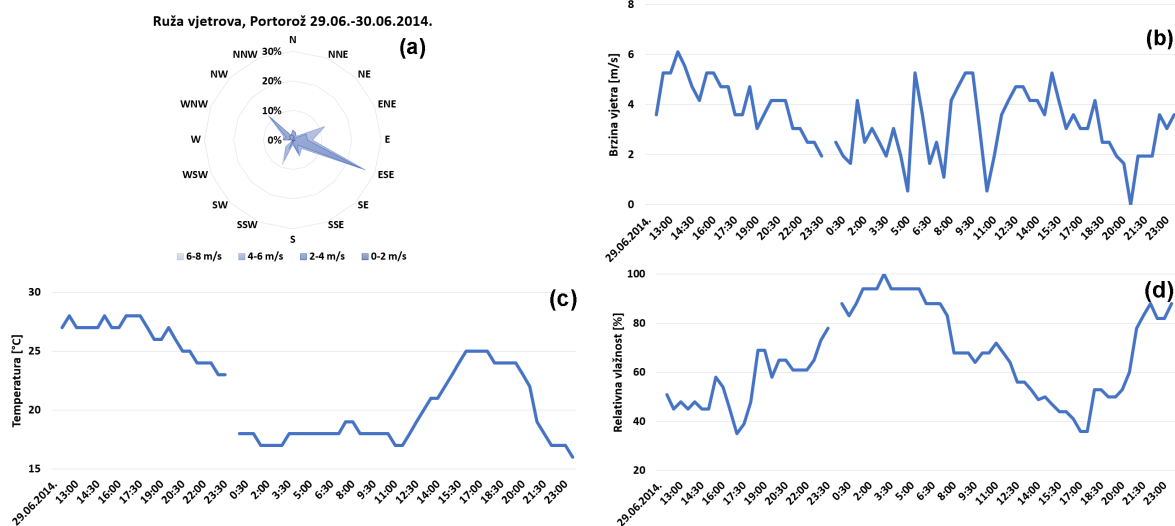


Slika 3.21: (a) Prizemna dijagnostička i (b) visinska sinoptička karta Europe za 30.06.2014. 00:00 UTC (Izvor:www1.wetter3.de). (c) Satelitska snimka atmosfere nad Europom u 03:00 UTC, 30.06.2014. (Izvor: <https://www.ncdc.noaa.gov/gibbs/>). (d) Radiosondažni profil nad Udi-nama u 00:00 UTC, 30.06.2014. (Izvor: <http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)

zadovoljeni. Tijekom narednog perioda, stanje atmosfere i vrijednosti indeksa nestabilnosti su se mijenjale. Vertikalni profil atmosfere nad istim područjem u 00:00 UTC, 30.06.2014. pokazuje južno strujanje koje nastavlja donositi vlažan i nestabilan zrak (slika 3.21d). Brzina strujanja linearno raste s visinom od 5 m/s u donjim slojevima troposfere do 30 m/s u slobodnoj troposferi. Vrijednosti CAPE-a ($= 426.9 \text{ Jkg}^{-1}$) i KI ($= 35.30$) su se smanjile, a vrijednost LI ($= -1.44$) se povećala. Unatoč ovoj promjeni podaci ukazuju na nestabilnu atmosferu i mogućí razvoj jake konvekcije.

Dostupni podaci METAR za mjernu postaju Zračna luka Portorož pokazuju niže vrijednosti tlaka tijekom vremenskog razdoblja od 29. do 30.06.2014. (nije prikazano). Specifična obilježja vremenskih uvjeta na postaji su smanjena dnevna amplituda temperature uz maksimalnu temperaturu od $25 \text{ }^\circ\text{C}$, zadržavanje visokih iznosa relativne vlažnosti preko dana te velike oscilacije u magnitudi brzine vjetera (slika 3.22). Prevladavajući smjer vjetera je istok-jugoistok koji dolaskom fronte jača i prelazi u buru iz ENE smjera koja ne dopušta značajniji razvoj termički generiranih strujanja na obali. Podaci za Zračnu luku Pula nisu bili dostupni.

