

Sinoptički i mezoskalni uvjeti duboke mokre konvekcije u hladnom dijelu godine u Hrvatskoj

Dolički, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:457043>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-28**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Domagoj Dolički

SINOPTIČKI I MEZOSKALNI UVJETI
DUBOKE MOKRE KONVEKCIJE U
HLADNOM DIJELU GODINE U
HRVATSKOJ

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

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

Domagoj Dolički

Diplomski rad

**Sinoptički i mezoskalni uvjeti duboke mokre
konvekcije u hladnom dijelu godine u
Hrvatskoj**

Voditeljica diplomskog rada: dr. sc. Petra Mikuš Jurković

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

Zagreb, 2024.

Prije svega htio bih zahvaliti svojoj prvoj mentorici dr. sc. Petri Mikuš Jurković na pruženoj prilici, ideji i motivaciji za istraživanje. Hvala Vam na izdvojenom vremenu, trudu i strpljenju za sva moja (ponovljena) pitanja te na svim savjetima i prenesenom znanju.

Posebno sam zahvalan i svojoj drugoj mentorici izv. prof. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak čija su pomoć, trud i savjeti uvelike olakšali pisanje ovog rada.

Zahvaljujem dr. sc. Damjanu Jeliću, DHMZ-u i HKZP-u na ustupljenim podacima bez kojih ovaj rad ne bi bio moguć.

Hvala prijateljima i kolegama koji su postali prijatelji. Učinili ste studentske dani zabavnim, manje stresnim i nezaboravnim.

Na kraju htio bih zahvaliti cijeloj obitelji, a posebno svojim roditeljima i bratu na bezuvjetnoj podršci, razumijevanju i ljubavi tijekom svih trenutaka studija.

Sažetak

U ovom radu analizirana je konvektivna aktivnost tijekom hladnog dijela godine na temelju podataka o indeksu intenziteta munja na prethodno definiranoj mreži $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ na području Hrvatske. Fokusirajući se na mjesece od listopada do ožujka, promatrano je petogodišnje razdoblje od 2016. do 2020. godine. Cilj rada bio je napraviti prostornu i vremensku analizu konvektivne aktivnosti te odrediti sinoptičke i termodinamičke uvjete u kojima nastaje. Navedenom analizom pokušalo se dati pregled osnovnih obilježja te na taj način poboljšati razumijevanje duboke mokre konvekcije u hladnom dijelu godine koja predstavlja jedan od većih izazova u operativnoj prognozi vremena zbog svoje manje učestalosti i teže procjene intenziteta. Na temelju prizemnih i visinskih sinoptičkih karata detektirana je pojava prizemnih frontalnih poremećaja te je određen tip vremena i režim visinskog strujanja na 500 hPa plohi. Termodinamički i kinematički parametri izračunati su na temelju radiosondažnih profila s postaja u San Pietro Capofiumeu, Brindisiju, Pratica di Mareu (Italija), Zagrebu i Zadru (Hrvatska) u besplatnom programskom paketu *thundeR*.

Iz promatranog razdoblja izdvojeno je 290 dana s konvekcijom za koje je provedena analiza. Rezultati pokazuju kako sinoptičko forsiranje ima značajno veću ulogu u razvoju konvekcije tijekom hladnog dijela godine u usporedbi s toplim dijelom, dok je dominantan režim visinskog strujanja jugozapadni. Dobivene vrijednosti raspoložive konvektivne potencijalne energije (CAPE) u hladnom dijelu godine puno su manje od vrijednosti u toplom dijelu, u čemu znatan doprinos ima i znatno manja količina Sunčevog zagrijavanja podloge. Također, većina intenzivnih konvektivnih oluja razvila se u uvjetima jakog vertikalnog smicanja vjetra što pokazuje da je dominantno atmosfersko okruženje u kojima nastaju zimske grmljavinske oluje okruženje sa značajnim vertikalnim smicanjem vjetra i manjim iznosima CAPE-a.

