

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Sara Oštrić

**Određivanje visine vrhova kumulonimbusa
pomoću parametra konvektivne raspoložive
potencijalne energije**

Zagreb, 2025.

Ovaj rad izrađen je na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom mentorice prof. dr. sc. Maje Telišman Prtenjak i komentorice dr. sc. Karmen Babić te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2024./2025.

Popis kratica i oznaka

ALADIN	mezoskalni numerički model (fr. <i>Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational</i>)
ARSO	slovenska državna meteorološka služba (slo. <i>Agencija Republike Slovenije za okolje</i>)
BIAS	pristranost
BS	smicanje vjetra (engl. <i>bulk wind shear</i>)
BT	satelitski kanal 10.8 μm (engl. <i>brightness temperature</i>)
CAPE	raspoloživa konvektivna potencijalna energija (engl. <i>convective available potential energy</i>)
Cb	kumulonimbus
CIN	konvektivna inhibicija (engl. <i>convective inhibition</i>)
DVK	duboka vlažna konvekcija
EASA	Europska agencija za zrakoplovnu sigurnost (engl. <i>European Union Aviation Safety Agency</i>)
ECMWF	Europski centar za srednjoročnu prognozu vremena (engl. <i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>)
EL	ravnotežni nivo (engl. <i>equilibrium level</i>)
EUMETSAT	Europska organizacija za razvoj i nadzor meteoroloških satelita (engl. <i>European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites</i>)
GFS	globalni numerički model (engl. <i>Global Forecast System</i>)
HKZP	Hrvatska kontrola zračne plovidbe
LCL	nivo kondenzacije (engl. <i>lifted condensation level</i>)
LFC	nivo slobodne konvekcije (engl. <i>level of free convection</i>)
LI	indeks podizanja (engl. <i>lifted index</i>)
LINET	Europska mreža za detekciju munja (engl. <i>Lightning Detection Network in Europe</i>)

MAE	srednja apsolutna pogreška (engl. <i>mean absolute error</i>)
RMSE	srednja kvadratna pogreška (engl. <i>root mean square error</i>)
SIFT	softver za vizualizaciju satelitskih podataka (engl. <i>Satellite Information Familiarization Tool</i>)
SSEC	Centar za svemirska istraživanja i inženjerstvo Sveučilišta Wisconsin-Madison (engl. <i>University of Wisconsin-Madison Space Science and Engineering Center</i>)
UTC	koordinirano svjetsko vrijeme (engl. <i>coordinated universal time</i>)
WRF	mezoskalni numerički model (engl. <i>Weather Research and Forecasting Model</i>)
T	temperatura
T_d	temperatura rosišta
p	tlak
w	vertikalna brzina
E_k	kinetička energija
σ^2	varijanca
r	Pearsonov koeficijent korelacije
d	indeks slaganja
R^2	koeficijent determinacije

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Motivacija i cilj istraživanja	1
1.2	Duboka vlažna konvekcija	3
1.3	Modovi konvekcije	4
2	Podatci i metodologija	9
2.1	Opis promatranog područja	9
2.2	Model WRF	9
2.3	Model ALADIN	11
2.4	Podatci o munjama	11
2.5	Satelitski podatci	12
2.6	Radiondažni i radarski podatci	13
2.7	Indeksi koji opisuju konvekciju	14
2.8	Termodijagram i teorija česti	15
2.9	Metode za određivanje visina vrhova kumulonimbusa	16
2.10	Statističke veličine	18
3	Opis događaja 30.6.2014.	20
3.1	Sinoptički uvjeti	20
3.2	Mezoskalni uvjeti	22
3.2.1	Usporedba vertikalnih profila za postaju Zadar-Zemunik	27
3.2.2	Usporedba vertikalnih profila za postaju Zagreb-Maksimir	29
3.2.3	Odabir područja za testiranje metoda	32
4	Rezultati i diskusija	34
4.1	Statistička analiza	34
4.2	Prilagodba modela jednostruke linearne regresije	37
5	Zaključak	39
	Zahvale	41
	Bibliografija	42

Sažetak	45
Summary	46

1 Uvod

1.1 Motivacija i cilj istraživanja

Razvojem zračnog prometa u prvoj polovici 20. stoljeća omogućen je brži međukontinentalni prijevoz putnika i dobara. Većina putanja aviona određena je na način da je let financijski i vremenski najisplativiji, izuzetak su turistički letovi. Osim vremenske i financijske efikasnosti, važna je i sigurnost tijekom leta kojoj doprinose dvije stavke: tehnička ispravnost zrakoplova i meteorološki uvjeti. Grana meteorologije koja se bavi izradom vremenskih prognoza i upozorenja na opasne meteorološke pojave za potrebe zrakoplovstva naziva se *zrakoplovna meteorologija*.

Grmljavinska oluja je za zrakoplove najopasnija vremenska pojava i to u svim fazama leta (polijetanje, horizontalan let i slijetanje). Riječ je o visokoenergetskoj pojavi koja je rezultat procesa duboke vlažne konvekcije u atmosferi, a očituje se u postojanju jednog ili više vertikalno razvijenih oblaka koje zovemo *kumulonimbusima* (Cb). Kumulonimbus je oblak koji spada u skupinu niskih oblaka, no vrh mu nerijetko seže do vrha troposfere što odgovara visinama na kojima lete mlazni putnički avioni (razina tlaka od 0.2 bara). Na području nastanka grmljavinskih oluja javlja se niz opasnih pojava za zrakoplove: jaka vertikalna gibanja, smicanje vjetra, električno pražnjenje (munje), zaleđivanje i dr. Unutar kumulonimbusa javljaju se prehladne kapljice vode; kapljice vode temperature manje od 0 °C. Takvi hidrometeori u dodiru s čvrstim predmetima (npr. krila aviona) vrlo brzo prelaze u kruto stanje što može uzrokovati zaleđivanje dijelova zrakoplova (slika 1). Time se težina zrakoplova povećava te mu se mijenjanju aerodinamičke performanse što otežava letenje.

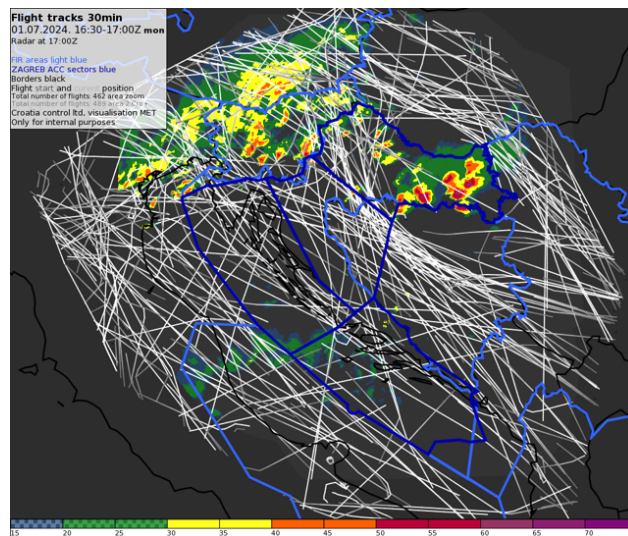


Slika 1: Zaleđivanje dijelova zrakoplova. Izvor: <http://pilotgetaways.com/mag/nd09/icing>.

Jake silazne i uzlazne struje te smicanje vjetra uzrokuju naglo propadanje ili propinjanje zrakoplova

što može dovesti do gubitka kontrole nad zrakoplovom.

Prema istraživanjima Europske agencije za zrakoplovnu sigurnost (engl. *European Union Aviation Safety Agency*, EASA), grmljavinske oluje su jedan od najčešćih uzroka avionskih incidenata te otkazivanja letova (EASA, 2017). Primjer jednog takvog događaja zbio se 4.6.2025. godine pri letu zrakoplova irske zrakoplovne kompanije Ryanair. Naime, na letu iz Berlina za Milano zrakoplov je uletio u grmljavinsku oluju te je zbog jake turbulencije ozlijeđeno devetero ljudi što je rezultiralo prisilnom slijetanju aviona u Memmingen (URL1). Zbog svega navedenog, zrakoplovi najčešće zaobilaze grmljavinske oluje, tj. njihovim se nastankom putanje aviona mijenjaju te postaju manje optimalne u financijskom smislu. Primjer promjene putanja uslijed nastanka grmljavinske oluje prikazan je na slici 2. Riječ je o konvektivnom događaju nad područjem Slavonije koji se dogodio 1.7.2024. u popodnevним satima te uslijed kojeg su se putanje zrakoplova (bijeले linije) pomaknule prema sjeveroistoku i jugozapadu.



Slika 2: Promjena položaja putanja zrakoplova uslijed nastanka konvektivne oluje nad Slavonijom 1.7.2024. Bijeले linije predstavljaju putanje aviona za razdoblje od 16:30 do 17:00 UTC, a u pozadini je prikazan radarski odraz (dBZ) u 17:00 UTC. Izvor: Jurković et al. (2025).

Kako bi zrakoplov uspješno zaobišao kumulonimbus važna je pravovremena dijagnoza konvektivne naoblake u čemu pomažu meteorološki radari i sateliti. Također, važna je i prognoza grmljavinskih oluja kako bi se unaprijed planirane putanje na vrijeme i na ispravan način promijenile. Tako je istraživanje paneuropske organizacije za potporu europskom zrakoplovstvu *Eurocontrol* pokazalo da čak dvije trećine odgoda letova zbog olujnog vremena može biti spriječeno ranim sustavom upozorenja te dobrim upravljanjem protokom zračnog prometa (Blajev, 2015). Kako bi se grmljavinska oluja izbjegla, potrebno je poznavati njezine horizontalne dimenzije te vertikalnu.

Cilj ovoga rada je istražiti pouzdanost i uspješnost dviju operativnih metoda za procjenu visina vrhova kumulonimbusa. Analiza je napravljena na temelju konvektivnog događaja koji se dogodio 30.6.2014. godine pri čemu su korištene numeričke simulacije modela WRF, satelitski podatci o temperaturi vrha oblaka te podatci o udarima munja.

1.2 Duboka vlažna konvekcija

Duboka vlažna konvekcija (DVK) mezoskalni je nehidrostatički i turbulentan fenomen koji se očituje u vertikalnom dizanju zraka iznad nivoa 500 hPa plohe (Markowski i Richardson, 2010). Iako se DVK inicira na mezoskali, procesi sinoptičke skale imaju važnu ulogu u formiranju mezoskalnih uvjeta povoljnih za nastanak DVK. Zbog toga je pregled sinoptičkih uvjeta neizostavan korak u analizi i prognozi konvekcije.

Prema Johns i Doswell III (1992), moraju se preklopiti tri povoljna uvjeta u atmosferi za inicijaciju duboke vlažne konvekcije: dovoljna količina vlažnog zraka u graničnom sloju, uvjetna nestabilnost atmosfere i postojanje mehanizama podizanja zraka. Ako je čest zrak dovoljno vlažna, njezinim dizanjem dolazi do oslobađanja latentne topline, tj. govorimo o postojanju pozitivnog uzgona što je nužno za daljnje dizanje česti zraka. Postojanjem mehanizama dizanja zraka čest se dovodi do nivoa slobodne konvekcije (LFC) koji predstavlja početak područja pozitivnog uzgona. Uvjeti u kojima dolazi do intenzifikacije vertikalnih gibanja su: mezoskalna konvergencija prizemnog strujanja, prednja strana hladne fronte ili visinske doline, desni ulaz i lijevi izlaz iz mlazne struje, planinski valovi i dr. Uvjetno nestabilan vertikalni profil temperature ($5.5 \text{ K/km} < -\frac{\partial T}{\partial z} < 9.8 \text{ K/km}$) omogućuje da se čest zrak zasićena vodenom parom sporije hladi po metru dizanja od okolnog zraka. U takvim će uvjetima čest biti toplija (lakša) od okoline te će imati tendenciju dizanja.

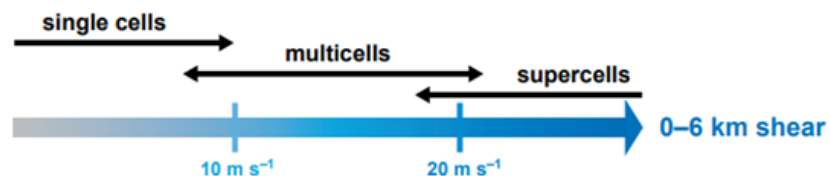
Konvekcija koja nastaje dizanjem česti zraka koja nije u dodiru s površinom naziva se *izdignuta konvekcija* (engl. *elevated convection*). Nastaje iznad stabilnog graničnog sloja najčešće noću. Izdignuta DVK predstavlja manju vjerojatnost pojave jakog vjetera pri tlu zbog smanjenja negativnog uzgona silaznih struja (engl. *downdrafts*) ulaskom u stabilan sloj zraka neposredno uz tlo. Opasne pojave vezane uz izdignutu DVK jesu velika tuča te poplave. Općenito govoreći, *prizemna konvekcija* (engl. *surface-based convection*) je najintenzivnija jer se najveće moguće vrijednosti uzgona postižu upravo dizanjem prizemne česti zraka, tj. sloj zraka neposredno uz tlo najčešće ima najveću ekvivalentnu potencijalnu temperaturu. Nadalje, granični sloj je sloj u kojem je smicanje

vjetra najčešće vrlo značajno što doprinosi (dinamičkoj) nestabilnosti uzlazne struje.

1.3 Modovi konvekcije

Konvekcija se u atmosferi manifestira u raznim oblicima, stoga nije jednostavno napraviti podjelu na nekoliko oblika. Također, postoji mnoštvo parametara na temelju čijih vrijednosti možemo zaključivati o organizaciji konvekcije. Neki od njih su vertikalno smicanje vjetra, Bulk-Richardsonov broj, zavojitost relativnog strujanja u odnosu na oluju (engl. *storm-relative helicity*), raspoloživa konvektivna potencijalna energija (CAPE). Rasmussen i Blanchard (1988) su pokazali da su parametri koji povezuju CAPE i vertikalno smicanje vjetra, poput parametra generiranja vrtložnosti (engl. *vorticity-generation parameter*), najbolji u razlikovanju superćelijskih oluja od nesuperćelijskih. Poznavanje načina organizacije konvekcije važno je u prognozi iste jer različiti modovi imaju različito vrijeme trajanja, smjer gibanja te daju pojave različitog intenziteta.

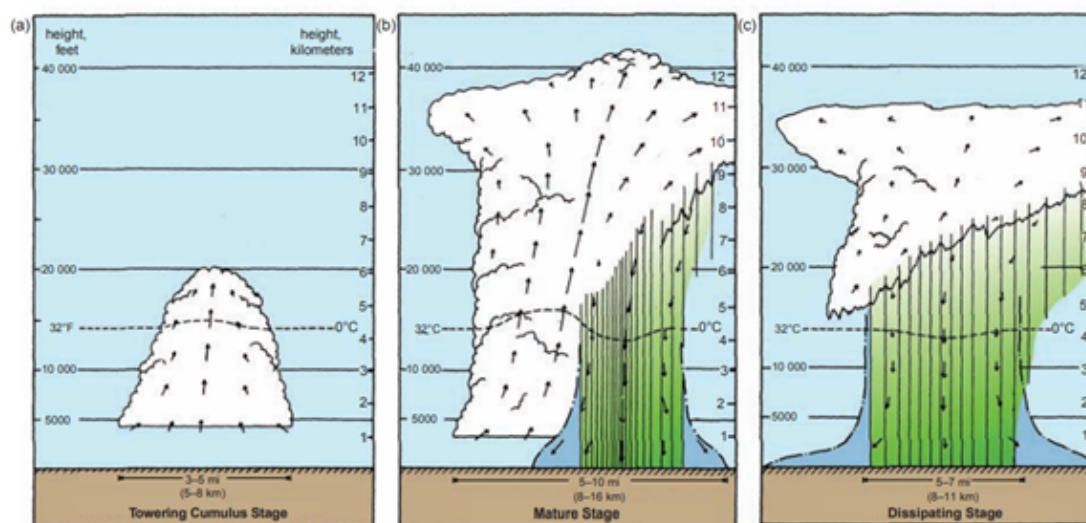
Vertikalno smicanje vjetra najčešće je korišteni parametar u procesu određivanja konvektivnog moda (Markowski i Richardson, 2010). U te se svrhe obično računa iznos vektora smicanja vjetra u prvih 6 km atmosfere (BS06). Slabo smicanje predstavlja uvjete u kojima je $BS06 < 10 \text{ m/s}$, umjereno smicanje je za $10 < BS06 < 20 \text{ m/s}$, a jako smicanje je za vrijednosti $BS06 > 20 \text{ m/s}$. Sukladno tomu, razlikujemo tri načina organizacije DVK: jedinične ćelije, multićelije te superćelije. Klasifikacija konvektivnih oluja s obzirom na iznos vertikalnog smicanja vjetra u prvih 6 km atmosfere shematski je prikazana na slici 3.



Slika 3: Klasifikacija konvektivnih oluja s obzirom na vertikalno smicanje vjetra u prvih 6 km. Prilagođeno iz Markowski i Richardson (2010).