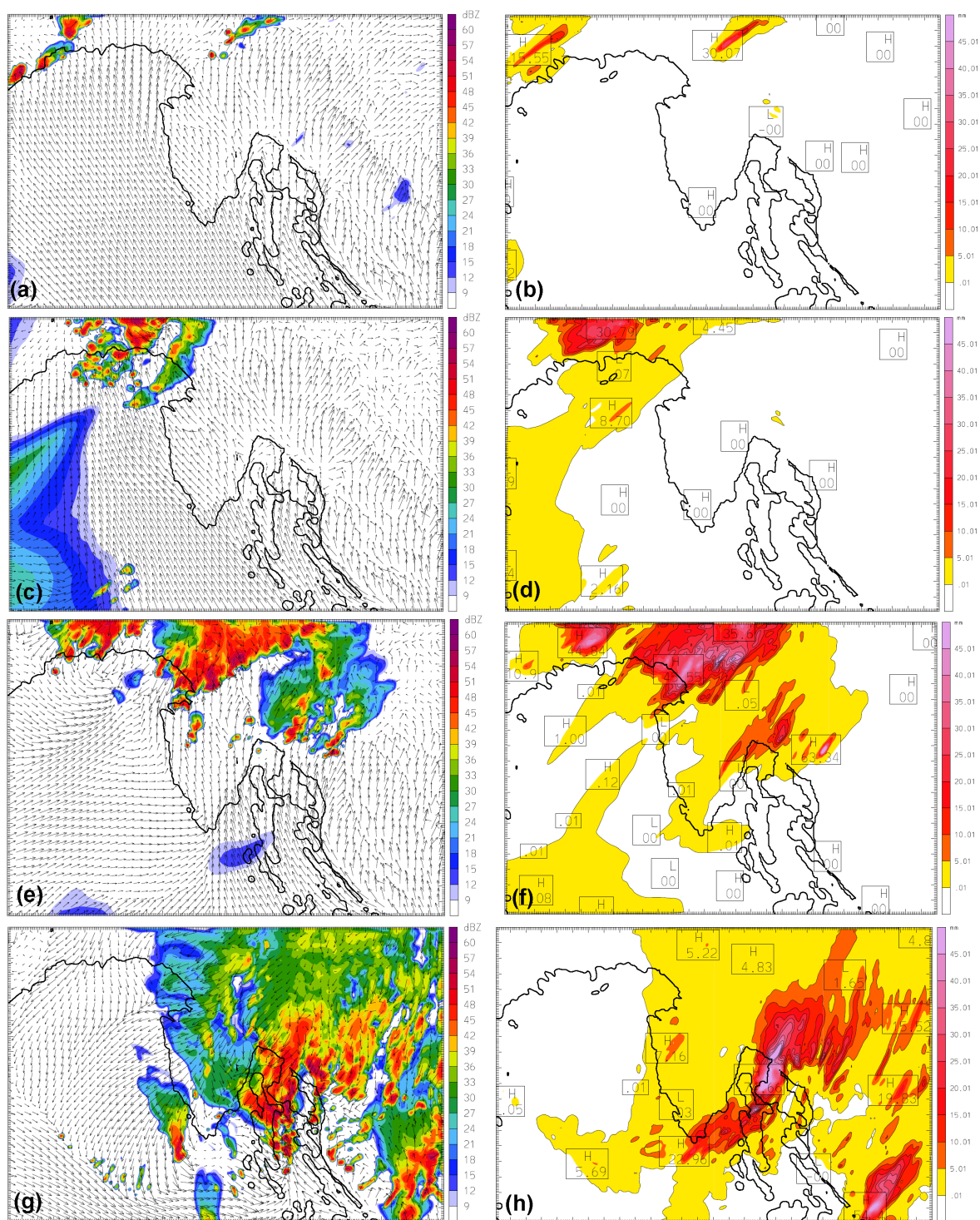
Prema modeliranim poljima u podnevnim satima 29.06.2014. dominira jugoistočno i jugozapadno strujanje te se stvaraju mjestimične Cb ćelije na području domene, ali bez značajnije količine oborine (slika 3.23a, b). Tijekom narednih sati, ove ćelije se



Slika 3.22: Grafički prikaz (a) smjera (°) i (b) brzine vjetra (m/s), (c) temperature (°C) te (d) relativne vlažnosti (%) na Zračnoj luci Portorož za razdoblje od 12:00 CET 29.06.2014. do 23:30 CET 30.06.2014.