Ključne riječi: konvekcija, hladno razdoblje, Hrvatska, TSII

Synoptic and mesoscale conditions of deep moist convection during the cold season in Croatia

Abstract

In this study, thunderstorm activity during the cold part of the year was analyzed based on Thunderstorm Intensity Index data on a pre-defined grid with a mesh of $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ in Croatia. The study covered a five-year period from 2016 to 2020, focusing on the months from October to March. The goal of the research was to conduct a spatial and temporal analysis of thunderstorm activity and determine the synoptic and thermodynamic conditions under which it occurs. The analysis aims to provide an overview of the fundamental characteristics, thereby improving the understanding of deep moist convection in the cold part of the year, which poses a significant challenge in operational weather forecasting due to its lower frequency and more difficult intensity assessment. The occurrence of surface frontal disturbances is detected based on surface synoptic charts and the flow regime at the 500 hPa level is determined using upper-level synoptic charts. Thermodynamic and kinematic parameters are calculated from radiosonde profiles from stations in San Pietro Capofiume, Brindisi, Pratica di Mare (Italy), Zagreb, and Zadar (Croatia), using the *thundeR* free software package.

A total of 290 convective days were selected for analysis from the observed period. The results indicate that synoptic forcing plays a significantly greater role in the development of convection during the cold part of the year compared to the warm part, while the dominant upper-level flow regime is southwest. The obtained values of Convective Available Potential Energy (CAPE) in the cold part of the year are much lower than those in the warm part, with a significant contribution from the considerably lower amount of solar surface heating. Additionally, most thunderstorms develop under conditions of strong vertical wind shear, indicating that the atmospheric environment conducive to winter thunderstorms is predominantly a high shear – low CAPE environment.

Keywords: convection, cold season, Croatia, TSII

Sadržaj

Popis kratica	1
1. Uvod	2
1.1. <i>Konvekcija</i>	2
1.2. <i>Cumulonimbus</i>	3
1.3. <i>Munje i proces elektrifikacije u cumulonimbusu</i>	6
1.4. <i>Dosadašnja istraživanja u Hrvatskoj i svijetu</i>	8
1.5. <i>Motivacija i cilj istraživanja</i>	13
2. Podaci i metode	15
2.1. <i>Geografski opis domene</i>	15
2.2. <i>Indeks intenziteta munja</i>	15
2.3. <i>Prostorna i vremenska analiza</i>	16
2.4. <i>Prizemna i visinska sinoptička analiza</i>	17
2.5. <i>Radiondažni podaci</i>	18
2.5.1. <i>Parametri konvekcije</i>	21
3. Rezultati i diskusija	24
3.1. <i>Vremenska i prostorna raspodjela dana s konvekcijom</i>	24
3.2. <i>Prizemna i visinska sinoptička analiza</i>	29
3.3. <i>Mezoskalna analiza</i>	33
3.4. <i>Primjer analize konvektivnog dana</i>	38
4. Zaključak	43
Literatura	45

Popis kratica i simbola

BS	smicanje vjetra (engl. <i>Bulk Wind Shear</i>)
CAPE	raspoloživa konvektivna potencijalna energija (engl. <i>Convective Available Potential Energy</i>)
Cb	cumulonimbus
Cu con	cumulus congestus
CG	munje između oblaka i tla (engl. <i>cloud-to-ground</i>)
CIN	konvektivna inhibicija (engl. <i>Convective Inhibition</i>)
CNN	jezgre kondenzacije (engl. <i>cloud condensation nuclei</i>)
CSBE	mezoskalni konvektivni sustav u hladnom dijelu godine čiji radarski odziv podsjeća na luk, engl. <i>cool season bow echo</i>
DCAPE	raspoloživa konvektivna potencijalna energija silazne struje (engl. <i>Downdraft Convective Available Potential Energy</i>)
DHMZ	Državni hidrometeorološki zavod
DMK	duboka mokra konvekcija
EL	ravnotežni nivo (engl. <i>equilibrium level</i>)
ESSL	Europski laboratorij za opasne vremenske oluje (engl. <i>European Severe Storms Laboratory</i>)
ESWD	paneuropska baza podataka o opasnim vremenskim pojavama (engl. <i>European Severe Weather Database</i>)
HKZP	Hrvatska kontrola zračne plovidbe
HSLC	engl. <i>high shear – low CAPE</i>
IC	munja između oblaka ili unutar oblaka (engl. <i>intracloud</i>)
LCL	nivo kondenzacije (engl. <i>lifting condensation level</i>)
LFC	nivo slobodne konvekcije (engl. <i>level of free convection</i>)
LFS	nivo slobodnog spuštanja česti (engl. <i>level of free sink</i>)
LINET	Mreža detekcije munja u Europi (engl. <i>Lightning Detection Network in Europe</i>)
MLCAPE	engl. <i>Mixed Layer CAPE</i>
MUCAPE	engl. <i>Most Unstable CAPE</i>
SBCAPE	engl. <i>Surface Based CAPE</i>
TSII	indeks intenziteta munja (engl. <i>Thunderstorm Intensity Index</i>)
σ	standardna devijacija
θ	potencijalna temperatura