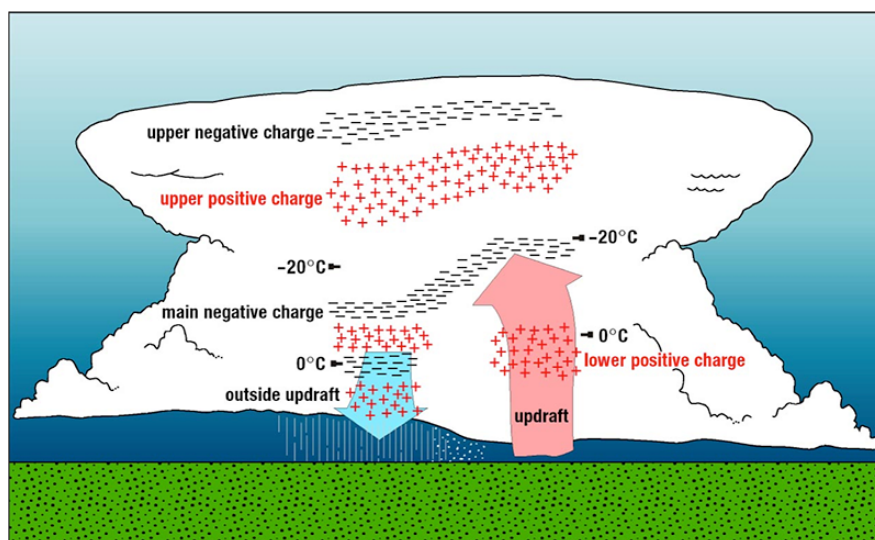
Pojam jedinične ćelije odnosi se na sve oblike DVK koji se sastoje od jedne uzlazne struje te nastaju u uvjetima slabog smicanja vjetra. U takvim je uvjetima dizanje zraka uz prizemnu frontu udara vjetra slabo i plitko što ne rezultira nastankom novih ćelija. Ovakve konvektivne strukture obično nastaju u uvjetima slabe prisile na sinoptičkoj skali, tj. rezultat su dnevnog zagrijavanja. Maksimum razvijenosti postižu u popodnevnim satima te su kratkog životnog vijeka

(30-60 min). Životni ciklus jedinične ćelije možemo opisati kroz tri faze: kumulusna faza, zrela faza te disipacijska faza (slika 4). U kumulusnoj fazi postoji samo uzlazna struja dok se u zreloj fazi razvoja javlja oborina. Zbog slabog smicanja vjetra, silazna struja zraka uzrokovana ispadanjem oborine podudara se s uzlaznom strujom. To dovodi do gašenja ćelije, tj. početka disipacijske faze. Jedinične se ćelije obično gibaju srednjom brzinom vjetra (advekcija).



Slika 4: Faze razvoja jedinične konvektivne ćelije: (a) kumulusna faza, (b) zrela faza i (c) disipacijska faza. Izvor: Markowski i Richardson (2010).

Razvojem jedinične ćelije zapravo govorimo o nastanku olujnog oblaka zvanog kumulonimbus. Riječ je o gustom oblaku izraženog vertikalnog razvoja koji spada u skupinu niskih oblaka (visina podnice oblaka niža je od 2 km). Ovaj oblak izgledom podsjeća na toranj, a vrh mu u umjerenim geografskim širinama nerijetko doseže visine $H \sim 10$ km. Sastoji se od oblačnih elemenata različitih faza: vodene kapljice (donji dio oblaka), mješovita faza (srednji dio oblaka) i kristalići leda (vrh oblaka). Vertikalne brzine u kumulonimbusu su $w \sim 10$ m/s, a mogu doseći vrijednosti i do 50 m/s. Kumulonimbus je jedini oblak koji može proizvesti munje; električna pražnjenja uzrokovana razdvajanjem pozitivnog i negativnog naboja u oblaku. Stolzenburg et al. (1998) su pokazali postojanje četiri nabojna područja u uzlaznoj struji olujnog oblaka. Iznad podnice oblaka nalazi se područje negativnog naboja, a iznad njega područje pozitivnog i ta dva područja tvore *glavni dipol*. Uz samu podnicu oblaka nalazi se plitko područje pozitivnog naboja, a na samom vrhu postoji plitak sloj negativnog naboja. Slika 5 prikazuje raspodjelu naboja unutar kumulonimbusa.

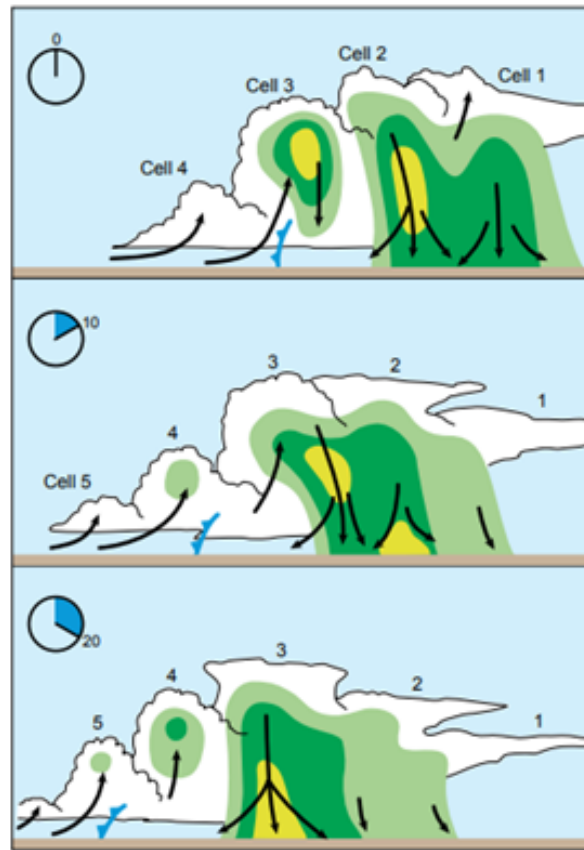


Slika 5: Raspodjela nabojnih područja unutar kumulonimbusa. Crveni plusevi označavaju pozitivan naboj, a plavi minusi negativan naboj. Ružičasta strelica predstavlja uzlaznu struju zraka, a plava silaznu. Izvor: <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/lightning/>.

Do nastanka glavnog dipola dolazi uslijed sudara zrna tuče i kristalića leda. Naime, pozitivan je naboj koncentriran u središtu kristalića leda jer je pokretljiviji od negativnog naboja. Nakon što zrna tuče dovoljno narastu, sila teža nadvlada silu uzgona te ona počinju padati unutar oblaka. Tijekom pada sudaraju se s kristalićima leda pri čemu dolazi do prijelaza negativnog naboja s površine kristalića leda na zrna tuče. Pozitivno nabijeni kristalići leda lakši su od negativno nabijenih zrna tuče pa se zato nalaze u višim slojevima oblaka. Valja istaknuti kako je pod određenim uvjetima moguć nastanak i *obrnutog dipola*, tj. pojava pozitivno nabijenih zrna tuče te negativno nabijenih kristalića leda (npr. Takahashi, 1978). Ukoliko je mješovita faza plitka, kumulonimbus neće proizvesti munje. Plitka mješovita faza posljedica je slabe uzlazne struje u Cb-u te u takvim uvjetima nastaju grmljavinske oluje slabijeg intenziteta.

Multićelije nastaju u uvjetima umjerenog smicanja vjetra te su najčešći oblik DVK u umjerenim geografskim širinama. Sastoje se od više različito razvijenih jediničnih ćelija koje ne žive dulje od 60 min, no multićelijski sustav može trajati satima. Razlog se krije u kontinuiranom nastanku novih ćelija i to obično niz vektor smicanja jer je u tom smjeru konvergencija vrtložnosti fronte udara vjetra i vrtložnosti smicanja vjetra najveća (Rotunno et al., 1988). Stalni nastanak novih ćelija na povoljnoj strani već postojećeg sustava zove se *propagacija*. Propagacija može biti sporija ili brža od srednje brzine vjetra, a s obzirom na smjer razlikujemo propagaciju niz vjetar (engl. *downwind propagation*) od one uz vjetar (engl. *upwind propagation*). Dakle, gibanje multićelijskih sustava te konvektivnih sustava općenito vektorska je suma advekcije jediničnih ćelija srednjim strujanjem te

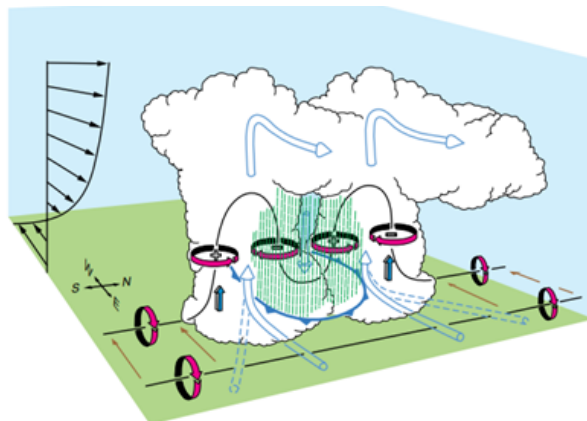
propagacije. Vremenski razvoj multićelije prikazan je na slici 6.



Slika 6: Evolucija multićelije. U početnom trenutku (gornja slika) ćelija 1 je u fazi raspadanja dok se ćelija 2 nalazi u zreloj fazi. Nakon 10 minuta (srednja slika), ćelija 1 se u potpunosti raspala dok kod ćelije 2 uzlazna struja slabi zbog pojave oborine. U tom trenutku ćelija 3 doseže ravnotežni nivo te dolazi do nastanka ćelije 5. U narednih 10 minuta (donja slika) ćelija 3 je najrazvijenija. Izvor: Markowski i Richardson (2010)

Premda se javljaju najrjeđe od tri opisana moda konvekcije, superćelije predstavljaju izuzetno opasnu vremensku pojavu. Naime, gotovo svi događaji tuče promjera većeg od 5 cm te događaji snažnih i razornih tornada nastaju iz superćelijskih oluja. Za nastanak ovog konvektivnog moda potrebno je jako smicanje vjetrova u donjih 6 km ($BS_{06} > 20 \text{ m/s}$), no već su okruženja s $BS_{06} > 15 \text{ m/s}$ povoljna za razvoj ovakve strukture. Superćelije se od prethodna dva oblika organizacije DVK razlikuju po postojanju *mezociklona*. Riječ je o području unutar uzlazne struje širine između 3 i 8 km u kojem dolazi do razvoja vertikalne komponente vrtložnosti $\zeta \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. Za nastanak (značajne) mezoskalne vertikalne vrtložnosti potrebno je značajno vertikalno smicanje srednjeg vjetrova te značajne varijacije vertikalne komponente brzine. Prvo znači postojanje horizontalne komponente vrtložnosti, a drugo postojanje vertikalnih mlazova zraka (engl. *plumes*). Velika vrtložnost u srednjoj troposferi u sprezi sa silaznom strujom nastalom ispadanjem oborine razdvaja

superćeliju na lijevu (anticiklonalnu) i desnu (ciklonalnu) u čijim se središtima nalazi minimum tlaka (slika 7). Nastanak konvektivnih vrtloga lijevo i desno od glavne oluje predstavlja mehanizam propagacije superćelija. Jednom kada nastanu, ćelije se gibaju horizontalno u odnosu na vektor smicanja vjetra. Imamo li zakretanje vjetra s visinom udesno, doći će do potiskivanja lijevogibajuće ćelije dok će se desnogibajuća podržavati. Takav smjer propagacije u superpoziciji s advekcijom srednjim vjetrom daje gibanje oblačnog sustava udesno od srednjeg vektora vjetra. Zahvaljujući vrlo organiziranoj unutrašnjoj strukturi, superćelije mogu postojati i do 8 sati.



Slika 7: Zrela faza razvoja superćelije. Strane svijeta i razdioba srednjeg vjetra po visini prikazani su lijevo. Ružičastim je strelicama prikazana vrtložnost, a plavima uzlazna gibanja. Savijene strelice svjetloplavog ruba označuju zrak koji ulazi u olujni oblak (dolje) te onaj koji izlazi (gore). Oborinsko područje u oblaku iscrtkano je svjetlozelenom bojom dok je prizemna fronta udara vjetra prikazana u svjetloplavoj boji. Prilagođeno iz Markowski i Richardson (2010).

2 Podatci i metodologija

2.1 Opis promatranog područja

Hrvatska je zemlja smještena na jugoistoku Europe (slika 8) ukupne površine 56594 km². Ističe se nepravilnim oblikom, reljefnom raznolikošću te vrlo razvedenom obalom duž istočnog dijela Jadranskog mora.



Slika 8: Geografski položaj Hrvatske. Izvor: <https://www.camping.hr/hr/hrvatska/europa>.

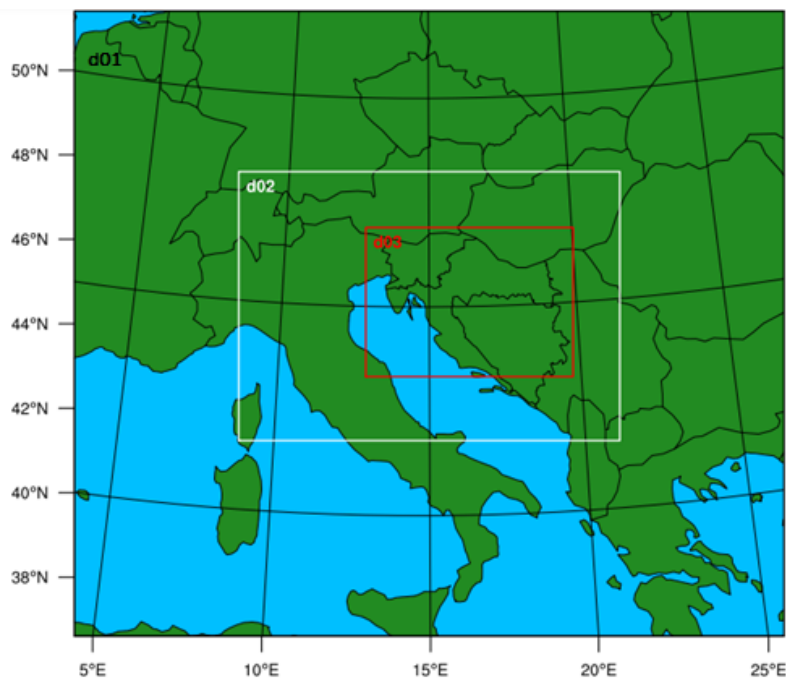
Kada govorimo o klimi Hrvatske, ona je dominantno određena utjecajem Jadranskog mora, Dinarida te Panonske nizine. Prema Köppenovoj klasifikaciji klime (za detalje vidjeti npr. Beck et al., 2018), najveći dio Hrvatske ima umjereno toplu kišnu klimu C. Tako Nizinska Hrvatska ima topla ljeta, a sušnije razdoblje je u hladnom dijelu godine (Cfwb tip klime). Područje Like i Gorskog kotara te viši dijelovi Istre također imaju topla ljeta, ali s najviše oborine u hladnom dijelu godine (Cfsb tip klime). Obala i otoci uglavnom imaju vruća ljeta sa sušnim razdobljem u toplom dijelu godine (Csa tip klime). Izuzetak su planinska područja iznad 1200 m nadmorske visine koja imaju snježnošumsku klimu D.

2.2 Model WRF

Model WRF (engl. *Weather Research and Forecasting*) atmosferski je numerički mezoskalni model koji omogućuje provođenje realnih i idealiziranih simulacija stanja atmosfere. Model se kao takav združuje s različitim modulima poput onoga za rast tuče (Adams-Selin i Ziegler, 2016). Razlikujemo dvije verzije modela WRF: WRF-ARW (engl. *Advanced Research WRF*) te WRF-NMM (engl. *Nonhydrostatic Mesoscale Model*). Prvi od navedenih se koristi u istraživačke svrhe,

a potonji za svakodnevnu prognozu vremena (npr. službeni model za prognozu vremena u Srbiji).

Slika 9 prikazuje domene koje su korištene u numeričkim simulacijama modelom WRF za potrebe analize konvektivnog događaja koji se dogodio 30.6.2014. Simulacije su napravljene s tri ugniježdene domene: d01 (najveći pravokutnik), d02 (bijeli pravokutnik) te d03 (crveni pravokutnik). Horizontalne rezolucije domena su: 9 km (204×180 točaka) u domeni 1 (d01), 3 km (328×232 točaka) u domeni 2 (d02) i 1 km (535×385 točaka) u domeni 3 (d03). Broj vertikalnih nivoa je 97 u sve tri domene. Simulacije su započete 29.6.2014. u 12:00 UTC te traju do 1.7.2014. u 12:00 UTC pri čemu su korišteni početni i rubni uvjeti iz globalnog modela Europskog centra za srednjoročnu prognozu vremena (ECMWF). Za opis mikrofizičkih osobina oblaka korištena je WSM6 shema (Hong i Lim, 2006), za kratkovalno zračenje Dudhia shema (Dudhia, 1989) dok je za dugovalno zračenje korištena RRTM shema (Mlawer et al., 1997). Za parametrizaciju atmosferskog graničnog sloja upotrijebljena je MYNN 2.5 shema (Nakanishi i Niino, 2006).