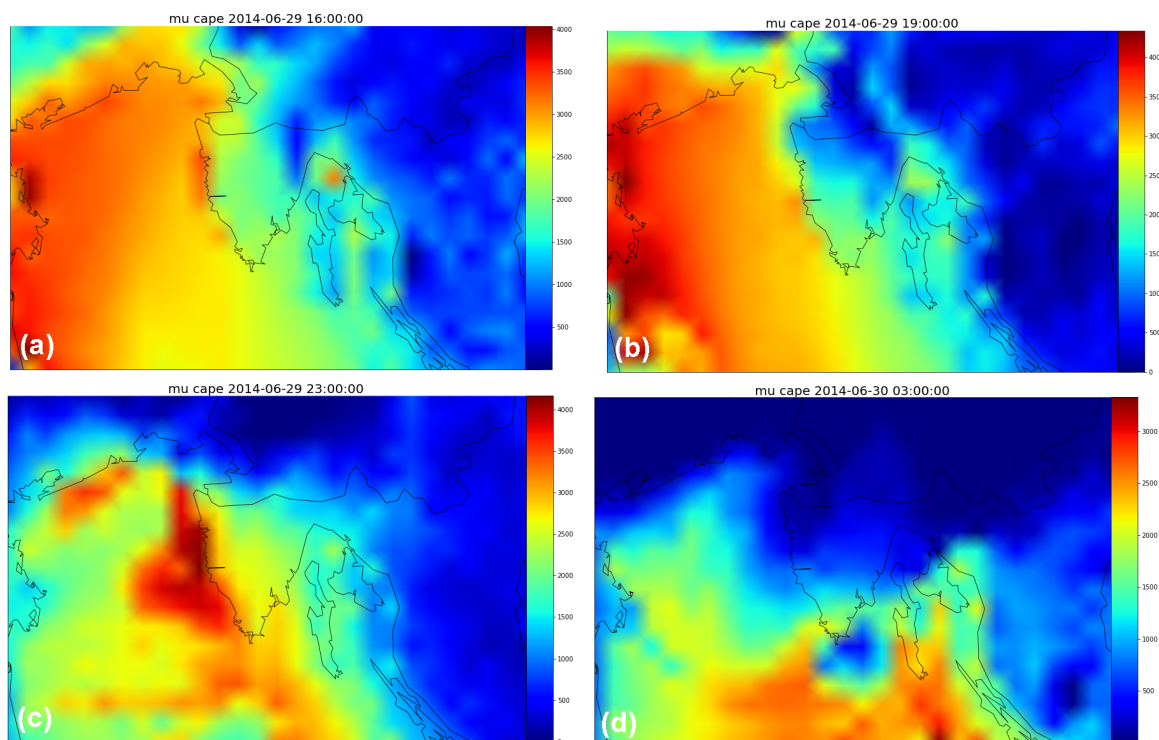
spajaju i čine veći sustav čiji intenzitet prelazi 48 dBZ, i uzrokuju veću akumuliranu satnu količinu oborine (36 mm) (nije prikazano). Tijekom narednih sati, topli i vlažni jugoistočni vjetar omogućuje razvijanje i jačanje konvektivnih sustava od kojih se jedan nalazi zapadno od Tršćanskog zaljeva, a drugi na području sjeverne Italije. Iako intenzitet potonjeg sustava doseže 57 dBZ, akumulirana količina oborine je 23 mm (nije prikazano). U 21:00 CET, prema modeliranim podacima prevladava jugoistočnjak koji i dalje "hrani" ćelije vlažnim i toplim zrakom omogućujući njihov daljnji razvoj. Satna količina oborine je 31 mm, a intenzitet oblačnog sustava u blizini granice Italije i Slovenije prelazi 48 dBZ što bi moglo ukazivati na tuču (slika 3.23c, d). Tijekom narednih sati, dolaskom fronte, vjetar na sjeveru duž planinskih usjeka prelazi u buru te dolazi do stvaranja zone konvergencije u blizini Tršćanskog zaljeva gdje se susreću južni i sjeveroistočni vjetar. Ovo je popraćeno znatnom akumuliranom oborinom unutar sat vremena nad kopnom na sjeveru domene (80 mm) (nije prikazano). Na istočnoj obali Tršćanskog zaljeva bilježi se značajna količina oborine u 00:30 CET 30.06.2014. Intenzitet radarskog odraza oblačnog sustava nad ovim područjem prelazi 48 dBZ, a akumulirana satna količina oborine je 45 mm. Sustav se zadržava nad područjem interesa u narednim satima, a prolaskom fronte nad većim dijelom domene bura zamjenjuje smicanje iz južnih smjerova. Oko 05:30 većina Istre, Tršćanski zaljev i Kvarner su obuhvaćeni sustavom koji na mjestima doseže intenzitet 60 dBZ i praćen je značajnom akumuliranom satnom oborinom koja prelazi 70 mm (slika 3.23g, h). Tek iza 08:00 CET superćelija prelazi preko područja Istre i spušta se prema unutrašnjosti države.

Potencijal za oluju nad područjem interesa uočava se već četiri sata prije prognozirane tuče (nije prikazano). Prema podacima iz WRF-a u 12:00 CET, vrijednost CAPE-a nad Tršćanskim zaljevom je 1500 Jkg^{-1} , na jugu Istre 2500 Jkg^{-1} , a na jugu domene, nad morem prelazi 3000 Jkg^{-1} . Istovremeno, vrijednosti KI su veće nad kopnom ($\text{KI} \geq 30$), nego nad morem ($\text{KI} \leq 26$). LI također ukazuje na mogućnost razvoja oluje. Njegove vrijednosti nad većinom domene su niske ($\text{LI} \leq -5$), a na mjestima dosežu vrijednosti -7.5 . Neposredno pred pojavu tuče na području interesa vrijednosti CAPE-a rastu ($\text{CAPE} > 3000 \text{ Jkg}^{-1}$) što je prikazano na slici 3.24a. Vrijednosti LI su izrazito niske u ovom vremenskom trenutku ($\text{LI} \sim -7.5$), no vrijednosti KI su oko 30 (nije prikazano).



Slika 3.23: (lijevo) Makimalni modelirani intenzitet refleksivnosti oblaka (dBZ) i polje strujanja (m/s) na 10-m visine iznad tla te (desno) ukupna količina oborine u zadnjih sat vremena (mm) iz modela WRF za 29.-30.06.2014. u četiri termina: (a, b) 18:30 CET, (c, d) 21:00 CET 29.06.2014., (e, f) 00:30 CET i (g, h) 05:30 CET 30.06.2014.