1. Uvod

1.1. Konvekcija

Konvekcija je vertikalni prijenos mase i topline u više slojeve atmosfere u kombinaciji s drugi procesima. Ključna je u raspodjeli energije od toplijih prema hladnijim područjima Zemlje tako što smanjuje temperaturni meridionalni gradijent između tropskih i polarnih područja (URL01).

Razlikujemo nekoliko tipova konvekcije. *Slobodna* konvekcija nastaje spontano zbog razlika u gustoći unutar fluida, odnosno u temperaturi. Razlike u temperaturi uzrokuju gibanja masa fluida jer se toplije (rjeđe) mase uzdižu, a hladnije (gušće) spuštaju. Još se naziva *neutralnom* ili *uzgonskom* konvekcijom. Kod *prisilne* konvekcije gibanje fluida uzrokovano je vanjskim djelovanjem, primjerice nekom orografskom preprekom. Također postoji podjela na *suhu*, *plitku* i *duboku mokru* konvekciju. Suha predstavlja konvekciju koja se odvija bez formiranja oblaka, dok su kod druga dva oblika vidljivi produkti konvekcije (oblaci ili oblaci i oborina). Kod plitke konvekcije vertikalna uzlazna gibanja uglavnom ne prelaze visine od 500 hPa plohe, a duboka se nastavlja u još veće visine, kod najintenzivnijih oluja i do područja donje stratosfere (npr. Grisogono i sur., 2009).

Stull (2015) izdvaja tri uvjeta za nastanak duboke mokre konvekcije (DMK):

- velika vlažnost u atmosferskom graničnom sloju
- nelokalna uvjetna nestabilnost
- vanjski mehanizam (okidač) koji uzrokuje uzdizanje zraka do nivoa slobodne konvekcije.

Dodatno za organizaciju DMK-a nužna je pojava:

- jakog vertikalnog smicanja vjetra.

Zrak iz graničnog sloja dizanjem se hladi, a vodena se para kondenzira te oslobađa latentnu toplinu što je glavni izvor energije za DMK. Međutim, za razvoj DMK-a nužna je i povoljna vertikalna raspodjela temperature s visinom, odnosno uvjetna nestabilnost. U tom su slučaju gradijenti temperature između suhoadijabatičkih i mokroadijabatičkih (od oko $9.8 \frac{\text{K}}{\text{km}}$ do $5.5 \frac{\text{K}}{\text{km}}$), pri čemu se zasićena čest koja se diže po mokroj adijabati sporije hladi od okolnog zraka. Također, čest mora sadržavati i dovoljno vlage koja joj iznad nivoa slobodne konvekcije oslobađanjem latentne topline omogućava pozitivan uzgon. Za prevladavanje pak prizemnog područja negativnog uzgona nužan je neki od mehanizama dizanja zraka do nivoa slobodne konvekcije. To mogu biti pruge konvergencije, granice između zračnih masa (fronte, fronte udara vjetra drugih oluja, pojačane zone suhog zraka), planine (orografske prepreke), mala područja jakog površinskog zagrijavanja, uzgonski valovi, itd. Konačno, vertikalno smicanje vjetra ima dodatnu ulogu u organizaciji grmljavinskih oluja jer može utjecati na smjer gibanja oluje u područje gdje je zrak u graničnom sloju topao i vlažan. Osim toga, smicanje vjetra naginje uzlaznu struju po visini i pomiče je od mjesta gdje se nalazi silazna struja što produljuje trajanje konvektivnih procesa.