Slika 9: Ugniježdene domene korištene u simulaciji modelom WRF.

Područje od najvećeg interesa je ono unutar domene d03 (s naglaskom na Hrvatsku) te je nad njim provedeno testiranje metoda za određivanje visina vrhova kumulonimbusa. Riječ je o području koje obuhvaća cijelu Hrvatsku te Bosnu i Hercegovinu (osim krajnjeg juga), Sloveniju, jug Mađarske te neke dijelove Austrije, Italije i Srbije.

2.3 *Model ALADIN*

ALADIN (fr. *Aire Limitée Adaptation Dynamique développement InterNational*) regionalni je atmosferski numerički model koji se operativno koristi u Hrvatskoj kontroli zračne plovidbe (HKZP). Model održava grupa znanstvenika iz 16 zemalja među kojima je i Hrvatska (od 1995. godine).

Horizontalna rezolucija modela je 8 km te se proračun vrši na 37 vertikalnih nivoa. Početni i rubni uvjeti se također uzimaju iz modela ECMWF-a te se koriste razne parametrizacije (Pielke, 1981). U ovom su radu korištene simulacije vertikalnih profila temperature zraka, rosišta te smjera i brzine vjetra iz modela ALADIN. Iste su uspoređene sa simulacijama modela WRF te radiosondažnim mjerenjima.

2.4 *Podatci o munjama*

LINET (engl. *Lightning Detection Network in Europe*) je europska mreža za detekciju munja koja se sastoji od senzora postavljenih na tlu diljem Europe (Betz et al., 2009). Ukupano je oko 130 senzora od kojih se 6 nalazi na području Hrvatske. Mjerenja se zasnivaju na detekciji elektromagnetskog signala te sadrže informacije o:

- tipu munja (munja iz oblaka u oblak ili munja iz oblaka u tlo),
- polaritetu munja (pozitivan ili negativan),
- visini na kojoj je elektromagnetski signal detektiran,
- jakost struje,
- pogreška u lokaciji.

Za potrebe ovog istraživanja korišteni su podatci o električnom pražnjenju iz dvodimenzionalne baze podataka o udarima munja koju je napravio Jelić (2022) na temelju podataka iz mreže LINET. Baza je napravljena u prostornoj rezoluciji od 3 km × 3 km, a vremenska rezolucija je 2 min. Takva baza podataka omogućuje uočavanje lokalnih grmljavinskih oluja te proučavanje njihovog utjecaja na lokalnoj razini. Ovdje su podatci iz baze korišteni za potrebe mezoskalne analize te kao kriterij odabira točaka za testiranje metoda za određivanje visina vrhova kumulonimbusa.

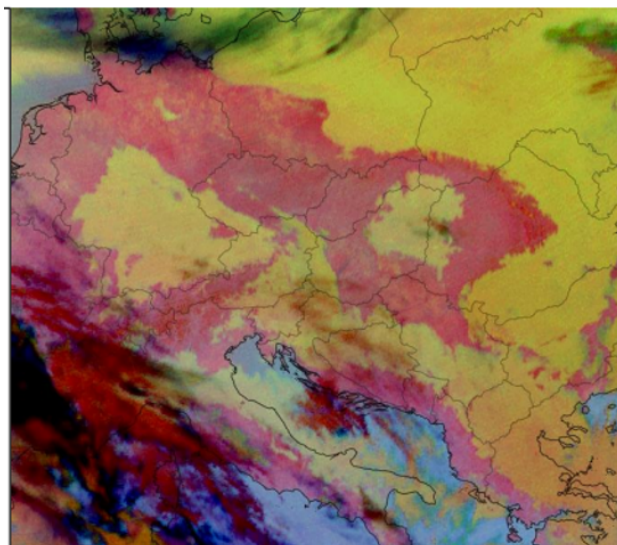
2.5 Satelitski podatci

EUMETSAT (engl. *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*) je europska organizacija za razvoj i nadzor meteoroloških satelita koja trenutno ima 10-tak lansiranih satelita u Zemljinoj orbiti. Osnovni parametar koji sateliti mjere je broj udara fotona (engl. *counts*) koji se potom pretvara u električni signal, a zatim u zračenje. Zračenje je ono koje se pretvara u geofizičke parametre (temperatura, koncentracija, veličina čestica i sl.).

Tijekom ovog su istraživanja korišteni podatci s EUMETSAT-ovog geostacionarnog satelita Meteosat-10 koji sadrži Imager instrument Seviri na sebi. Satelit je lansiran 5.7.2012. godine, a rezolucije mjerenja su 3 km u prostoru te 15 min u vremenu. Korišteni su podatci o temperaturi vrhova oblaka iz infracrvenog kanala $10.8\ \mu\text{m}$ (engl. *brightness temperature*, BT). Korišten je i RGB produkt 24-satna mikrofizika koji daje informaciju o veličini i fazi hidrometeora u oblaku te debljini i visini samog oblaka. Također, ovaj satelitski produkt sadrži informaciju i o prizemnoj raspodjeli vlage u zraku nad područjima koja nisu prekrivena oblacima. Primjer ovog satelitskog produkta prikazan je na slici 10. Interpretacija boja na produktu 24-satna mikrofizika je sljedeća:

- crna - cirusna naoblaka,
- crvena - gusti i visoki oblaci s česticama ledene faze na vrhu,
- zelena - srednji vodeni oblaci,
- oker (zemljana) - niski vodeni oblaci (stratus ili magla),
- ljubičastoplava - topli i vlažni granični sloj,
- svjetloplava - topli i suhi granični sloj.

Vizualizacija satelitskih podataka napravljena je u softveru SIFT (engl. *Satellite Information Familiarization Tool*) koji je razvijen u Centru za svemirska istraživanja i inženjerstvo na Sveučilištu Wisconsin-Madison (engl. *University of Wisconsin-Madison Space Science and Engineering Center*, SSEC). Informacije o razvoju te značajkama softvera SIFT objavljene su u Gerth et al. (2020).



Slika 10: Satelitski RGB produkt 24-satna mikrofizika za 13.2.2017. u 00:00 UTC. Izvor: <https://eumetrain.org/sites/default/files/2021-05/24MicroRGB.pdf>.

2.6 Radiosondažni i radarski podatci

Radiosondažna ili visinska mjerenja daju informaciju o vertikalnoj strukturi atmosfere u nekoj točki u nekom trenutku. Ova vrsta mjerenja iznimno je korisna u prognozi konvekcije i magle, a obuhvaća mjerenja temperature zraka (T), temperature rosišta (T_d), tlaka zraka (p) te smjera i brzine vjetra. Za vizualizaciju radiosondažnih mjerenja koriste se termodinamički dijagrami (skraćeno termodijagrami) kojih ima nekoliko vrsta (npr. Stull, 2015). Ovdje je korišten *Skew-T Log-P* dijagram koji je detaljnije objašnjen u potpoglavljima 2.8. i 2.9.

Za potrebe evaluacije simuliranih vertikalnih profila temperature zraka, rosišta te smjera i brzine vjetra (skraćeno pseudosondaža), u ovom su radu korištena visinska mjerenja s područja Hrvatske. Ona se izvode na dvije meteorološke postaje: Zagreb-Maksimir i Zadar-Zemunik. Informacije o položaju postaja prikazane su u tablici 1. Mjerenja se vrše dva puta dnevno (u 00:00 UTC i u 12:00 UTC) te su preuzeta sa stranica Sveučilišta Wyoming (https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding_legacy.html).

Tablica 1: Informacije o geografskom položaju meteoroloških postaja Zagreb-Maksimir i Zadar-Zemunik.

postaja	geografska širina	geografska dužina	nadmorska visina
Zagreb-Maksimir	45°49' N	16°2' E	123 m
Zadar-Zemunik	44°6' N	15°21' E	79 m

Za verifikaciju simuliranog radarskog odraza korišteni su oni opaženi radarima Lisca i Pasja

ravan slovenske državne meteorološke službe (slo. *Agencija Republike Slovenije za okolje*, ARSO).

2.7 Indeksi koji opisuju konvekciju

Indeksi koji opisuju konvekciju su veličine koje se lako računaju iz vertikalnih profila, a govore o stabilnosti atmosfere te potencijalu za razvoj konvekcije. Iako se lako računaju, nijedan indeks ne sadrži sve informacije o vertikalnoj strukturi atmosfere pa se analiza i prognoza konvekcije nikada ne bi smjela temeljiti samo na njihovom izračunu, već i na analizi termodijagrama te sinoptičkih i mezoskalnih uvjeta. Taszarek et al. (2017) su izračunali klimatološka obilježja indeksa nestabilnosti atmosfere za područje Europe dok će u nastavku potpoglavlja biti objašnjeni indeksi koji su korišteni u ovom istraživanju. Indeksi koji se računaju podizanjem česti zraka ovdje su izračunati tako da se podizala najnestabilnija čest zraka u donjih 300 hPa atmosfere (prefiks MU, engl. *the most unstable*).

Raspoloživa konvektivna potencijalna energija (engl. *convective available potential energy*, CAPE) najčešće je korišten konvektivni parametar. Mjera je za maksimalnu moguću kinetičku energiju (po jedinici mase) koju može imati nestabilna čest zraka, a na termodijagramu je to područje pozitivnog uzgona. CAPE se može izraziti kao:

$$\text{CAPE} = g \int_{z_{LFC}}^{z_{EL}} \frac{T_v^p - T_v^e}{T_v^e} dz, \quad (1)$$

gdje je g ubrzanje sile teže, a T_v virtualna temperatura (p indeks označava čest zraka, a e okolinu). Integral se računa od visine nivoa slobodne konvekcije z_{LFC} do visine ravnotežnog nivoa z_{EL} . Vrijednosti CAPE-a veće od 1000 J/kg u toplom dijelu godine smatraju se značajnima.

Konvektivna inhibicija (engl. *convective inhibition*, CIN) je rad koji je potrebno izvršiti da bi se čest zraka dovela do nivoa slobodne konvekcije. To je područje negativnog uzgona na termodijagramu, a definicija glasi:

$$\text{CIN} = -g \int_{z_u}^{z_{LFC}} \frac{T_v^p - T_v^e}{T_v^e} dz, \quad (2)$$

gdje je z_u visina na kojoj se čest počela uzdizati. Vrijednosti CIN-a veće od 50 J/kg predstavljaju otežane uvjete za inicijaciju konvekcije.

Postoje tri nivoa od značaja kada govorimo o analizi termodijagrama. Nivo kondenzacije (engl.

lifted condensation level, LCL) je visina na kojoj čest zraka postaje zasićena vodenom parom. Nivo na kojem čest postaje toplija od okoline zove se nivo slobodne konvekcije (engl. *level of free convection*, LFC). Visina na kojoj čest postaje hladnija od okoline je ravnotežni nivo (engl. *equilibrium level*, EL). LFC označava početak područja pozitivnog uzgona dok EL označava njegov završetak.

Indeks podizanja (engl. *lifted index*, LI) je definiran kao razlika između temperature okoline i temperature česti na 500 hPa plohi. Što je negativniji, čest je toplija od okoline što upućuje na nestabilniju atmosferu i povoljnije uvjete za razvoj konvekcije.

Smicanje vjetra (engl. *bulk wind shear*, BS) je vektorska veličina koja predstavlja promjenu iznosa i smjera horizontalnog vjetra s visinom. Može se računati unutar slojeva atmosfere različite debljine (1, 3 ili 6 km) pri čemu je ovdje korišteno smicanje vjetra u donjih 6 km atmosfere (BS06).

2.8 Termodijagram i teorija česti

Termodijagram je, uz hodograf, najvažniji alat u analizi i prognozi konvekcije. Skew-T Log-P tip termodijagrama najčešće je korišten tip termodijagrama u meteorologiji zato što ima najveći kut između izoterma i adijabata što olakšava analizu. Analiza se provodi primjenom *teorije česti* (engl. *parcel theory*). To je konceptualni model za opis atmosferske nestabilnosti koji se temelji na proučavanju vertikalnih gibanja česti zraka uz pretpostavku pseudoadijabatičnosti. Teorija česti zanemaruje sljedeće:

- vertikalne perturbacije tlaka,
- Coriolisovu silu,
- viskoznost,
- uvlačenje okolnog zraka (engl. *entrainment*),
- težinu hidrometeora,
- oslobađanje latentne topline pri kristalizaciji.

Uz gore navedeno, za vertikalnu komponentu jednadžbe gibanja možemo pisati:

$$\frac{dw}{dt} = B, \quad (3)$$

gdje je B sila uzgona. Iz pretpostavki je vidljivo kako ova teorija zanemaruje dinamičke efekte. Naime, interakcija uzlazne struje zraka i vertikalnog smicanja vjetra može povećati vertikalne brzine za dva do tri puta. Zbog toga teorija česti podcjenjuje energiju superćelijskih sustava, a precjenjuje nesuprećelijskih. Unatoč tomu, ovaj se teorijski okvir pokazuje povoljnim za proučavanje konvekcije te statičke (ne)stabilnost općenito.

Prema teoriji česti, kinetička energija česti zraka u području pozitivnog uzgona raste na račun smanjenja potencijalne energije. Dolaskom do ravnotežnog nivoa, područje pozitivnog uzgona završava te započinje pretvorba kinetičke energije u potencijalnu. Jednom kada se sva kinetička energija pretvori u potencijalnu, vertikalna brzina česti zraka w iščezava te je dosegnut vrh oblaka. Kako CAPE predstavlja mjeru za maksimalnu moguću kinetičku energiju po jedinici mase koju nestabilna čest zraka može imati, vrijedi:

$$\text{CAPE} = \frac{w_{\max}^2}{2} \quad (4)$$

Iz (4) slijedi da je $w_{\max} = \sqrt{2\text{CAPE}}$. Međutim, mjerenja pokazuju da su vertikalne brzine u prosjeku dvostruko manje, tj. stvarna kinetička energija česti zraka po jedinici mase E_k je:

$$E_k = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{2\text{CAPE}}}{2} \right)^2 = \frac{\text{CAPE}}{4}. \quad (5)$$

Dakle, u stvarnosti se ne pretvori čitav CAPE u kinetičku energiju česti zraka. Koliki će dio CAPE-a u stvarnosti biti pretvoren u kinetičku energiju uvelike ovisi o dinamičkim efektima i organizaciji konvekcije, a to nije uključeno u postavke teorije česti. Zbog toga se u praksi koristi $\frac{1}{4}$ do $\frac{1}{2}$ kao udio CAPE-a pretvorenog u kinetičku energiju česti.

2.9 Metode za određivanje visina vrhova kumulonimbusa

Teorija česti ujedno predstavlja i jednu od metoda za dijagnozu i prognozu visine vrhova kumulonimbusa.

Za dijagnozu visine opaženog Cb-a koristi se termodijagram (iz radiosondažnih mjerenja ili simulacija modela) te temperatura vrhova oblaka sa satelitskih slika. Iz empirije se pokazalo da su temperature vrhova obično više od stvarnih pa se očitane vrijednosti umanjuju za barem 5 °C (Šoljan, 2021). Ovdje je korištena korekcija od točno 5 °C. Potom se na termodijagramu, uz pomoć

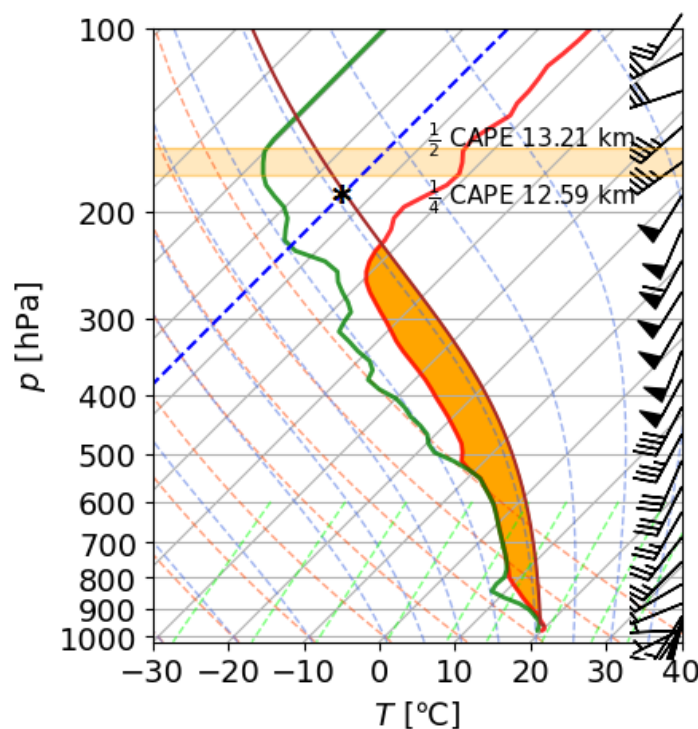
krivulje česti, odredi visina vrha Cb-a za pripadnu vrijednost temperature vrha.