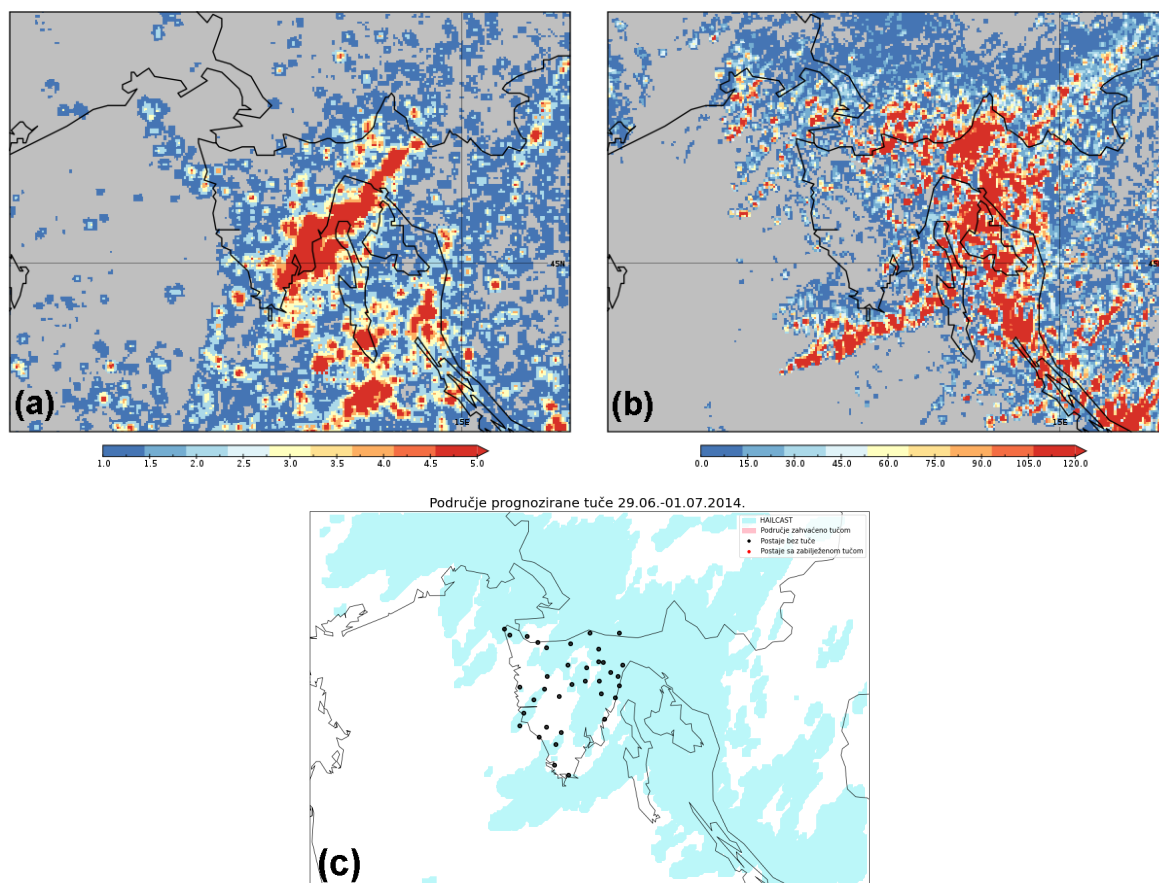
U narednim satima vrijednosti indeksa nestabilnosti nastavljaju ukazivati na veliku vjerojatnost razvoja konvektivne oluje, a oko 17:00 CET većina domene poprima vrijednosti KI iznad 33. U isto vrijeme zabilježena je maksimalna vrijednost CAPE-a nad Tršćanskim zaljevom ($CAPE \sim 3200 \text{ Jkg}^{-1}$). Tijekom narednih sati, CAPE nad ovim područjem slabi te u 19:00 CET područje interesa prema prognozi modela bilježi vrijednosti od 2000 Jkg^{-1} , dok je CAPE 3500 Jkg^{-1} na morskoj površini zapadno od Istre. Ostala



Slika 3.24: Prognozirane vrijednosti CAPE-a iz Sharppy WRF-a u (a) 16:00 CET, (b) 19:00 CET, (c) 23:00 CET 29.06.2014. te (d) 03:00 CET 30.06.2014. nad domenom d03.

dva indeksa nestabilnosti se ponašaju slično kao i CAPE. KI nad područjem otvorenog mora i Tršćanskog zaljeva doseže vrijednost 35, a nad kopnom je nešto niža, oko 32. LI je negativan nad cijelim područjem interesa. Četiri sata kasnije, potencijal za oluju je izrazito velik; CAPE doseže vrijednosti 4000 Jkg^{-1} (slika 3.24c), KI 38, a vrijednosti LI padaju ispod -10. U ranojutarnjim satima vrijednosti CAPE-a počinju slabiti idući od sjevera prema jugu (slika 3.24d). Sve je popraćeno pojavom sijevanja (slika 3.25a, b).

Iako je model prognozirao tuču nad područjem interesa, ista nije zabilježena mjerenjima. Umjesto nje, zabilježene su pojave pijavica kod Novigrada oko 09:00 CET. Zbog navedenog razloga nije bilo moguće provesti proces verifikacije jer bi prilikom izračuna metrika (tablica 3.3) došlo do dijeljenja s nulom. U ovom slučaju može se reći da je model prognozirao nestabilnost atmosfere i konvektivnu aktivnost, no ne i samu pojavu tuče.