Konvektivni razvoj odvija se, u principu, u četiri faze (npr. Plant i Yano, 2016). Prvi stadij se naziva *termički* te ga pokreće uzgon. Ovisno o vremenskim uvjetima, površinski albedo i tip tla glavni su čimbenici koji određuju izgled i jačinu. Tijekom termičkog stadija slobodna atmosfera djeluje protiv suhe konvekcije jer se njena temperatura, u pravilu, smanjuje brže s visinom od adijabatičkog hlađenja termala. Podizanjem česti zraka ona se hladi te se pritom vodena para kondenzira što rezultira formiranjem *cumulus humilisa*. Visina gdje je započela kondenzacija naziva se nivo kondenzacije (LCL, engl. *lifting condensantion level*). Iznad LCL-a stopa ohlađivanja zasićene česti zraka manja je od suhoadijabatičke stope ohlađivanja pa se proces naziva pseodoadijabatičkim zbog pretpostavke da se latentna toplina kondenzacije koristi za zagrijavanje česti zraka i da kondenzirana vlaga odmah pada u obliku oborine. Visina na kojoj čest postane toplija od svoje okoline naziva se nivo slobodne konvekcije (LFC, engl. *level of free convection*). Dostizanje tog nivoa predstavlja sljedeći stadij konvektivnog razvoja – *kumulusni* stadij. Njegov uspjeh ovisi o početnoj kinetičkoj energiji dobivenoj u termičkom stadiju, vertikalnom gradijentu temperature i sadržaju vodene pare unutar česti koja se diže. Zatim slijedi faza *cumulus congestusa* (Cu con) u kojoj je temperatura česti viša od temperature okoliša. Neprekidna kondenzacija omogućava oslobađanje latentne topline što održava treći stadij. Tijekom te faze ni struktura "tornja" *cumulosa* ni proces kondenzacije nisu homogeni zbog uvlačenja okolnog hladnijeg zraka turbulentnim miješanjem. Uvlačenje smanjuje uzgon i usporava daljnje uzdizanje česti, ali također omogućava dodatnu kondenzaciju koja iznova grije čest. Ako rastući oblak ima dovoljno vlage za kondenzaciju i ako je stopa ohlađivanja okolne atmosfere dovoljno velika, dolazi do završnog stadija *cumulonimbusa*.