Kada govorimo o prognozi visine vrha, onda se koriste isključivo pseudosondaže. Prema teoriji česti, vrh se prognozira tako da se iznad ravnotežnog nivoa doda određeni iznos CAPE-a. Tako razlikujemo dvije metode:

- $\frac{1}{4}$ CAPE-a: dodaje se $\frac{1}{4}$ iznosa CAPE-a iznad ravnotežnog nivoa,
- $\frac{1}{2}$ CAPE-a: dodaje se $\frac{1}{2}$ iznosa CAPE-a iznad ravnotežnog nivoa.

Obje se metode koriste u operativi HKZP-a te su testirane na promatranom događaju.

Primijenimo gore opisane načine dijagnoze i prognoze visine vrha Cb-a na konkretnom primjeru. Slika 11 prikazuje Skew-T Log-P dijagram za točku na sjeveru Istre ($45^{\circ}23' N$, $13^{\circ}57' E$) na temelju simuliranih vertikalnih profila modelom WRF za 30.6.2014. u 00:00 UTC.



Slika 11: Simulirani vertikalni profili za točku na sjeveru Istre na dan 30.6.2014. u 00:00 UTC. Označeni su vrhovi Cb oblaka dobiveni primjenom metoda $\frac{1}{4}$ i $\frac{1}{2}$ CAPE-a dok je crnom zvjezdicom označena visina vrha na temelju očitane temperature vrha Cb-a sa satelitske slike. Na ordinati je tlak zraka (logaritamska skala), a na apscisi je temperatura. Horizontalne linije predstavljaju izobare, izoterme su pune blijedoplave linije, suhe adijabate su blijedocrvene isprekidane linije, mokre adijabate su blijedoplave isprekidane linije, a izohume su blijedozelene isprekidane linije. Uz desni rub je prikazana razdioba vjetra po visini uobičajenim simbolom (brzina vjetra je u m/s).

Simulirani vertikalni profil temperature zraka prikazan je crvenom krivuljom, temperature rosišta zelenom dok je krivulja česti prikazana smeđom bojom. Isprekidana plava linija je izoterma $T = -64.1$ °C što je vrijednost korigirane temperature vrha oblaka u toj točki u tom trenutku očitane sa satelitske slike. Presjecište te izoterme s krivuljom česti označeno je zvjezdicom te označava opaženu visinu vrha Cb-a. Naznačeni su i vrhovi oblaka za svaku metodu te područje CAPE-a (narančasto obojano). U ovoj točki obje metode precjenjuju visinu vrha Cb-a pri čemu metoda $\frac{1}{2}$ CAPE-a više nego metoda $\frac{1}{4}$ CAPE-a.

2.10 Statističke veličine

Za potrebe evaluacije metoda za određivanje vrhova Cb-a, korišteno je nekoliko statističkih veličina. Visina vrha dobivena na temelju informacije o BT se smatrala opaženom veličinom (oznaka o), dok su se visine dobivene primjenom metoda smatrale modeliranim veličinama (oznaka m). N je broj podataka u skupu.

Varijanca je mjera varijabilnosti skupa podataka definirana kao:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2, \quad (6)$$

gdje je $\bar{o}$ srednja vrijednost skupa.

Pearsonov koeficijent korelacije (r) mjeri jakost linearne veze između dva skupa podataka te je definiran kao:

$$r = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})(m_i - \bar{m})}{\sigma_o \sigma_m}, \quad (7)$$

gdje su σ_o i σ_m standardne devijacije opaženog i modeliranog skupa. Vrijednosti ove veličine su iz intervala $[-1, 1]$ te za $|r| > 0.65$ govorimo o jakoj linearnoj vezi dok za $|r| < 0.25$ govorimo o slaboj linearnoj vezi između promatranih skupova. Vrijednosti $r < 0$ znače negativnu koreliranost skupova (npr. o raste, a m pada).

Pristranost (BIAS) govori o sistematskoj pogreški korištenih modela/metoda, tj. postoji li tendencija precjenjivanja ili podcjenjivanja promatranih veličina. Ovdje je korišten relativni BIAS dan izrazom:

$$\text{BIAS} = \frac{\bar{m} - \bar{o}}{\bar{o}} 100\%. \quad (8)$$

Korijen srednje kvadratne pogreške (engl. *root mean square error*, RMSE) je mjera pogreške

modela/metode te je pouzdanost metode to bolja što je RMSE manji. Definicija je:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - o_i)^2}. \quad (9)$$

Indeks slaganja d bezdimenzionalna je veličina koja poprima vrijednosti iz intervala $[0, 1]$ te govori o međusobnom slaganju skupova podataka ($d = 1$ znači potpuno slaganje). Formula glasi:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (o_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|m_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2}. \quad (10)$$

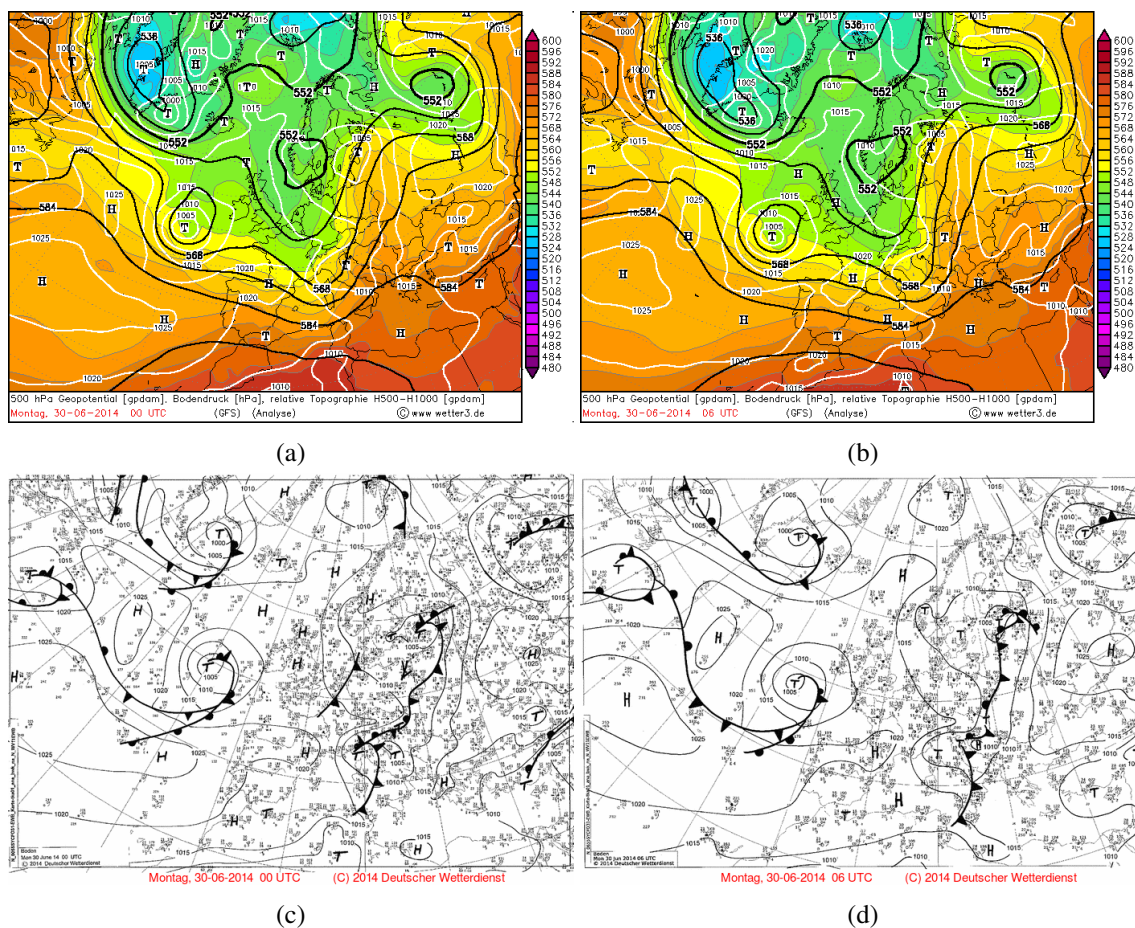
Srednja apsolutna pogreška (engl. *mean absolute error*, MAE) mjera je amplitude pogreške između opaženih i modeliranih podataka te je definirana kao:

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |m_i - o_i|. \quad (11)$$

3 Opis događaja 30.6.2014.

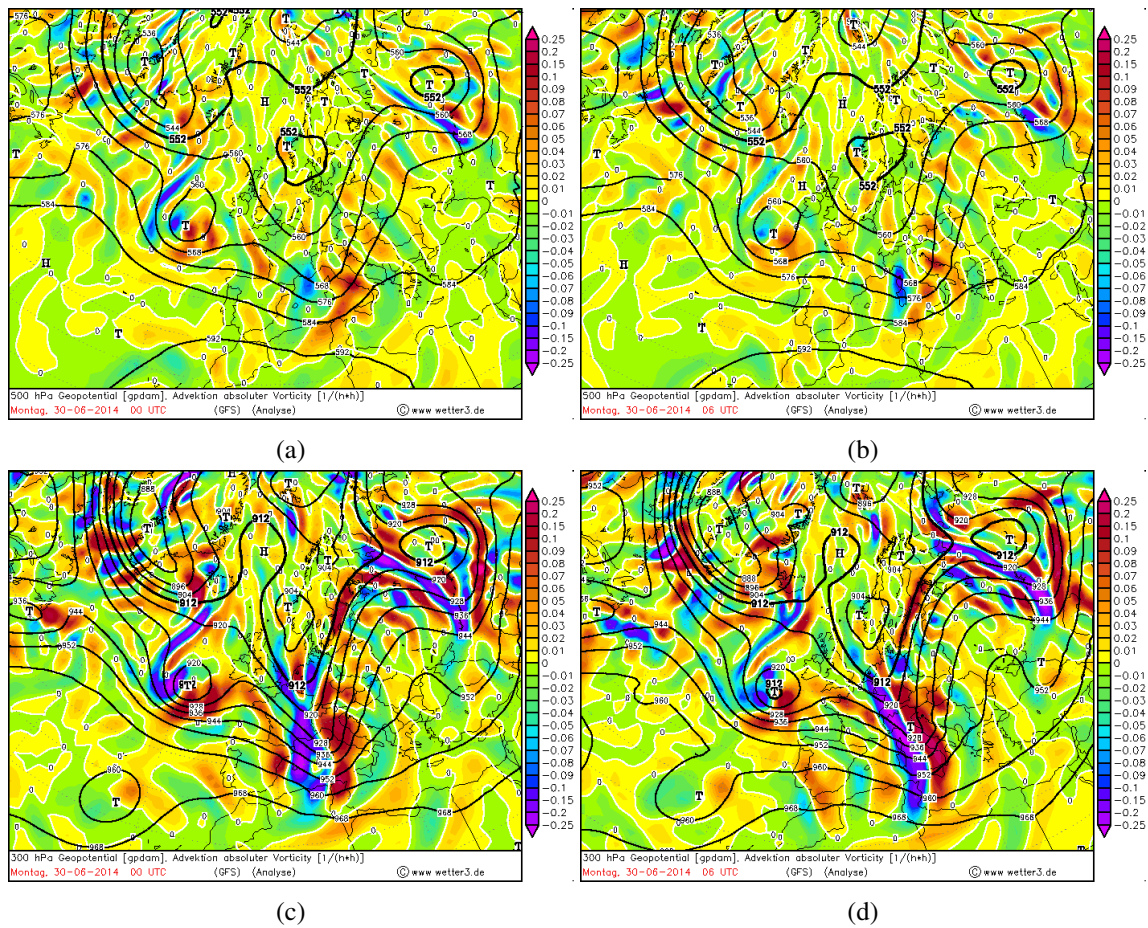
3.1 Sinoptički uvjeti

Sinoptička analiza promatranog događaja napravljena je na temelju izlaza globalnog numeričkog modela GFS (engl. *Global Forecast System*), a koji su dostupni na https://www.wetter3.de/archiv_gfs_dt.html. Slika 12 prikazuje prizemnu i visinsku sinoptičku situaciju nad Europom na dan 30.6.2014. Sa slike 12a je vidljivo kako se je područje Hrvatske nalazilo se na prednjoj strani negativno nagnute visinske doline (os doline nagnuta je od SZ prema JJ). Os doline premještala se preko Italije i Hrvatske tijekom dana (slika 12b). Prizemno je promatrano područje bilo pod utjecajem polja sniženog tlaka zraka kao rezultat formiranja Genovske ciklone čija se hladna fronta premještala istočno od Italije (slike 12c i 12d).



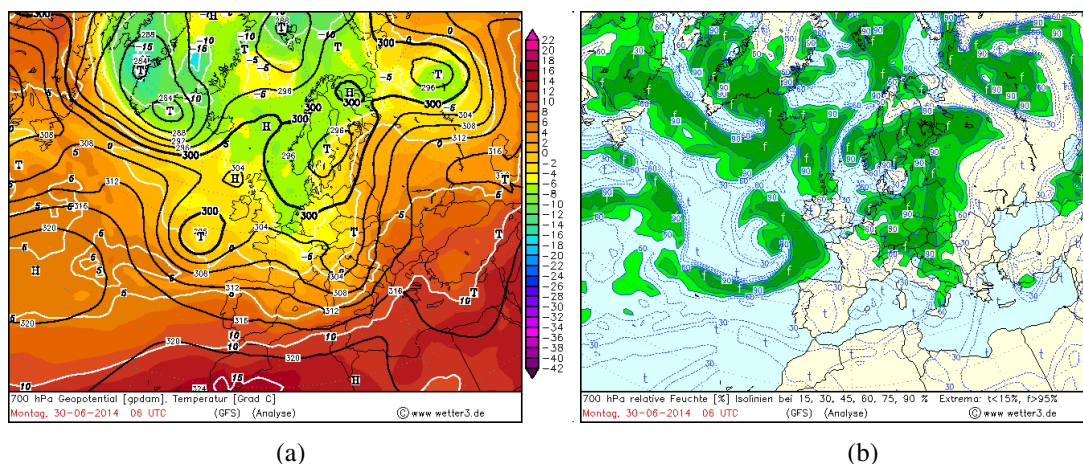
Slika 12: Prizemna i visinska sinoptička situacija 30.6.2014. (a, b) Prostorna raspodjela geopotencijala na 500 hPa plohi (oboјano u pozadini, [gpdam]), prizemni tlak (bijeले linije, [hPa]), relativna topografija RH_{1000}^{500} (crne linije, [gpdam]) u: (a) 00:00 UTC i (b) 06:00 UTC. (c, d) Prizemni frontalni sustavi te raspodjela tlaka ([hPa]) u: (c) 00:00 UTC i (d) 06:00 UTC.

Sa slike 13 se vidi postojanje advekcije pozitivne apsolutne vrtložnosti koja raste s visinom nad područjem Italije i Hrvatske. Takva dinamika strujanja u gornjoj troposferi uzrokuje nastanak visinske divergencije što, prema ω -jednadžbi, predstavlja povoljne uvjete za ciklogenezu pri tlu, a time i inicijaciju DVK (za detalje vidjeti npr. Markowski i Richardson, 2010).



Slika 13: Advekcija apsolutne vrtložnosti [h^{-2}] 30.6.2014. na: (a) 500 hPa u 00:00 UTC, (b) 500 hPa u 06:00 UTC, (c) 300 hPa u 00:00 UTC, (d) na 300 hPa u 06:00 UTC. Crnim su krivuljama označene izolinije geopotencijala [gpdam].

Visinsko je strujanje na 700 hPa plohi u noćnim i jutarnjim satima nad područjem Italije i Hrvatske bilo jugozapadnog smjera što je uzrokovalo advekciju vlažnog zraka s mora (slike 14a i 14b). U ostatku dana prevladavalo je zapadno visinsko strujanje. Mikuš et al. (2012) navode kako je ovakva sinoptička situacija, tj. jugozapadno visinsko strujanje na prednjoj strani sustava niskog tlaka zraka, tipično predkonvektivno okruženje za područje Hrvatske.