Slika 3.25: Prostorna distribucija (a) akumuliranih 24-satnih mjerenih ukupnih udara munja iz LINET mreže, (b) akumuliranog 24-satnog modeliranog potencijala za munje (LPI [J/kg]) iz modela WRF za 30.06.2014 i (c) tuče u razdoblju od 12:00 CET 29.06.2014. do 00:00 CET 01.07.2014. Crni kružići označavaju mjerne postaje koje nisu zabilježile tuču, a crveni kružići mjerne postaje na kojima je tuča opažena. Tirkizna boja označava prostornu distribuciju akumulirane modelirane tuče WRF modelom, a ružičasto dozvoljeno odstupanje od postajekojaja je zabilježila tuču unutar radijusa od 15 km.

Zaključak

Kako se (zapadna) Hrvatska nalazi na području koje je, naročito u ljetnim mjesecima, izloženo čestim pojavama grmljavinskih oluja, interes za njeno istraživanje se povećao kroz zadnjih desetak godina. Nedavno izrađena klimatologija tuče omogućila je izradu dnevnih i godišnjih hodova dana i događaja tuče za dvije skupine postaja nad Istrom (Jelić *et al.*, 2020.). U dnevnom hodu broja događaja tuče u unutrašnjosti Istre javlja se hod tipičan za kontinentalne postaje s popodnevnom maksimumom koji može biti posljedica dnevnog ciklusa zagrijavanja. S druge strane, razlozi nastajanja (rano)jutarnje povećane aktivnosti nisu toliko očite. Zbog toga se u ovom radu željelo ostvariti dva cilja. Jedan je bio provjera uspješnosti reprodukcije prikaza tuče i potencijala za razvoj munja čime bi se dobila prihvatljivo simulirana konvekcija u području interesa i time upotpunila informacija o prostorno-vremenskom razvoju konvekcije. Drugi cilj je bio na temelju numeričkih simulacija analizirati doprinose procesa sinoptičke skale i mezoskale u nastanku konvekcije te time dobiti bolji uvid u njenu dinamiku.

Prilikom odabira slučajeva (njih pet), korištena su dva kriterija: (i) pojava tuče ili pijavice u ranojutarnjim ili prijepodnevnim satima te (ii) dobra dokumentiranost u mjerenjima. Za svaki odabrani slučaj analizirani su sinoptički i mezoskalni uvjeti koji su prevladavali nad područjem interesa u danom vremenskom razdoblju. Sinoptičke situacije analizirane su na temelju prizemnih i visinskih karata polja tlaka zraka i radiosondažnih mjerenja s postaje Udine (Italija). Svi događaji tuče zabilježeni su dok je nad područjem interesa prevladavao sustav niskog tlaka povezan s dubokom visinskom dolinom. Prizemno, podaci s mjerne postaje Zračna luka Portorož ukazuju na prevladavajuće strujanje iz smjerova jugoistok te istok-jugoistok tijekom analiziranih vremenskih razdoblja. Dostupna prizemna mjerenja sa Zračne luke Pula ukazuju na prevladavajuće istočno strujanje u dva slučaja, a u jednom slučaju je jednako zastupljeno strujanje iz smjerova (i) juga, (ii) jugoistoka i (iii) istok-sjeveroistoka. Daljnom analizom je utvrđeno da je u tri slučaja (S1, S2 i S5) sinoptičko strujanje nad Istrom onemogućilo znatniji razvoj termički-generiranog strujanja mezo- β i mezo- γ -skale (proces dimenzija od 2 km do 100 km; Thunis i Bornstein, 1996). U slučajevima S3 (smorac) i S4 (kopnenjak) razvoj termički-generiranog vjetra imao je kroz superpoziciju s pozadinskim vjetrom veće skale utjecaj na razvoj konvekcije. Glavna je posljedica stvaranje niza značajnih zona konvergencije u polju strujanja. Jedan od češćih utjecaja bio je onaj izazvan strujanjem koje je dolazilo s kopna na more bez obzira radi li se o mezoskalnom strujanju male (kopnenjak) ili veće skale (bura) iznad konkavne obale Tršćanskog zaljeva. Osim toga, poluotok Istra učestalo modificira strujanje iz južnog u jugoistočni smjer zbog oblika obale. Time su se stvorili uvjeti za stvaranje prizemne konvergencije vjetra koja pospješuje stvaranje/održavanje konvektivnih ćelija. Za analizu nekoliko razmatranih indeksa nestabilnosti (CAPE, KI i LI) u području zahvaćenom tučom korišten je mezoskalni numerički model WRF. Za sve slučajeve, indeksi nestabilnosti su prešli prag koji ukazuje na mogućnost razvoja konvekcije. Tijekom nekih slučajeva (npr. S5), potencijal za oluju je bio izrazito velik, dok je za druge (npr. S4) bio niži, ali i dalje unutar kritičnog intervala. Zbog izrazite lokaliziranosti tuče, prilikom procesa verifikacije izračunate su kategoričke metrike, kao mjere pouzdanosti modela, koje izuzev za slučaj S5 ukazuju na dobru prognozu modela.