(a) Cb cal



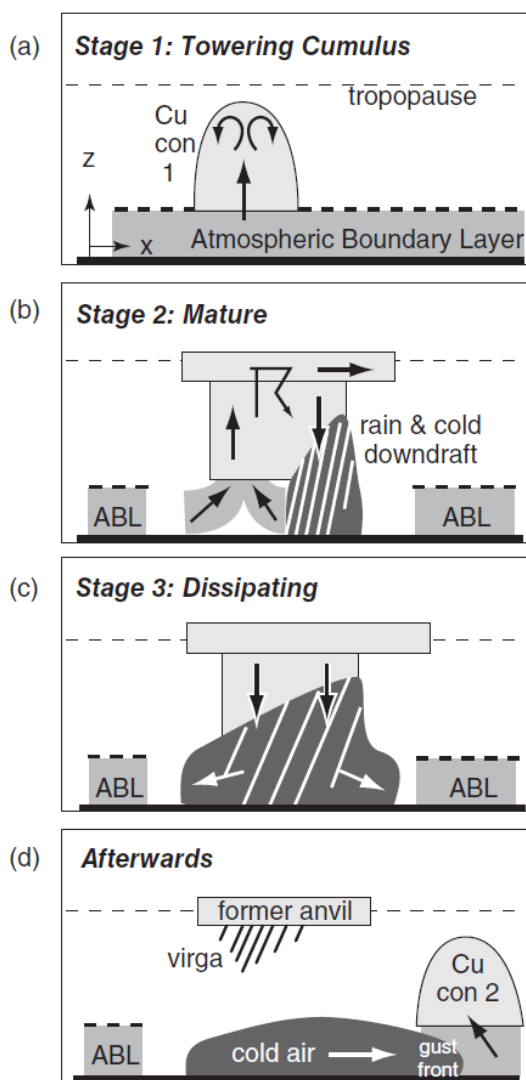
(b) Cb cap

Slika 1.1. Prikaz vrsta cumulonimbusa. (a) Cumulonimbus calvus (Cb cal). Izvor: URL02. (b) Cumulonimbus capillatus (Cb cap). Izvor: URL03.

1.2. *Cumulonimbus*

Cumulonimbus (Cb) težak je i gust oblak, s izrazitim vertikalnim razvojem, koji svojim oblikom podsjeća na planine ili visoke tornjeve. Njegov gornji dio obično je gladak ili vlaknast te skoro uvijek spljošten. Često izgleda kao nakovanj ili široka perjanica. Baza oblaka često je jako tamna i niska (URL04). Definirane su dvije glavne vrste: *calvus* (slika 1.1a) i *capillatus* (slika 1.1b). Razlikuju se u izgledu gornjeg dijela oblaka; *capillatus* ima vlaknaste ili izbrazdane strukture nalik na nakovanj, dok ih *calvus* nema.

Osnovna strukturalna jedinica grmljavinske oluje je ćelija kojoj je promjer, ali i visina oko 10 km (npr. Stull, 2015). Njezin razvoj ima tri faze: *kumulusnu*, *zrelu* i *disipacijsku* (slika 1.2). Životni ciklus svake individualne ćelije traje otprilike između 30 i 60 minuta.



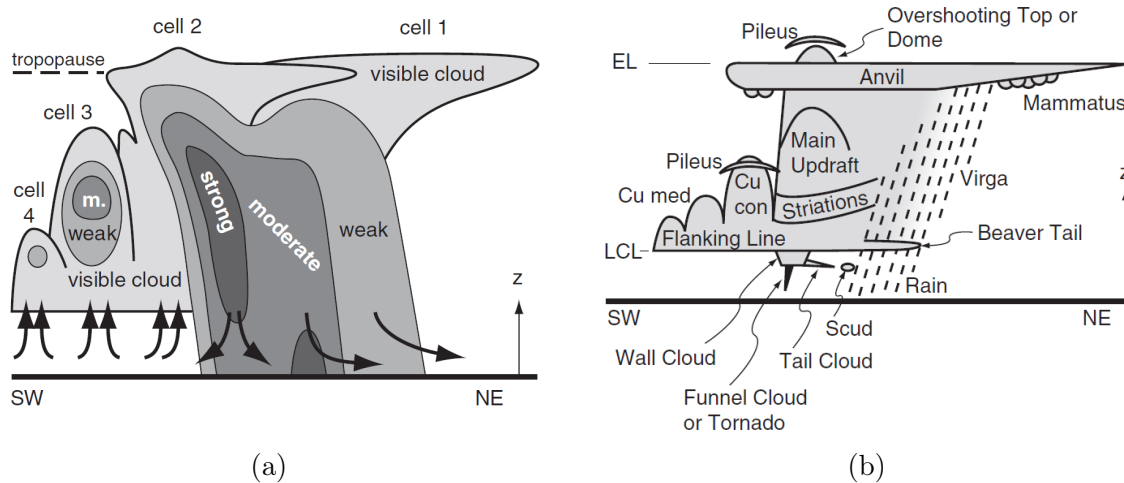
Slika 1.2. Shematski prikaz životnog ciklusa cumulonimbusa. (a) Kumulusna faza. (b) Zrela faza. (c) Disipacijska faza. (d) Faza ostatka nakovnja. Izvor: Stull (2015).