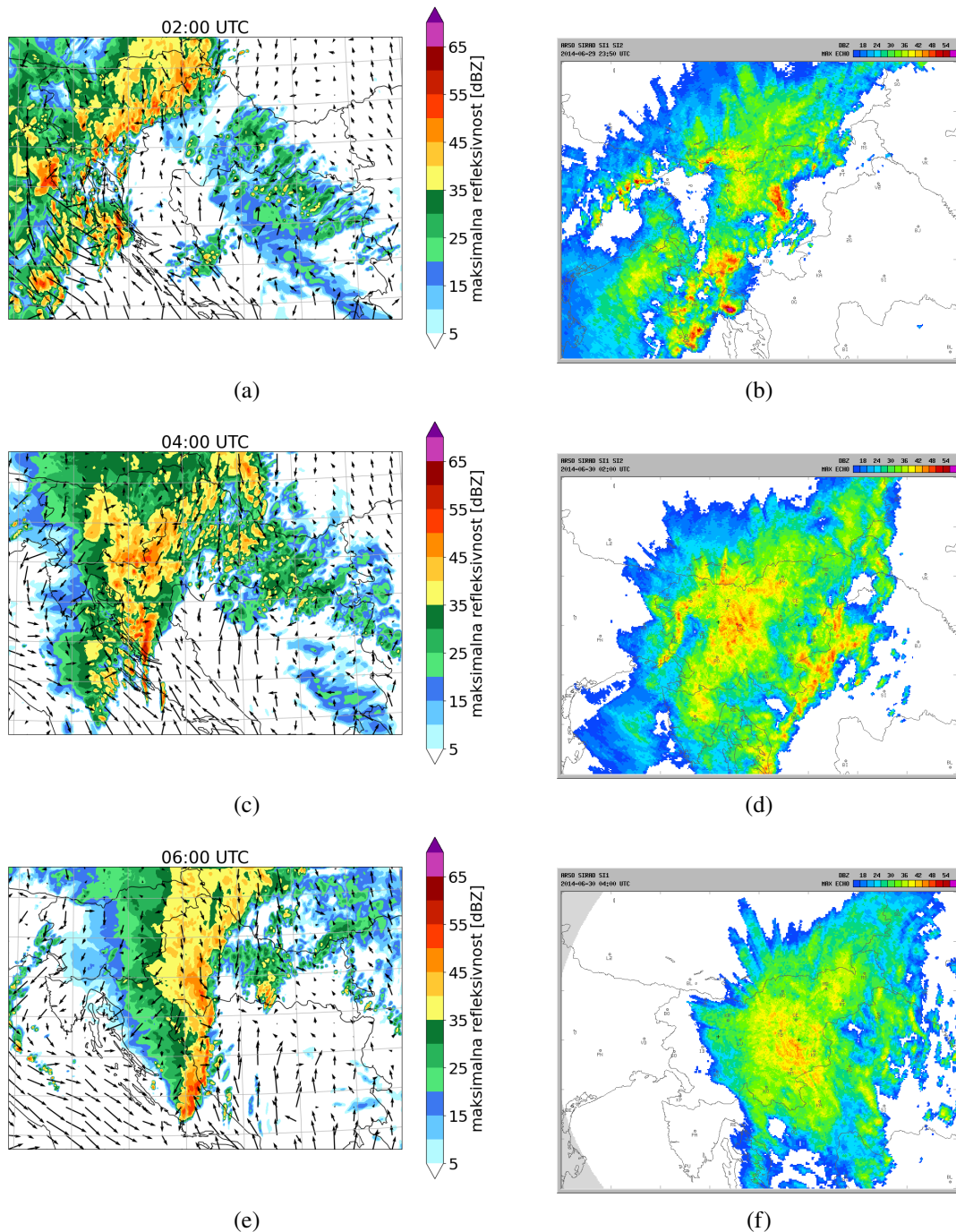
Slika 14: Uvjeti na 700 hPa plohi 30.6.2014. u 06:00 UTC. (a) Prostorna raspodjela temperature (oboјano u pozadini, [°C]) i izoliniје geopotencijala (crne krivulје, [gpdam]). (b) Relativna vlažnost zraka [%] pri čemu je oznaka f za vlažnost > 95 %, a t za vlažnost < 15 %.

3.2 Mezoskalni uvjeti

Razmotrimo mezoskalne uvjete simulirane modelom WRF te usporedimo iste s mjerenјima.

Tijekom ovog događaja nastao je linijski organiziran konvektivni sustav čije kretanje i intenzitet možemo pratiti kroz radarski odraz. Iz simuliranog radarskog odraza (slike 15a, 15c, 15e) vidljivo je kako je sustav nastao u noći s 29.6.2014. na 30.6.2014. nad zapadnim dijelom domene d03. Nadalje, sustav je bio rasprostranjen u smjeru sjever-jug toliko da je svojim gibanjem prema istoku zahvatio sve dijelove Slovenije, Hrvatske te BiH. Na području Istre, Kvarnera te oko Zadra (u različitim vremenima) reflektivnost je dosežala do 50 dBZ. U jutarnјim satima sustav slabi te je radarska reflektivnost uglavnom manja od 40 dBZ (slika 15e). Izuzetak je područje u zaleđu Splita uz granicu s BiH te dio oko Makarske gdje je model simulirao reflektivnost oko 50 dBZ u 09:00 UTC (slika 16a). U to vrijeme na jugu Istre dolazi do ponovnog stvaranja konvektivne naoblake koja nestaje u narednom satu. Model je simulirao prizemni vjetar jugoistočnog smjera duž istočne obale Jadrana. Takvo se strujanje na području sjevera Istre i Kvarnera susreće sa sjevernim i sjeverozapadnim vjetrom te dolazi do nastanka prizemne zone konvergencije strujanja (slika 15a). U ostatku domene vjetar je slab te promjenjivog smjera. Premještanјem hladne fronte preko Jadrana, vjetar zakreće ciklonalno te jugoistočnjak prelazi u buru na sjeverozapadu domene, a u unutrašnjosti Hrvatske jača vjetar sjevernog smjera (slike 15c i 15e). Na otvorenom moru i uz zapadnu obalu Jadrana strujanje je sjeverozapadnog smjera.

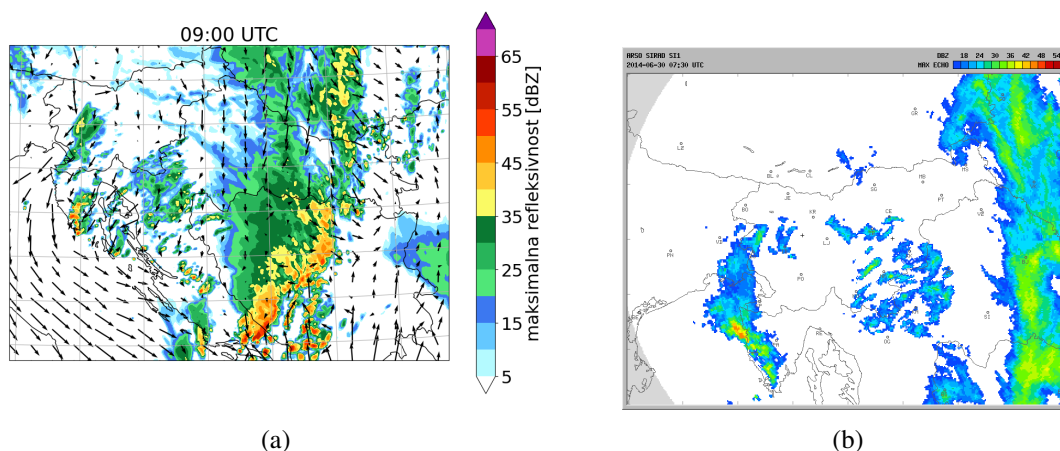
Simuliranu radarsku reflektivnost možemo usporediti s onom opaženom samo za dio domene



Slika 15: (a, c, e) Simulirana maksimalna radarska refleksivnost i polje vjetra na 10 m visine 30.6.2014. u: (a) 02:00 UTC, (c) 04:00 UTC, (e) 06:00 UTC. (b, d, f) Opaženi maksimalni radarski odraz radarima Lisca i Pasja ravan 30.6.2014. u: (b) 23:50 UTC, (d) 02:00 UTC, (f) 04:00 UTC.

d03 zbog ograničene prostorne pokrivenosti radarom. S radarskih je slika (15b, 15d, 15f) vidljivo da je model dobro simulirao kretanje konvektivnog sustava od zapada prema istoku domene. Prelaskom preko Gorske Hrvatske sustav slabi te se opaža naoblaka refleksivnosti od 40-tak dBZ što je simulirano i modelom. Međutim, vidljivo je kašnjenje modela. Radar bilježi konvektivnu naoblaku

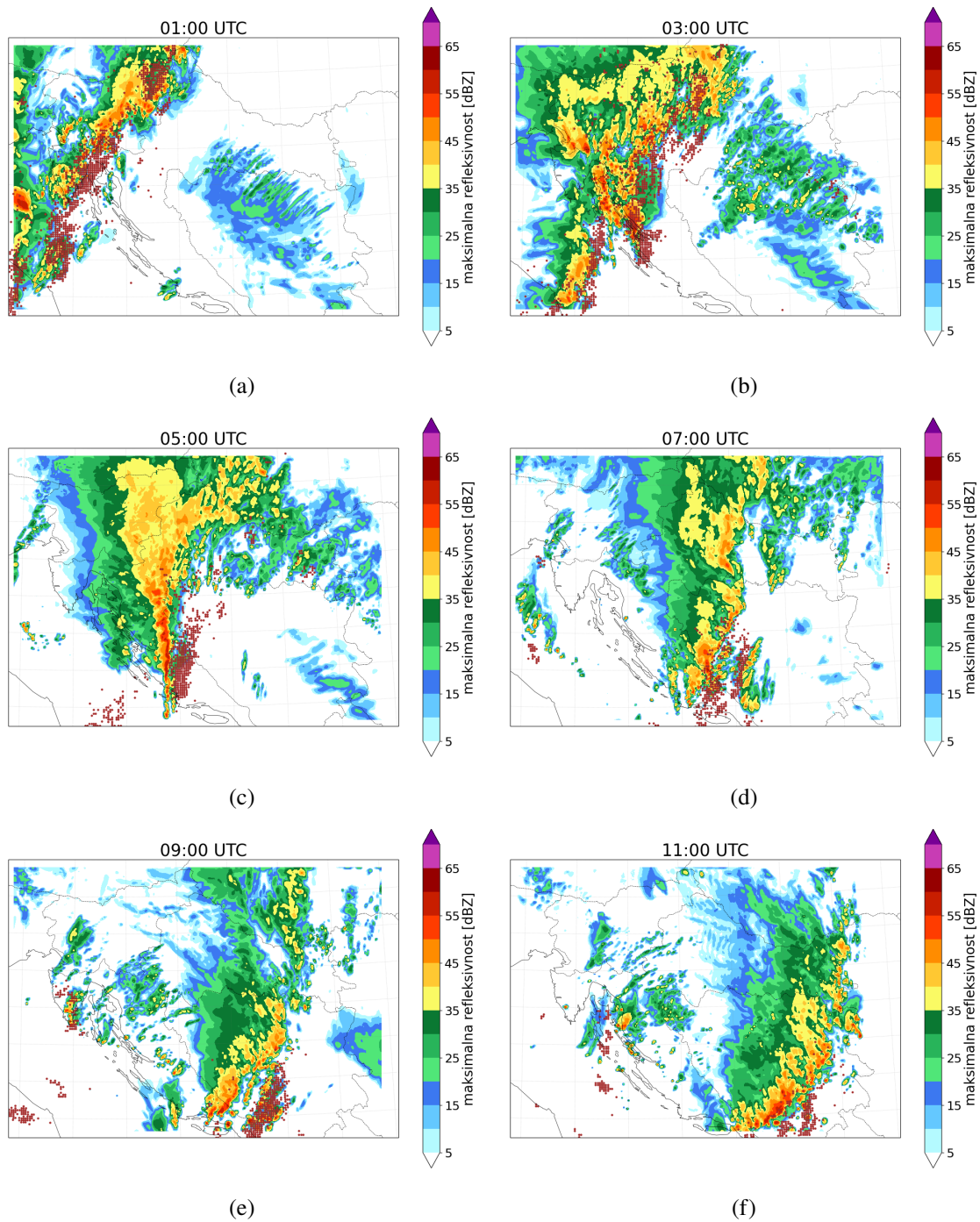
na sjeveru Istre u 22:40 29.6.2014. dok je u 23:50 konvekcijom zahvaćena cijela Istra te šire riječko područje (slika 15b). Prema modelu takav događaj slijedi oko 02:00 UTC (slika 15a). Razvoj ponovne konvekcije nad Istrom u jutarnjim satima opažen je i radarima (slika 16b) te je ona posljedica gibanja manjeg sustava nastalog ispred Tršćanskog zaljeva oko 06:00 UTC što nije simulirano modelom.



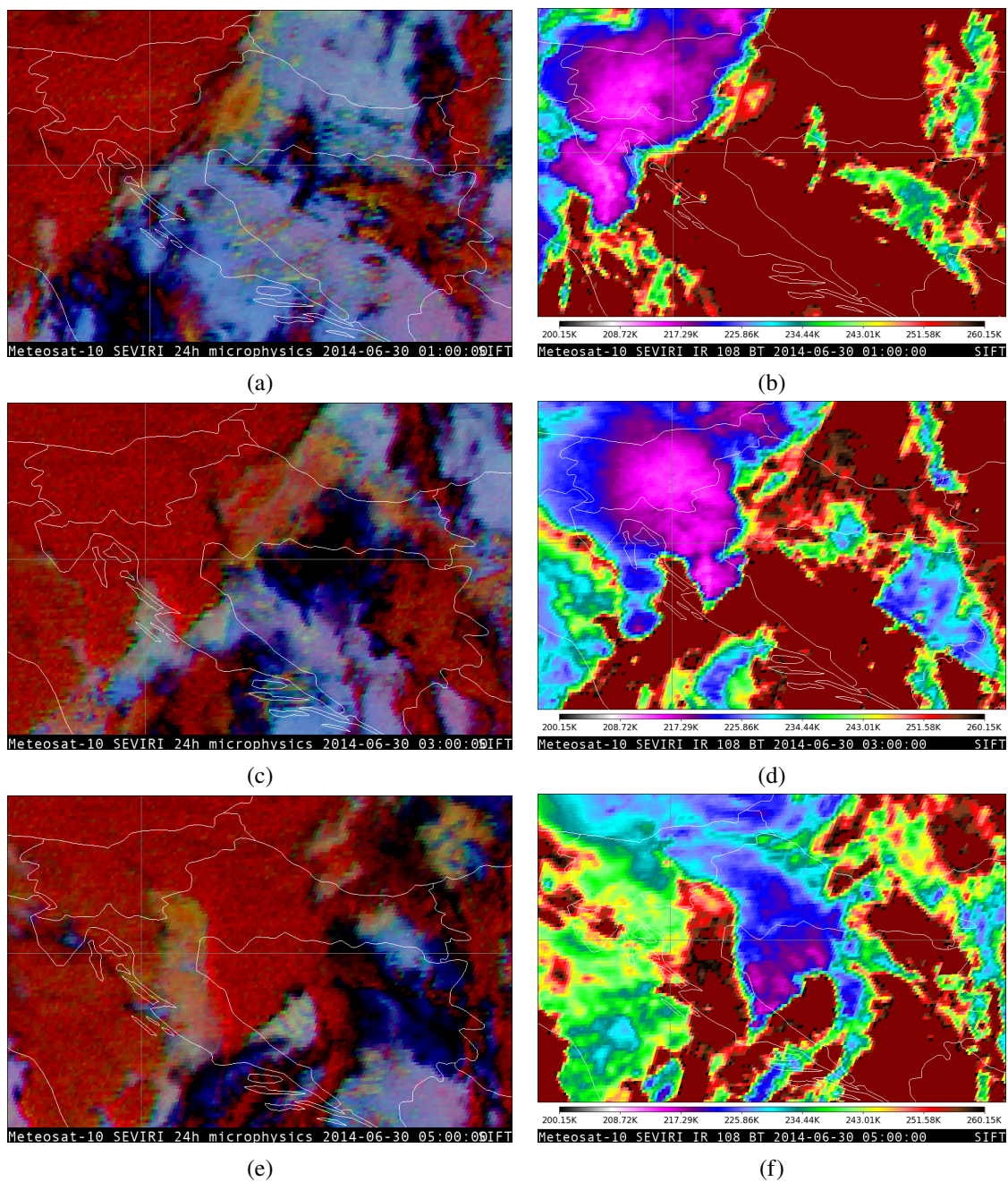
Slika 16: Nastavak slike 15. (a) Simulirana maksimalna radarska reflektivnost i polje vjetra na 10 m visine 30.6.2014. u 09:00 UTC. (b) Opaženi maksimalni radarski odraz radarima Lisca i Pasja ravan 30.6.2014. u 07:30 UTC.

Za praćenje konvekcije u vremenu i prostoru te za dodatnu validaciju modela korišteni su i podatci o opaženim udarima munja. To je posebno korisno za one dijelove domene koji se nalaze izvan dometa radara. Prikaz je dan na slici 17. Smeđim su točkicama označeni udari munja za 30-minutna razdoblja. Na primjer, slika 17c prikazuje simuliranu radarsku reflektivnost u 05:00 UTC, a smeđe točkice su udari munja za razdoblje od 04:30 do 05:00 UTC. Možemo zaključiti da je kretanje konvektivnog sustava dobro modelirano i u ostatku domene. Nadalje, vidljivo je iščezavanje udara munja na širem području istočne Hrvatske te sjeverne BiH od 08:00 UTC do 11:00 UTC (slike 17e i 17f). To znači da je na tim područjima intenzitet oluje slabiji nego na jugu tih država (vidjeti diskusiju o raspodjeli naboja u Cb-u u potpoglavlju 1.3).

Postojanje konvektivne naoblake vidljivo je i na satelitskim produktima 24-satna mikrofizika te BT (slika 18). Ova mjerenja potvrđuju već gore navedeno: gibanje konvektivne oluje od zapada prema istoku, pokrivenost cijele domene d03, slabiji intenzitet oluje nad Slavonijom i sjevernom BiH (topliji vrhovi Cb-a).