Dobiveni rezultati sugeriraju da su za pojavu ranojutarnje tuče nad područjem Tršćanskog zaljeva i Istre odgovorni uglavnom sinoptički ili uvjeti mezo- α -skale. Manji

mezoskalni procesi, poput cirkulacije obronka i obalne cirkulacije, razvili su se sporadično u nekim slučajevima, a njihov je učinak bio vidljiv kroz superpoziciju učinaka mezoskalne dinamike i sinoptičkih procesa. Također se pokazalo da je utjecaj oblika obalne linije (koju onda prati i diskontinuitet u raspodjeli kopna i mora) te visina topografije također važan kod generiranja lokalnih meteo-uvjeta za razvoj tuče. Mezoskalni učinak mogao bi se izdvojiti primjenom filtra koje je opisao Barnes (1973.), a proveli Xu *et al.* (2016.) uz pomoć testova osjetljivosti. Time se ohrabruje nastavak analiza kroz dodatne slučajeve koji bi mogli dati više odgovora o pojavi duboke konvekcije na sjevernom Jadranu.

Literatura

- [1] Adams-Selin, R. D., Ziegler, C. D. Forecasting Hail Using a One-Dimensional Hail Growth Model within WRF. *Monthly Weather Review*, 144:4919–4939, 2016.
- [2] Antonescu, B., Schultz, D., Lomas, F., Kühne, T. Tornadoes in Europe: Synthesis of the Observational Datasets. *Monthly Weather Review*, 144(7):2445–2480, 2016.
- [3] Ashley, W., Gilson, C. A Reassessment of U.S. Lightning Mortality. *Bulletin of The American Meteorological Society*, 90:1501–1518, 2009.
- [4] Auer, A. H. Hail Recognition through the Combined Use of Radar Reflectivity and Cloud-Top Temperatures. *Monthly Weather Review*, 122(9):2218–2221, 1994.
- [5] Baba, Y., Rakov, V.A. *Lightning: Principles, Instruments and Applications.*, poglavlje Present Understanding of the Lightning Return Stroke, str. 1–21. Springer, Heidelberg, Njemačka, 2008.
- [6] Barnes, S. L. Mesoscale objective analysis using weighted time-series observations. *NOAA Tech. Memo. ERL NSSL-62*, str. 60, 1973. Available from National Severe Storms Laboratory, Norman, OK 73069.
- [7] Betz, H.D., Schmidt, K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W., Defer, E., Dziewit, Z., Konarski, J. *Lightning: Principles, Instruments and Applications.*, poglavlje LINET — An international lightning detection network in Europe, str. 115–141. Springer, Heidelberg, Njemačka, 2008.
- [8] Blumberg, W. D., Halbert, K., Supinie, T., Marsh, P., Thompson, R., Hart, J. SHARPy: An Open-Source Sounding Analysis Toolkit for the Atmospheric Sciences. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98:1625–1636, 2017.
- [9] Brimelow, J., Reuter, G., Poolman, E. Modeling Maximum Hail Size in Alberta Thunderstorms. *Weather and Forecasting*, 17:1048–1062, 2002.
- [10] Byers, H. R., Braham, R. R. *The thunderstorms*, str. 287. U.S. Govt. Printing Office, Washington D.C., SAD, 1949.
- [11] Cotton, W. R., Bryan, G. H., Van den Heever, S. *Storm and Cloud Dynamics (2nd edition)*, str. 809. Elsevier Academic Press, Burlington, SAD, 2010.
- [12] Curran, E. B., Holle, R., López, R. Lightning Casualties and Damages in the United States from 1959 to 1994. *Journal of Climate*, 13:3448–3464, 2000.
- [13] Danielsen, E. F. Inherent Difficulties in Hail Probability Prediction. *Meteorological Monographs*, 16:135–143, 1977.
- [14] Doswell, C. A., Moller, A.R., Przybylinski, R. A unified set of conceptual models for variations on the supercell theme. *Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, Alberta, Amer. Meteor. Soc.*, str. 40–45, 1990.
- [15] Dotzek, N., Groenemeijer, P., Feuerstein, B., Holzer, A. Overview of ESSL’s severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. *Atmospheric Research*, 93:575–586, 2009.

- [16] Feudale, L., Manzato, A., Micheletti, S. A cloud-to-ground lightning climatology for North Eastern Italy. *Advances in Science and Research*, 10:77–84, 2013.
- [17] Jelić, D., Megyeri, O. A., Malečić B., Belušić, A., Telišman Prtenjak, M. Hail climatology along the northeastern Adriatic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020.
- [18] Jewell, R., Brimelow, J. Evaluation of Alberta Hail Growth Model Using Severe Hail Proximity Soundings from the United States. *Weather and Forecasting*, 24:1592–1609, 2009.
- [19] Long, A., Matson, R., Crow, E. The Hailpad: Materials, Data Reduction and Calibration. *Journal of Applied Meteorology*, 19:1300–1313, 1980.
- [20] Mikuš Jurković, P., Strelec Mahović, N., Počakal, D. Lightning, Overshooting Top and Hail Characteristics for Strong Convective Storms in Central Europe. *Atmospheric Research*, 161:153–168, 2015.
- [21] Mosetti, F., Mosetti, P. Measurements on wind driven circulation in the North Adriatic Sea. str. 251–261, 1990. *Boll. Oceanol. Teor. Applic.*, 8.
- [22] Newton, C.W. *Dynamics of Severe Convective Storms*, str. 33–58. American Meteorological Society, Boston, SAD, 1963. Meteorological Monographs, vol 5.
- [23] Oliver, J. E. *Encyclopedia of world climatology*, str. 854. Springer, Dordrecht, Nizozemska, 2005.
- [24] Paškvan, R. Tuča i njena učestalost u Istri i užem području Poreča. str. 176–184, 1955. *Agronomski glasnik*, vol. 5.
- [25] Penzar, D., Penzar, I., Orlić, M. Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana. 2001. Dr. Feletar, Hrvatski hidrografski institut, Zagreb.
- [26] Plant, R. S., Yano, JI. *Parameterization of atmospheric convection. Volume I: Theoretical Background and Formulation*, str. 515. Imperial College Press, London, Ujedinjeno kraljestvo, 2016.
- [27] Poolman, E. R. *Die voorspelling van haelkorrelgroei in Suid-Afrika (The forecasting of hail growth in South Africa)*, str. 113. M.S. thesis, Faculty of Engineering, University of Pretoria, 1990.
- [28] Počakal, D. *Energija zrna tuče u kontinentalnom dijelu Hrvatske*, str. 96. Doktorski rad. Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb, Hrvatska, 2012.
- [29] Počakal, D., Večenaj, Ž., Mikuš Jurković, P., Grisogono, B. Analysis of orographic influence on hail parameters in NW Croatia. *International Journal of Climatology*, 38:5646–5658, 2018.
- [30] Punge, H. J., Bedka, K., Kunz, M., Werner, A. A new physically based stochastic event catalog for hail in Europe. *Natural Hazards*, 73:1625–1645, 09 2014.
- [31] Punge, H. J., Kunz, M. Hail observations and hailstorm characteristics in Europe: A review. *Atmospheric Research*, 176-177:159–184, 2016.

- [32] Púčík, T., Castellano, C., Groenemeijer, P., Kühne, T., Rädler, A., Antonescu, B., Faust, E. Large Hail Incidence and Its Economic and Societal Impacts across Europe. *Monthly Weather Review*, 147:3901–3916, 2019.
- [33] Rasmussen, R.M., Heymsfield, A.J. Melting and Shedding of Graupel and Hail. Part II: Sensitivity Study. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 44(19):2764–2782, 1987.
- [34] Renko, T., Kuzmić, J., Šoljan, V., Strelec Mahović, N. Waterspouts in the Eastern Adriatic from 2001 to 2013. *Natural Hazards*, 82:441–470, 2016.
- [35] Santos, J., Belo-Pereira, M. A comprehensive analysis of hail events in Portugal: Climatology and consistency with atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*, 2018.
- [36] Sioutas, M., Keul, A. Waterspouts of the Adriatic, Ionian and Aegean Sea and their meteorological environment. *Atmospheric Research*, 83:542–557, 2007.
- [37] Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J. G. A description of the Advanced Research WRF version 3. str. 113, 2008. doi: NCAR/TN-4751STR.
- [38] Stržinar, G., Skok, G. Comparison and optimization of radar-based hail detection algorithms in Slovenia. *Atmospheric Research*, 203:275–285, 2018.
- [39] Taszarek, M., Brooks, H., Czernecki, B., Szuster, P., Fortuniak, K. Climatological Aspects of Convective Parameters over Europe: A Comparison of ERA-Interim and Sounding Data. *Journal of Climate*, 31:4281–4308, 2018.
- [40] Thunis, P., Bornstein, R.D. Hierarchy of Mesoscale Flow Assumptions and Equations. *Journal of The Atmospheric Sciences*, 53:380–397, 1996.
- [41] Tuovinen, J.P., Punkka, A.J., Rauhala, J., Hohti, H., Schultz, D. Climatology of Severe Hail in Finland: 1930-2006. *Monthly Weather Review*, 137:2238–2249, 2009.
- [42] Uman, M. A. *The Lightning Discharge*, str. 377. Dover Publications, New York, SAD, 2001.
- [43] Vali, G., Stansbury, E. J. Time-dependent characteristics of the heterogeneous nucleation of ice. 1965.
- [44] Vasiloff, S., Brandes, E., Davies-Jones, R., Ray, P. An Investigation of the Transition from Multicell to Supercell Storms. *Journal of Applied Meteorology*, 25:1022–1036, 1986.
- [45] WMO. International Cloud Atlas Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors (WMO-No. 407), 1975. Dostupno na: <https://cloudatlas.wmo.int/species-cumulonimbus-cb.html> [31. ožujka 2020.].
- [46] WMO. *International meteorological vocabulary*, str. 784. Secretariat of the World Meteorological Organization, Ženeva, Švicarska, 1992.

- [47] Xu, X., Xue, M., Wang, Y., Huang, H. Mechanisms of Secondary Convection within a Mei-Yu Frontal Mesoscale Convective System in Eastern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122:47–64, 2017. doi: 10.1002/2016JD026017.
- [48] Yair, Y., Price, C., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Morin, E., Mugnai, A., Llasat, M. 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*, 115:1–13, 2010.

Dodatak A

6.1 Indeksi nestabilnosti

Indeksi nestabilnosti se koriste za brzu procjenu podložnosti atmosfere za razvoj nevremena. Računaju se preko algoritama koji se temelje vertikalnim profilima određenih atmosferskih parametara u nekom trenutku. Neki od algoritama su dobiveni poluempirijskim putem tijekom godina istraživanja i mjerenja.