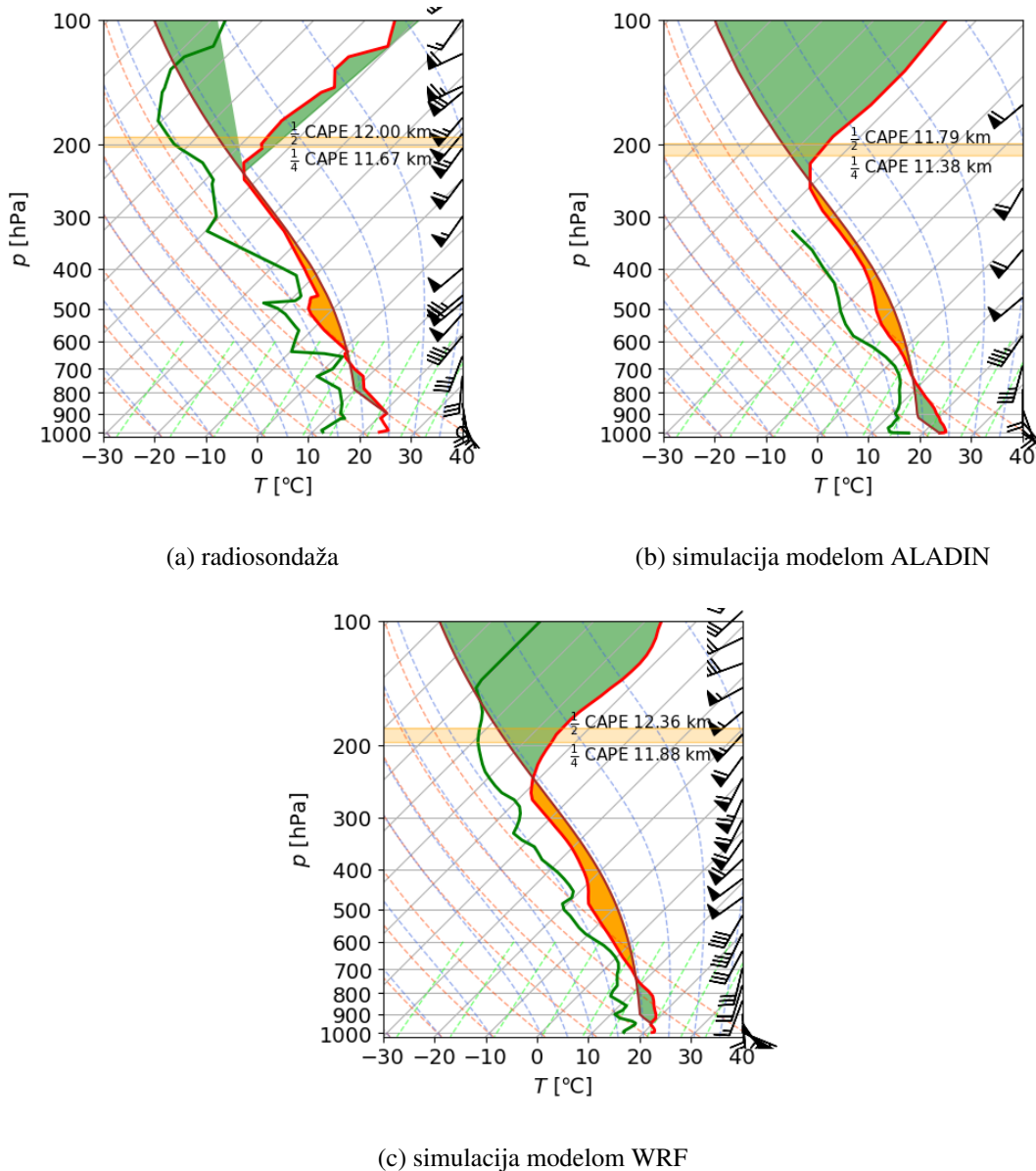
Slika 17: Simulirana maksimalna radarska refleksivnost (obojano u pozadini) i opaženi udari munja tijekom 30-minutnog intervala (smeđe točkice) za 30.6.2014. u: (a) 01:00 UTC, (b) 03:00 UTC, (c) 05:00 UTC, (d) 07:00 UTC, (e) 09:00 UTC, (f) 11:00 UTC.



Slika 18: Satelitski produkti za 30.6.2014. (a, c, e) 24-satna mikrofizika u: (a) 01:00 UTC, (c) 03:00 UTC, (e) 05:00 UTC. (b, d, f) BT produkt u: (b) 01:00 UTC, (d) 03:00 UTC, (f) 05:00 UTC.

3.2.1 Usporedba vertikalnih profila za postaju Zadar-Zemunik

Iz gornjih je razmatranja vidljivo kako je konvektivna aktivnost na zadarskom području započela oko 03:00 UTC pa ćemo usporediti simulirane vertikalne profile s onim opaženim na postaji Zadar-Zemunik 30.6.2014. u 00:00 UTC (slika 19).



Slika 19: Termodijagrami za postaju Zadar-Zemunik 30.6.2014. u 00:00 UTC dobiveni na temelju: (a) radiosondažnog mjerenja, (b) simulacije modela ALADIN, (c) simulacije modela WRF.

Termodijagrami za tri izvora prikazani su na slici 19. Oba su modela uspješno simulirala tanak sloj inverzije neposredno uz tlo, uvjetno nestabilna sloj zraka do ≈ 500 hPa te mokroadijabatički gradijent u gornjoj troposferi. Granični slojevi modelirani WRF-om i ALADIN-om su vlažniji

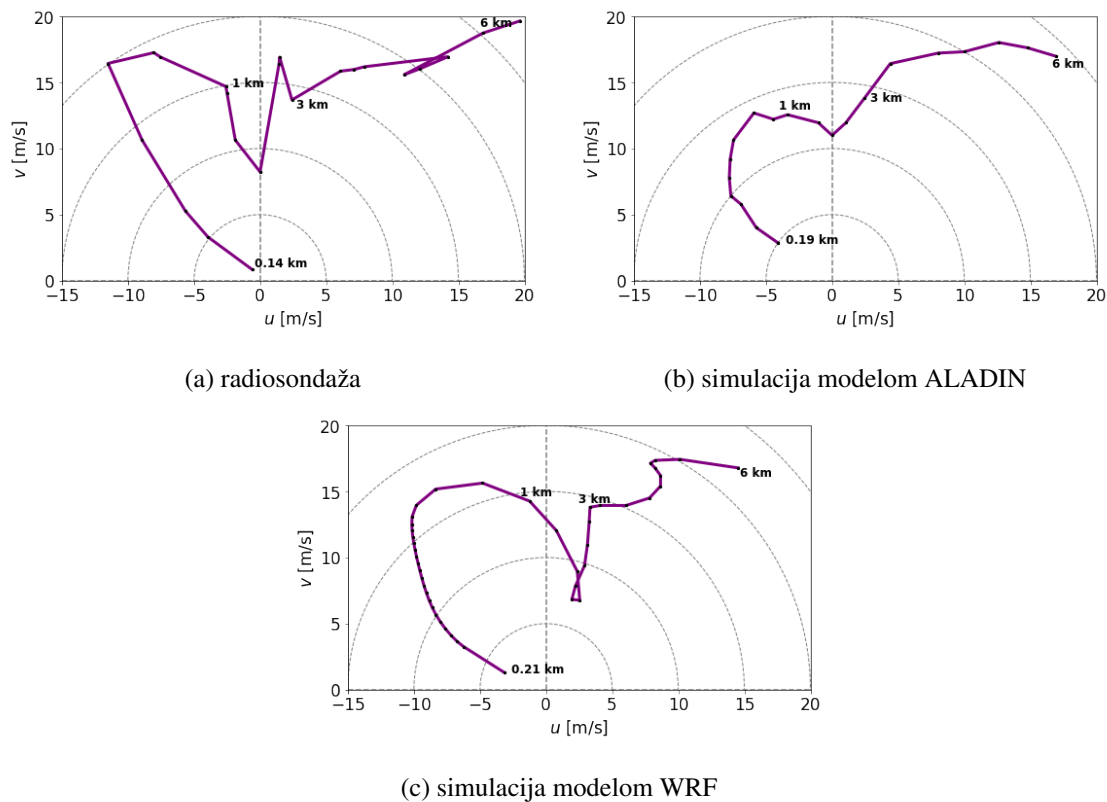
od opaženog. Naime, za radiosondažno mjerenje u graničnom sloju vrijedi $T_d \in [11, 14]$ °C, za ALADIN $T_d \in [12, 18]$ °C dok je kod WRF simulacije $T_d \in [12, 16]$ °C. Modeli su dobro simulirali vlagom gotovo zasićeni sloj zraka na nivou oko 650 hPa. Iz izgleda termodijagrama je jasno da je riječ o izdignutoj konvekciji; prema radiosondaži najnestabilniji sloj zraka je na nivou od 897 hPa (≈ 1 km).

Usporedimo vertikalne profile kroz vrijednosti indeksa nestabilnosti koje su prikazane u tablici 2. Model ALADIN je dobro simulirao vrijednost MUCAPE-a dok je model WRF istu precijenio za faktor 1.8. Međutim, vrijednosti su istog reda veličine te upućuju na postojanje nemale raspoložive potencijalne energije za konvekciju. Vrijednosti konvektivne inhibicije su značajne u sva tri slučaja pri čemu je ona najveća za model ALADIN. Budući da je došlo do inicijacije konvekcije, te su vrijednosti u narednim satima smanjene zbog dovoljno jake linearne prisile na sinoptičkoj skali (premještanje hladne fronte) te mehanizama dizanja na mezoskali (konvergencija prizemnog strujanja). Oba su modela podcijenila visinu MULCL-a. To je u skladu s diskusijom vlage u graničnom sloju; modeli simuliraju vlažnije uvjete u graničnom sloju pa su i nivoi kondenzacije niži. Analogno vrijedi i za visine MULFC-a pri čemu su visine ovog kritičnog nivoa bolje simulirane u usporedbi s visinama MULCL-a (odstupanja su manja). U modelima najnestabilnija čest zraka ranije postane zasićena vodenom parom (niži MULCL) te se počne dizati po mokroj adijabati. Dižući se po mokroj adijabati, čest se po metru dizanja hladi sporije nego dižući se po suhoj adijabati te tako čest ranije postane toplija od okoline, tj. dosegne nivo slobodne konvekcije. Visina MUEL-a je najviša kod radiosondažnog mjerenja, a najniža kod ALADIN-a. Tomu je tako jer ALADIN simulira nešto manju vrijednost MUCAPE-a, a dvostruko veću vrijednost MUCIN-a u odnosu na radiosondažu. Možemo reći da je visina ovog kritičnog nivoa uspješno simulirana. Vrijednosti MULI-a upućuju na umjereno nestabilnu atmosferu.

Tablica 2: Indeksi nestabilnosti za postaju Zadar-Zemunik 30.6.2014. u 00:00 UTC.

izvor indeks	radiosondaža	ALADIN	WRF
MUCAPE [J/kg]	528	509	972
MUCIN [J/kg]	-80	-165	-107
MULCL [km]	2.1	0.839	0.947
MULFC [km]	3.8	2.65	2.67
MUEL [km]	10.72	10.45	10.60
MULI [°C]	-4.8	-3.4	-5.0
BS06 [m/s]	28.6	25.6	24.5

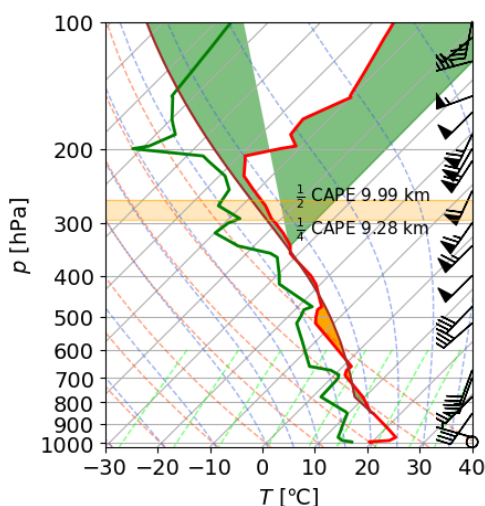
Slika 20 prikazuje hodografe vektora vjetra po visini za radiosondažu te simulacije modela. Vidimo da u sva tri slučaja vjetar zakreće ciklonalno s visinom (govorimo o hladnoj advekciji) te mu brzine raste. Tako slab jugoistočnjak pri tlu visinom prelazi u jugozapadno strujanje brzine veće od 20 m/s. Oba modela dobro simuliraju uvjete jačeg smicanja vjetra u najnižih 1 km (zakrivljeni oblik hodografa). Model WRF simulira jače promjene iznosa vjetra na nivoima između 2 i 6 km dok radiosondaža i ALADIN na tim nivoima daju linijski oblik hodografa. Sveukupno gledano, vrijednosti $BS06 > 20$ m/s upućuje na itekako organiziranu konvekciju; sustav je postojao više od 10 sati.



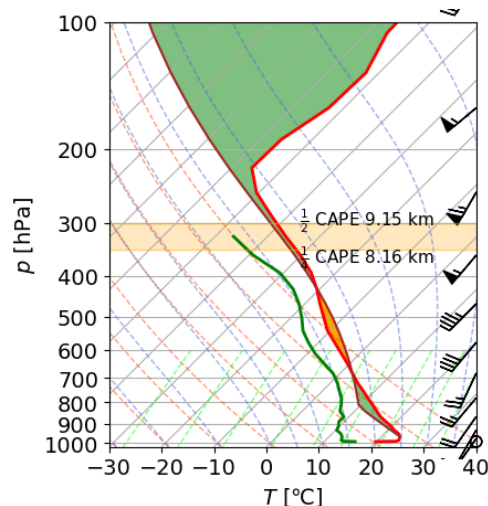
Slika 20: Hodografi vektora vjetra za postaju Zadar-Zemunik 30.6.2014. u 00:00 UTC dobiveni na temelju: (a) radiosondažnog mjerenja, (b) simulacije modela ALADIN, (c) simulacije modela WRF.

3.2.2 Usporedba vertikalnih profila za postaju Zagreb-Maksimir

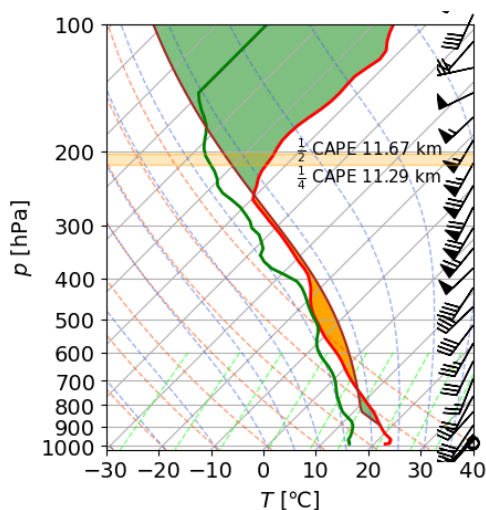
Za konvekciju na sjeverozapadu Hrvatske te okolnom području reprezentativno je visinsko mjerenje s postaje Zagreb-Maksimir također u 00:00 UTC. Pripadni termodijagrami prikazani su na slici 21. Vertikalni temperaturni profili su dobro simulirani te su slični onima opaženima; prizemna inverzija, uvjetno nestabilan profil do 500 hPa plohe te mokroadijabatički gradijent u gornjoj troposferi.



(a) radiosondaža



(b) simulacija modelom ALADIN



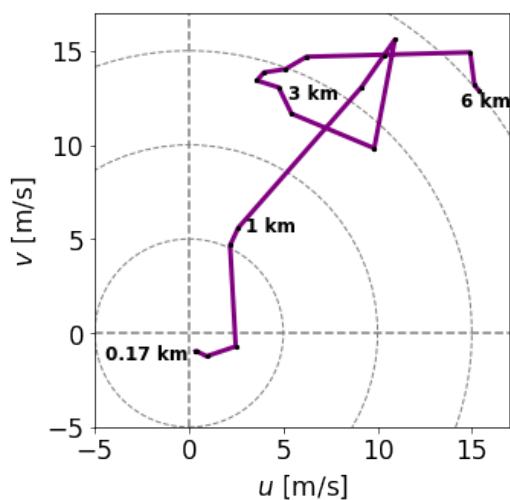
(c) simulacija modelom WRF

Slika 21: Termodijagrami za postaju Zagreb-Maksimir 30.6.2014. u 00:00 UTC dobiveni na temelju: (a) radiosondažnog mjerenja, (b) simulacije modela ALADIN, (c) simulacije modela WRF.