Svaki od indeksa nestabilnosti posjeduju referentne vrijednosti koje ukazuju na stabilno ili nestabilno stanje atmosfere. Te vrijednosti ovise o sinoptičkim uvjetima, geografskom položaju, klimatskim uvjetima i promatranj sezoni.

U narednih par potpoglavlja dan je kratki opis korištenik indeksa nestabilnosti, kao i njihove referentne vrijednosti.

6.1.1 Indeks podizaja

Indeks podizanja (LI) je definiran kao razlika temperature okolnog zraka na visini na kojoj tlak iznosi 500 hPa (T_{500ok}) i temperature koju bi čest imala kada bi se adijabatički podigla s početnog tlaka p_0 i temperature T_0 na tlak od 500 hPa ($T_{500č}$). Ova definicija se može prikazati sljedećom formulom:

$$LI = T_{500ok} - T_{500č},$$

pri čemu je:

$$T_{500č} = T \left(\frac{500}{p} \right)^{\frac{R_m}{C_{pm}}}.$$

R_m je oznaka specifične plinske konstante vlažnog zraka, a C_{pm} je specifični toplinski kapacitet vlažnog zraka pri konstantnom tlaku.

Referentne vrijednosti za LI su dane u tablici (Tablica 6.1).

Tablica 6.1: Tablični prikaz referentnih vrijednosti indeksa podizanja i odgovarajućih stanja atmosfere. (Izvor: <https://www.weather.gov/lmk/indices>)

Vrijednost indeksa (°C)	Stanje atmosfere
$LI \geq 0$	Stabilno, uz mogućnost slabe konvekcije za $1 < LI < 3$ uz prisutno jako dizanje
$-3 < LI < 3$	Granično nestabilno
$-6 < LI \leq -3$	Umjereno nestabilno
$-9 < LI \leq -6$	Jako nestabilno
$LI \leq -9$	Ekstremno nestabilno

6.1.2 K indeks

K indeks je mjera potencijala za razvoj grmljavinskog nevremena. Dobar je indikator nestabilnosti u zračnoj masi, a računa se na temelju vertikalne stope promjene temperature, količini vlage u nižoj troposferi i visini vlažnog sloja. Za njegov izračun se koristi sljedeća jednadžba:

$$K = T_{850} + T_{d850} - T_{500} - DD_{700}$$
$$DD_{700} = T_{700} - T_{d700}$$

gdje su T_{850} , T_{700} i T_{500} temperature izražene u °C na izobarnim plohama 850, 700 i 500 hPa, a T_{d850} i T_{d700} temperature rosišta na izobarnim plohama 850 i 700 hPa.

Referentne vrijednosti za K indeks su dane u tablici (Tablica 6.2).

Tablica 6.2: Tablični prikaz referentnih vrijednosti K indeksa i odgovarajućih stanja atmosfere. (Izvor: <https://www.weather.gov/lmk/indices>).

Vrijednost indeksa (°C)	Stanje atmosfere
$K < 20$	Stabilno
$20 \leq K \leq 30$	Moguće grmljavinsko nevrijeme
$K > 30$	Velika vjerojatnost za grmljavinsko nevrijeme
$K = 40$	Najbolji potencijal za grmljavinsko nevrijeme

6.1.3 Konvektivna raspoloživa potencijalna energija

Konvektivna raspoloživa potencijalna energija (CAPE) je mjera količine raspoložive energije koju bi čest dobila uzdizanjem na određenu visinu u atmosferi. Što je ta energija veća, veća je i vjerojatnost da će se čest podići dovoljno visoko u atmosferu da proizvede konvektivne vremenske sustave, poput grmljavine i tornada.

Definira se kao:

$$CAPE = g \int_{z_{LFC}}^{z_{LNB}} \frac{T_{\check{c}} - T_{ok}}{T_{ok}} dz,$$

gdje je g ubrzanje sile teže, z_{LFC} visina slobodne konvekcije, z_{LNB} visina razine neutralnog uzgona, $T_{\check{c}}$ temperatura česti i T_{ok} temperatura okoliša.

Zbog drugačijih mehanizama duboke mokre konvekcije (npr. latentna toplina, tipovi strujanja...), koncept CAPE-a nije primjenjiv u tropskim područjima. No, u izvantropskim širinama se često koristi (Grisogono i Belušić, 2008.).

Referentne vrijednosti za CAPE indeks su dane u tablici (Tablica 6.3).

Tablica 6.3: Tablični prikaz referentnih vrijednosti CAPE-a i odgovarajućih stanja atmosfere. (Izvor: <https://www.weather.gov/lmk/indices>).

Vrijednost indeksa (Jkg^{-1})	Stanje atmosfere
$\text{CAPE} < 0$	Stabilno
$0 \leq \text{CAPE} < 1000$	Granično nestabilno
$1000 \leq \text{CAPE} < 2500$	Umjereno nestabilno
$2500 \leq \text{CAPE} \leq 3500$	Jako nestabilno
$\text{CAPE} > 3500$	Ekstremno nestabilno