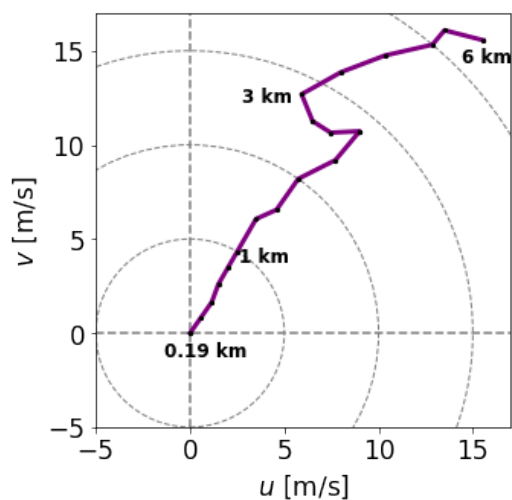
Indeksi nestabilnosti za postaju Zagreb-Maksimir prikazani su u tablici 3. Model ALADIN je podcijenio vrijednost MUCAPE-a za svega 8 % dok je WRF istu precijenio za gotovo tri puta. Oba modela daju niže MULCL-ove te MULFC-ove. ALADIN je puno uspješniji u simulaciji visine MUEL-a nego WRF koji ga precjenjuje za 3.76 km. Da je WRF modelirao nestabilnije i povoljnije uvjete za inicijaciju DVK vidi se i iz vrijednosti MULI-a. Vrijednosti BS06 su dobro simulirane modelima kao i promjena vjetra po visini (slika 22). Strujanje visinom zadržava jugozapadni smjer, a brzina mu raste s visinom.

Tablica 3: Indeksi nestabilnosti za postaju Zagreb-Maksimir 30.6.2014. u 00:00 UTC.

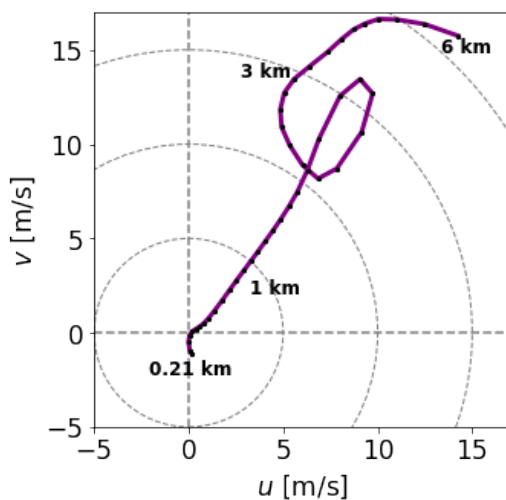
izvor indeks	radiosondaža	ALADIN	WRF
MUCAPE [J/kg]	193	177	570
MUCIN [J/kg]	-16	-108	-50
MULCL [km]	2.1	1.76	1.68
MULFC [km]	3.9	3.24	2.62
MUEL [km]	6.5	6.72	10.26
MULI [°C]	-2.8	-1.7	-4.0
BS06 [m/s]	20.6	22.0	21.9



(a) radiosondaža



(b) simulacija modelom ALADIN



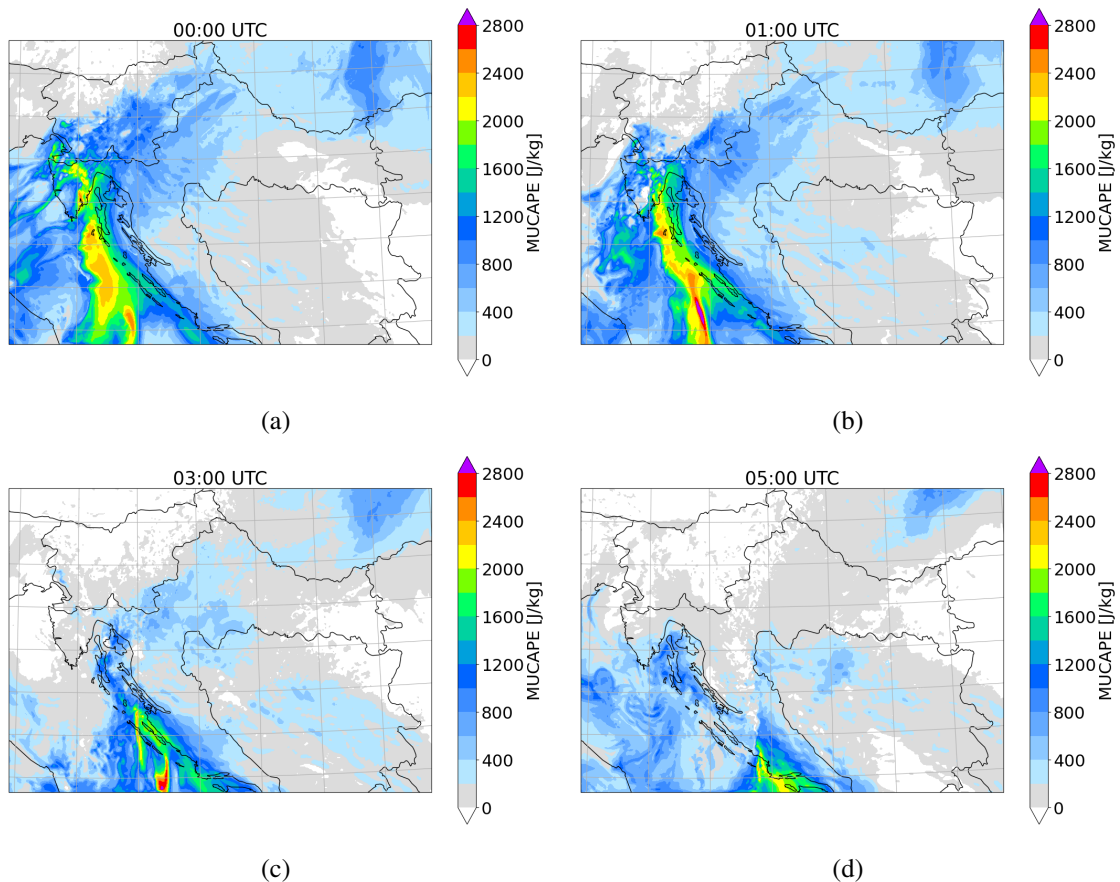
(c) simulacija modelom WRF

Slika 22: Hodografi vektora vjeta za postaju Zagreb-Maksimir 30.6.2014. u 00:00 UTC na temelju: (a) radiosondažnog mjerenja, (b) simulacije modela ALADIN, (c) simulacije modela WRF.

3.2.3 Odabir područja za testiranje metoda

Na termodijagramima na slikama 19 i 21 naznačene su visine vrhova konvektivnih oblaka koje bi se dobile primjenom metoda $\frac{1}{4}$ i $\frac{1}{2}$ CAPE-a. Iz opisa metoda, a i iz spomenutih prikaza, jasno je kako je račun visina vrhova Cb-a ovisan o iznosu MUCAPE-a te visini MUEL-a. Budući da ovaj rad za cilj ima evaluaciju metoda, nastojala sam testiranje istih napraviti na područjima na kojima je model simulirao dovoljnu nestabilnost i vlagu, tj. MUCAPE.

Horizontalna raspodjela MUCAPE-a prikazana je na slici 23. Nad područjem Istre su oko 00:00 UTC vrijednosti značajne, lokalno veće od 2000 J/kg (slika 23a). Nadalje, u to je vrijeme nad poluotokom zabilježen velik broj udara munja (slika 17a) te su vrhovi oblaka vrlo niskih temperatura ($T \sim -60$ °C, slika 18b). Isto vrijedi i za npr. područje Kvarnera između 01:00 i 02:00 UTC.

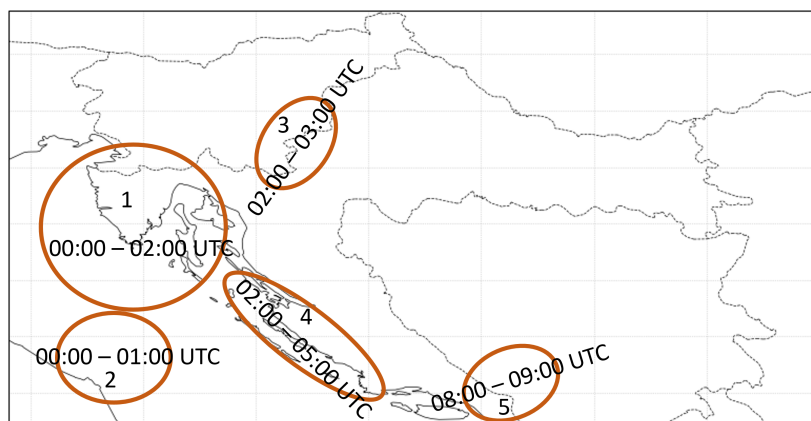


Slika 23: Simulirano 2D polje MUCAPE-a za 30.6.2014. u: (a) 00:00 UTC, (b) 01:00 UTC, (c) 03:00 UTC i (d) 05:00 UTC.

Nasuprot tomu, nad sjeveroistočnom Slovenijom model ne simulira vrijednosti MUCAPE-a veće od 400 J/kg oko 01:00 UTC (slika 23b), a tada su nad tim područjem zabilježene munje (slika

17a) te jednako hladni vrhovi Cb-a (slika 18b). Neočekivano niske vrijednosti MUCAPE-a su i nad područjem Gorske Hrvatske u razdoblju od 02:00 do 03:00 UTC (slika 23c) što uz temperature vrha i do -65°C (slika 18d) opravdano rezultira većim pogreškama kod korištenja metoda na tim područjima.

Kako bi se nesavršenosti modela u simuliranju atmosferskih uvjeta što je više moguće uklonile iz ove analize, metode su testirane na područjima na kojima su opaženi udari munja te su vrijednosti MUCAPE-a i BT-a usklađene. Pod pojmom usklađenosti se misli na to da visoke vrijednosti MUCAPE-a budu popraćene niskim temperaturama vrhova (npr. $\text{MUCAPE} > 800 \text{ J/kg}$ i $T < -40^{\circ}\text{C}$). Na temelju navedenih uvjeta, metode su provjerene na područjima označenim na slici 24. To su: Istra i Kvarner (područje 1), dijelovi otvorenog mora nad sjevernim Jadranom (područje 2), dio sjeverozapadne Hrvatske (područje 3), obalno područje od Paga do Splita (područje 4), jug BiH uz granicu s Hrvatskom (područje 5).



Slika 24: Vremenski periodi i područja (smeđi oblici) na kojima su testirane metode za određivanje visina vrhova Cb oblaka.

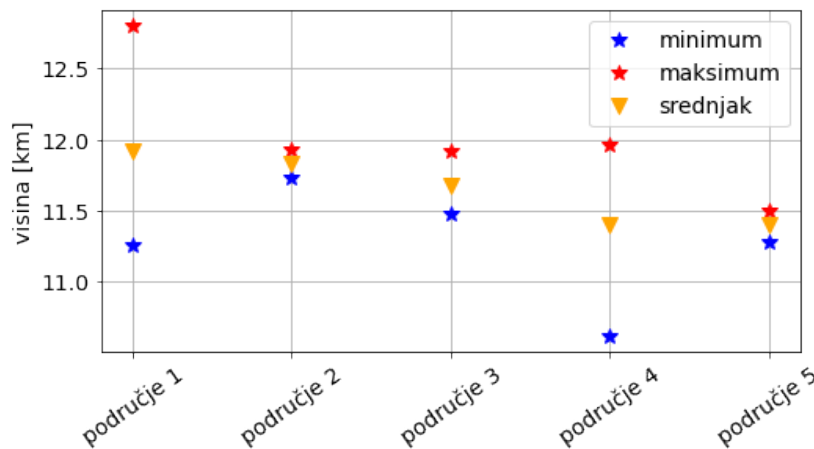
4 Rezultati i diskusija

4.1 Statistička analiza

Metode opisane u potpoglavlju 2.9 testirane su u ukupno 61 točki na područjima označenima na slici 24. Ekstremne te srednje vrijednosti opaženih visina vrhova Cb-a za pet promatranih područja navedene su u tablici 4 dok je prikaz dan na slici 25.

Tablica 4: Ekstremne vrijednosti, srednja vrijednost te amplituda opaženih visina vrhova Cb-a za promatrana područja.

visina \ područje	1	2	3	4	5
minimum [km]	11.26	11.73	11.48	10.62	11.28
maksimum [km]	12.8	11.93	11.92	11.96	11.5
srednjak [km]	11.92	11.83	11.68	11.40	11.40
amplituda [km]	1.54	0.20	0.44	1.34	0.22

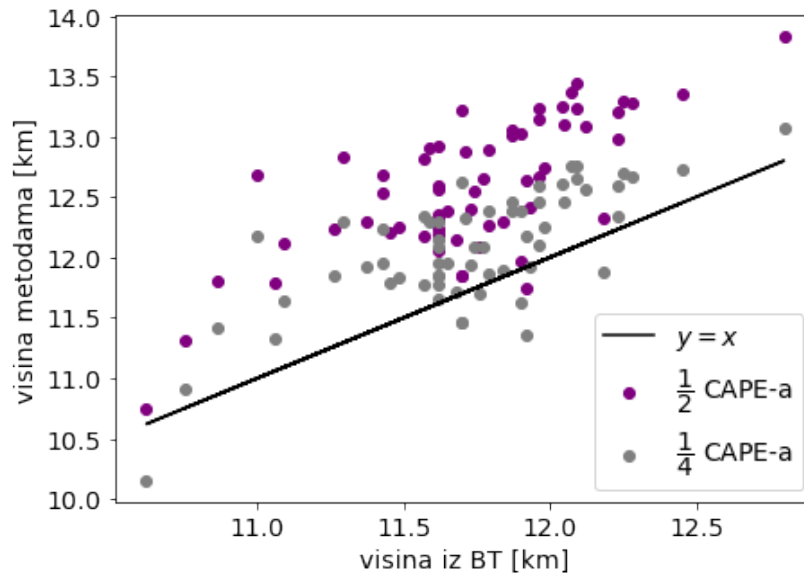


Slika 25: Ekstremne te srednje vrijednosti opaženih visina vrhova Cb-a za promatrana područja.

Nad područjem Istre i Kvarnera javljaju se najviši kumulonimbusi čiji vrhovi dosežu vrijednosti do 12.80 km. Također, srednja vrijednost visine vrha je najveća na ovom području te iznosi 11.92 km. Nad područjem srednjeg Jadrana zabilježena je najniža vrijednost visine vrha Cb-a u iznosu od 10.62 km. I ovo razmatranje potvrđuje ranije navedene navode o slabljenju konvekcije tijekom gibanja prema istoku domene.

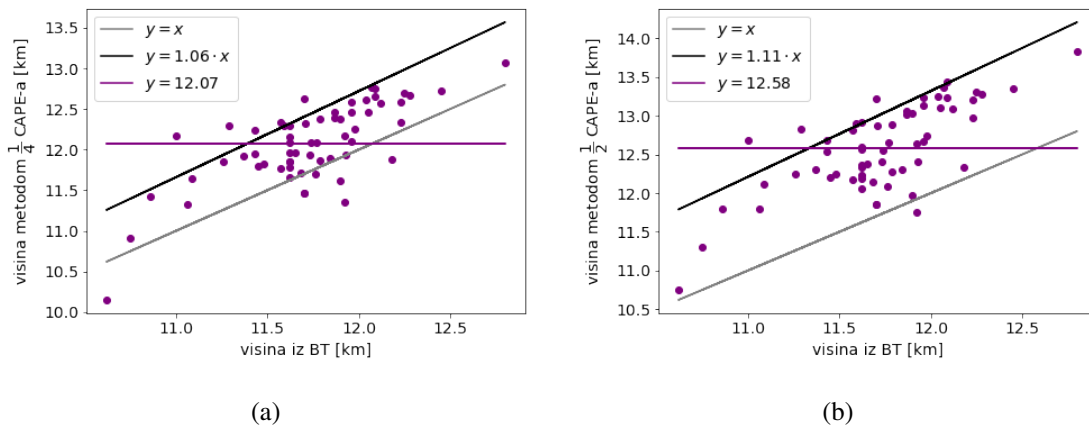
Slika 26 prikazuje dijagrame raspršenja visina vrhova Cb-a za metode $\frac{1}{4}$ i $\frac{1}{2}$ CAPE-a. Ljubičaste i sive točkice predstavljaju uređene parove (h_1, h_2) gdje je h_1 visina Cb-a dobivena na temelju

vrijednosti temperature vrha oblaka (BT), a h_2 je visina dobivena primjenom metoda. Iz položaja crnog pravca $y = x$ vidimo kako obje metode, u većini točaka, precjenjuju visine vrhova Cb-a pri čemu metoda $\frac{1}{2}$ CAPE-a daje veća odstupanja nego metoda $\frac{1}{4}$ CAPE-a.



Slika 26: Dijagrami raspršenja visina vrhova Cb-a za metode $\frac{1}{4}$ CAPE-a (sive točkice) te $\frac{1}{2}$ CAPE-a (ljubičaste točkice). Crna krivulja predstavlja pravac $y = x$.

Dijagrami raspršenja visina vrhova Cb-a za svaku metodu zasebno prikazani su na slici 27. Metoda $\frac{1}{4}$ CAPE-a u 55 točaka precjenjuje visinu vrhova Cb-a pri čemu su ta odstupanja u njih 50 (što je 90 % od 55) manja od 6 % (slika 27a). Metoda $\frac{1}{2}$ CAPE-a pak precjenjuje visine vrhova u 60 točaka s tim da su u 10 % od tih točaka odstupanja veća ili jednaka od 11 % (slika 27b).



Slika 27: Dijagrami raspršenja visina vrhova Cb-a metodom: (a) $\frac{1}{4}$ CAPE-a, (b) $\frac{1}{2}$ CAPE-a. Crnom je bojom označen pravac $y = x$, a ljubičastom srednja vrijednost visina dobivenih nekom od metoda.

Vrijednosti statističkih veličina prikazane su u tablici 5. Za obje je metode Pearsonov koeficijent korelacije pozitivan te je neznatno veći za metodu $\frac{1}{4}$ CAPE-a. Njegova vrijednost upućuje na jaku linearnu vezu između opaženih visina Cb-a te onih dobivenih primjenom metoda. Vrijednosti BIAS-a su pozitivne što potvrđuje već ranije spomenuto; metode precjenjuju visine vrhova Cb-a. To je precjenjivanje u prosjeku manje od 3 % u slučaju korištenja metode $\frac{1}{4}$ CAPE-a te nešto više od 7 % za metodu $\frac{1}{2}$ CAPE-a. Vrijednost RMSE-a je za faktor 2.3 manja za metodu $\frac{1}{4}$ CAPE-a što tu metodu čini pouzdanijom od metode $\frac{1}{2}$ CAPE-a. Indeks slaganja $d > 0.5$ upućuje na zadovoljavajuće slaganje između opaženih i modeliranih visina pri čemu je ono manje u slučaju korištenja metode $\frac{1}{2}$ CAPE-a. Metoda $\frac{1}{4}$ CAPE-a daje dvostruko manju amplitudu pogreške nego metoda $\frac{1}{2}$ CAPE-a. Usporedimo li varijance, ona je za 0.08 km^2 veća za metodu $\frac{1}{2}$ CAPE-a što znači veći rasap podataka oko srednje vrijednosti (ljubičasti pravci na slici 27). U odnosu na varijancu opaženog niza visina $\sigma_0^2 = 0.16 \text{ km}^2$, obje metode daju veći rasap, no oni su usporedivi u slučaju metode $\frac{1}{4}$ CAPE-a.

Tablica 5: Evaluacija metoda u 61 točki.

metoda veličina	$\frac{1}{4}$ CAPE-a	$\frac{1}{2}$ CAPE-a
r	0.733	0.727
BIAS [%]	2.95	7.29
RMSE [km]	0.48	1.11
d	0.74	0.51
MAE [km]	0.42	0.86
$\sigma^2 [\text{km}^2]$	0.24	0.32

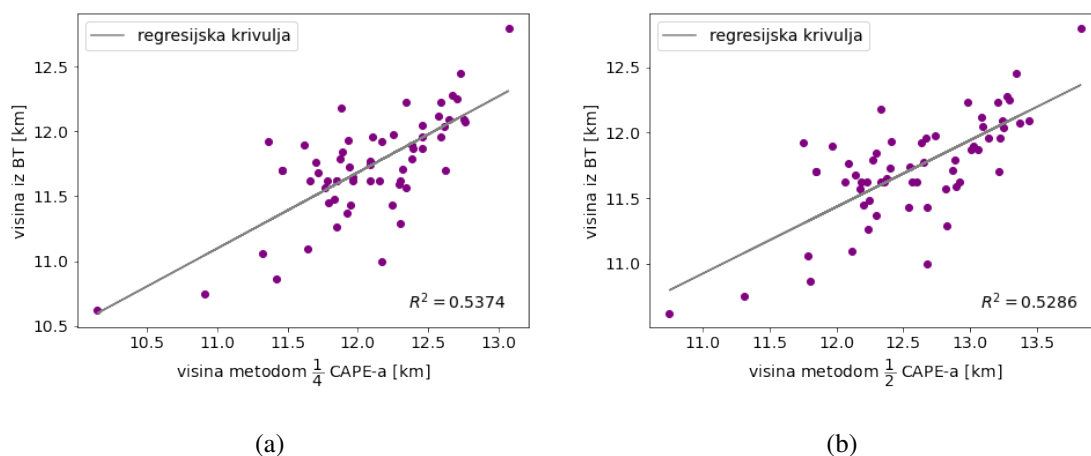
Iz analize je vidljivo da postoje određena odstupanja visina Cb-a dobivenih primjenom metoda i onih opaženih. Nekoliko je mogućih razloga. Prvo je vertikalna razlučivost modela WRF. Naime, vertikalna rezolucija nije uniformna, već je finija u nižoj troposferi, a grublja u višoj. Tako je u graničnom sloju vertikalna rezolucija $\Delta z \sim 10 \text{ m}$ dok je na nivoima iznad 300 hPa plohe (tipične visine vrhova Cb-a) $\Delta z \sim 250 \text{ m}$ što je istog reda veličine kao i npr. MAE za metodu $\frac{1}{4}$ CAPE-a. Drugi je razlog paralaksa čija je korekcija za oblake poput kumulonimbusa značajna (URL2). Korekcija paralakse ovdje nije uzeta u obzir jer je cilj rada testirati metode na način kako se one koriste u operativi HKZP-a.

4.2 Prilagodba modela jednostruke linearne regresije

Iz izgleda dijagrama raspršenja na slici 27 te vrijednosti Pearsonovog koeficijenta korelacije (tablica 5) jasno je da postoji stohastička jaka linearna veza između promatranih skupova podataka. Zbog toga je napravljena prilagodba modela jednostruke linearne regresije:

$$y = ax + b, \quad (12)$$

gdje je y izlaz modela, a x je ulaz u model. U ovom slučaju y predstavlja vrijednosti visina vrhova Cb-a dobivenih na temelju vrijednosti BT sa satelita, a x visine dobivene primjenom jedne od metoda. Prilagodba ovako postavljenog modela za cilj ima odrediti udio varijance izlaza koji je objašnjen ulazom pri čemu je veza između njih linearna. Veličina koja govori o tome zove se koeficijent determinacije (R^2). Rezultati prilagodbe modela (12) prikazani su na slici 28 dok su vrijednosti koeficijenata a i b dane u tablici 6.



Slika 28: Prilagodba modela jednostruke linearne regresije: (a) metoda $\frac{1}{4}$ CAPE-a, (b) metoda $\frac{1}{2}$ CAPE-a.

Tablica 6: Koeficijenti modela jednostruke linearne regresije.

metoda koeficijent	$\frac{1}{4}$ CAPE-a	$\frac{1}{2}$ CAPE-a
a	0.59	0.51
b [km]	4.63	5.33

Visine Cb-a izračunate metodom $\frac{1}{4}$ CAPE-a opisuju 53.74 % varijabilnosti opaženih visina dok one dobivene metodom $\frac{1}{2}$ CAPE-a opisuju 52.86 % varijance opaženih visina. Gotovo jednaka us-

pješnost prilagodbe modela (12) je očekivana jer su i vrijednosti Pearsonovog koeficijenta korelacije za metode vrlo bliske.

5 Zaključak

Pojava grmljavinskih oluja najopasnija je vremenska pojava za zrakoplove stoga ih oni najčešće zaobilaze. Zato je važno poznavati prostorne dimenzije oluja, tj. kumulonimbusa koji čine oluju. U ovome su radu testirane dvije metode za određivanje visine vrhova Cb-a na događaju koji se zbio 30.6.2014. U te su svrhe korištene numeričke simulacije modela WRF i ALADIN, satelitski, radarski i radiosondažni podatci te podatci o munjama.

Razvoj promatranog događaja započinje 29.6.2014. oko 20:00 UTC na području zapadne Slovenije te sjeveroistočne Italije. U narednim se satima sustav razvija zahvaljujući povoljnim sinoptičkim uvjetima (prednja strana visinske doline, prizemna hladna fronta) te prisustvu vremenskih uvjeta potrebnih za inicijaciju DVK. Navedeno u kombinaciji s jakim smicanjem vjetra u sloju od tla do 6 km visine ($BS06 > 20$ m/s) rezultira nastankom linearne visoko organizirane konvektivne strukture. Sustav se je gibao prema istoku pri čemu je zahvatio sve dijelove Slovenije, Hrvatske, BiH te dijelove susjednih zemalja, a trajao je dulje od 10 sati.

Model WRF uspješno je simulirao oblik te smjer gibanja konvektivnog sustava uz vremensko kašnjenje od oko 2 sata. Vertikalni profili za postaju Zadar-Zemunik su zadovoljavajuće dobro simulirani modelima WRF i ALADIN. Uspješnost se očitovala u smislu da primjena metoda za određivanje visina vrhova Cb-a na pseudosondaže ne daje odstupanja veća od 3 % u usporedbi s primjenom metoda na radiosondažno mjerenje. Nasuprot tomu, model WRF je precijenio MUCAPE za postaju Zagreb-Maksimir u toj mjeri da primjena metoda na pseudosondažu daje odstupanja do 20 % u usporedbi s primjenom metoda na radiosondažu. Model ALADIN je uspješniji u modeliranju vertikalnih profila za Zagreb-Maksimir nego WRF, ali manje uspješan nego za postaju Zadar-Zemunik. Kako bi se težište analize stavilo na uspješnost metoda, a ne modela, metode su testirane na odabranim područjima domene d03.

Rezultati testiranja u ukupno 61 točki pokazuju da obje metode (uglavnom) precjenjuju visine vrhova Cb-a. Tako metoda $\frac{1}{4}$ CAPE-a u većini točaka ne precjenjuje visine Cb-a za više od 6 % dok metoda $\frac{1}{2}$ CAPE-a u većini točaka daje odstupanja ne veća od 11 %. Nadalje, svi ostali izračunati statistički parametri idu u prilog većoj uspješnosti metode $\frac{1}{4}$ CAPE-a. Tako je npr. za tu metodu BIAS svega 2.95 % dok je indeks slaganja $d = 0.74$. Obje metode daju skupove visina Cb-a koji su u jakoj linearnoj vezi s opaženim skupom. Modelom jednostruke linearne regresije visinama dobivenim primjenom metoda moguće je opisati više od 50 % varijance opaženih visina Cb-a.

Gruba vertikalna rezolucija visoke troposfere te paralaksa satelita predstavljaju moguće uzroke odstupanja izračunatih visina od onih opaženih. Stoga je za dobiti pouzdanije rezultate o uspješnosti metoda navedene uzroke potrebno ukloniti i/ili umanjiti. Također, poželjno je testirati metode na više konvektivnih događaja različite organizacije (npr. raširena konvekcija u uvjetima sa slabim smicanjem vjetra). Zbog svega navedenog, rezultati ovog istraživanja nisu konačni, ali daju dobar prvi uvid u pouzdanost operativnih metoda za procjenu visina vrhova Cb-a te mogućnosti unaprjeđenja istih.

Zahvale

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak na pruženoj prilici, predloženoj temi te pomoći i podršci u svim fazama nastajanja ovog rada. Zahvale dugujem i komentorici dr. sc. Karmen Babić koja je svojim savjetima, operativnim iskustvom te strpljivošću za pitanja uvelike doprinijela ovom istraživanju. Hvala i Jadranu Jurkoviću na ustupljenim materijalima te Vinku Šoljanu na *Python* kodovima i održanim predavanjima. Na kraju, veliko hvala roditeljima i sestri koji su mi u svakom trenutku bili bezuvjetna podrška puna ljubavi i razumijevanja.

Bibliografija

- Adams-Selin, R. D. i C. L. Ziegler (2016). Forecasting Hail Using a One-Dimensional Hail Growth Model within WRF. *Monthly Weather Review* 144, 4919–4939.
- Beck, H. E., N. E. Zimmermann, T. R. McVicar, N. Vergopolan, A. Berg, i E. F. Wood (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data* 5.
- Betz, H. D., K. Schmidt, P. Laroche, i P. Blanchet (2009). LINET—An international lightning detection network in Europe. *Atmospheric Research* 91, 564–573.
- Blajev, T. (2015). The gains of an aligned weather impact management. Technical report, NM Safety Unit, Eurocontrol.
- Dudhia, J. (1989). Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. *Journal of Atmospheric Sciences* 46, 3077–3107.
- EASA (2017). Annual safety review. Technical Report TO-AD-17-001-EN-N, European Aviation Safety Agency.
- Gerth, J., R. K. Garcia, S. Lindstrom, i D. J. Hoese (2020). SIFTing through satellite imagery with the Satellite Information Familiarization Tool. *Journal of Operational Meteorology* 8, 121–132.
- Hong, S.-Y. i J.-O. J. Lim (2006). The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society* 42, 129–151.
- Jelić, D. (2022). *Obilježja tuče u sadašnjim i budućim klimatskim uvjetima na području Hrvatske*. doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- Johns, R. H. i C. A. Doswell III (1992). Severe Local Storms Forecasting. *Weather and Forecasting* 7, 588–612.
- Jurković, J., V. Šoljan, i I. Kos (2025). The Weather Forecasts as Support for Air Traffic Management in Croatia. In *Meteorološki izazovi 10*, Zagreb, Hrvatska. 8-9 May 2025.
- Markowski, P. i Y. Richardson (2010). *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. Wiley-Blackwell.

- Mikuš, P., M. Telišman Prtenjak, i N. Strelec Mahović (2012). Analysis of the convective activity and its synoptic background over Croatia. *Atmospheric Research* 104–105, 139–153.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, i S. A. Clough (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 102, 16663–16682.
- Nakanishi, M. i H. Niino (2006). An Improved Mellor-Yamada Level 3 Model: Its Numerical Stability and Application to a Regional Prediction of Advection Fog. *Boundary-Layer Meteorology* 119, 397–407.
- Pielke, R. A. (1981). Mesoscale Numerical Modeling. *Advances in Geophysics* 23, 185–344.
- Rasmussen, E. N. i D. O. Blanchard (1988). A Baseline Climatology of Sounding-Derived Supercell and Tornado Forecast Parameters. *Weather and Forecasting* 13, 1148–1164.
- Rotunno, R., J. B. Klemp, i M. L. Weisman (1988). A Theory for Strong, Long-Lived Squall Lines. *Journal of the Atmospheric Sciences* 45, 463–485.
- Šoljan, V. (2021). *Priručnik za prognoziranje duboke vlažne konvekcije*. Hrvatska kontrola zračne plovidbe d.o.o. Verzija 2.0.
- Stolzenburg, M., W. D. Rust, i T. C. Marshall (1998). Electrical structure in thunderstorm convective regions: 2. Isolated storms. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 103, 14079–14096.
- Stull, R. (2015). *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science*. The University of British Columbia, Kanada.
- Takahashi, T. (1978). Riming Electrification as a Charge Generation Mechanism in Thunderstorms. *Journal of the Atmospheric Sciences* 35, 1536–1548.
- Taszarek, M., H. E. Brooks, i B. Czernecki (2017). Sounding-Derived Parameters Associated with Convective Hazards in Europe. *Monthly Weather Review* 145, 1511–1528.
- URL1 (2025). Violent turbulence hits ryanair flight in germany, forcing an emergency landing and injuring 9. Dostupno na: <https://www.euronews.com/travel/2025/06/05/violent-turbulence-hits-ryanair-flight-in-germany-forcing-an-emergency-landing-and-injurin>.

URL2 (2006). The Problem of Parallax. Dostupno na: <https://cimss.ssec.wisc.edu/satellite-blog/archives/217>.

Sažetak

Sara Oštrić

Određivanje visine vrhova kumulonimbusa pomoću parametra konvektivne raspoložive potencijalne energije

Ovaj rad za cilj ima usporediti uspješnost dviju metoda za određivanje visina vrhova kumulonimbusa. Usporedba je napravljena na slučaju linijski organizirane konvekcije koja se dogodila 30.6.2014. pri čemu su korištene pseudosondaže simulirane modelom WRF, satelitski podatci te opaženi udari munja. Za opis sinoptičkih uvjeta korištene su prizemne i visinske sinoptičke karte dok su za mezoskalnu analizu, uz simulacije modela WRF, korišteni radarski podatci te radiosondažna mjerenja s postaja Zadar-Zemunik i Zagreb-Maksimir. Za navedene je postaje napravljena i usporedba ALADIN pseudosondaža s radiosondažnim mjerenjima. Rezultati su pokazali kako obje metode precjenjuju visine vrhova Cb-a pri čemu metoda $\frac{1}{4}$ CAPE-a daje manja odstupanja od metode $\frac{1}{2}$ CAPE-a. Visine Cb-a dobivene primjenom metoda u jakoj su linearnoj vezi s opaženim visinama.

Ključne riječi: duboka vlažna konvekcija, visina vrha kumulonimbusa, WRF

Summary

Sara Oštrić

Determination of cumulonimbus cloud top heights using convective available potential energy

This study aims to compare the performance of two methods for determining the cumulonimbus cloud top heights. The comparison was conducted using a case of linearly organized convection that occurred on 30 June 2014. Pseudosoundings simulated by the WRF model, satellite data, and observed lightning strikes were used in the analysis. Surface and upper-air synoptic charts were used to describe the synoptic conditions, while mesoscale analysis was performed using radar data and radiosonde measurements from the Zadar-Zemunik and Zagreb-Maksimir stations, in addition to the WRF simulations. A comparison between ALADIN pseudosoundings and radiosonde observations was also performed for these stations. The results indicate that both methods tend to overestimate cumulonimbus cloud top heights, with the method $\frac{1}{4}$ CAPE showing smaller deviations compared to the $\frac{1}{2}$ CAPE method. The Cb cloud top heights estimated by both methods exhibit a strong linear correlation with the observed values.

Keywords: deep moist convection, cumulonimbus cloud top height, WRF