Kumulusna faza sastoji se samo od uzlazne struje unutar brzo rastućeg tornja Cu con-a. Nema nakovnja, silazne struje ni oborine, ali se uvlači topao i vlažan zrak iz graničnog sloja koji služi kao "gorivo" za oluju. Zrak se dizanjem hladi, a vodena se para kondenzira što doprinosi uzgonu i osnažuje oluju. Tijekom zrele faze razvija se nakovanj pri vrhu troposfere, a intenzivni i obilni pljuskovi prate uzlaznu i silaznu struju u oblaku. Nakovanj se ravija uzduž ravnotežnog nivoa (EL, engl. *equilibrium level*), odnosno na najvišem nivou do kojeg uzgon podržava podizanje česti i na kojem čest ima istu temperaturu kao i okoliš. Ova je faza najčešće najopasnija s najizraženijom produkcijom munja, snažnom turbulencijom i moguće olujnim vjetrovima. Nedostatak smicanja vjetra skraćuje životni vijek ćelija tako što: a) ćelija relativno brzo ostane

bez "goriva" (potrebnih sastojaka za konvekciju) kako iskoristi obližnji zrak graničnog sloja; i b) formiranje silazne struje hladnijeg zraka zatvori pristup toplijem zraku iz graničnog sloja. Zadnja disipacijska faza sastoji se od silaznih struja, oborine i velikog nakovnja od ledenih kristala. Kako se uzlazna struja "uguši" zbog oborine, nema više načina za dovođenje novog toplog zraka iz graničnog sloja te ćelija umire. Osim prikazane tri faze postoji još jedna faza, faza *ostatka nakovnja*, (engl. *anvil-debris stage*) koja se ne spominje uvijek u literaturi. U toj fazi od prethodne oluje preostali su samo nakovanj i s njime povezana virga sastavljena od puno kristalića leda koji padaju i polako isparavaju. Dok ostatak nakovnja polako prelazi u debeli cirrostratus ili altostratus, fronta udara vjetra koja donosi hladni(ji) spuštajući zrak može ponovno podignuti topliji zrak iz graničnog sloja do LFC-a te tako pokrenuti razvoj nove ćelije grmljavinske oluje. Taj proces naziva se propagacija oluje (engl. *storm propagation*). Ćelija "kćer" može proći kroz cijeli svoj životni ciklus i ako uvjeti dopuštaju pokrenuti novu ćeliju "kćer".

Na temelju broja ćelija razlikuje se:

- jednoćelijska konvekcija (slika 1.2)
- multićelijska konvekcija (slika 1.3a)
- superćelijska konvekcija (slika 1.3b).

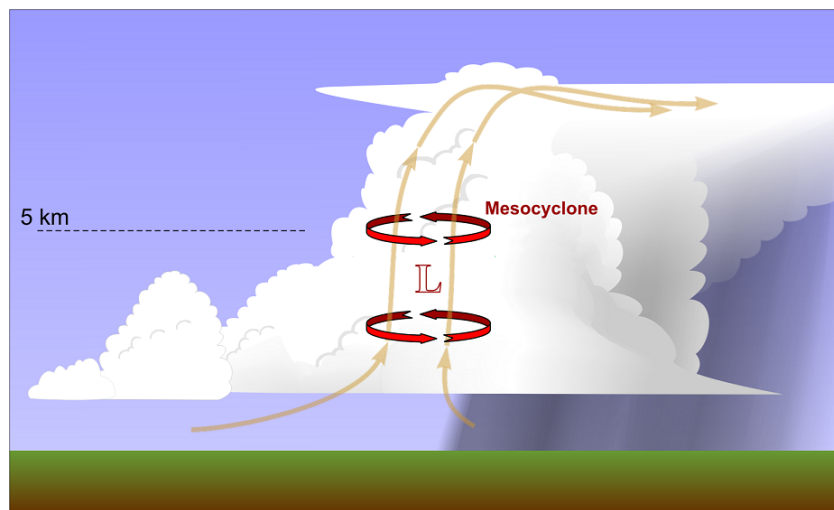


Slika 1.3. Shematski prikaz: (a) multićelijske konvekcije, (b) superćelijske konvekcije. Neki od prikazanih dijelova oblaka su: nakovanj (engl. *anvil*), premašujući vrh (engl. *overshooting top*), pileus (engl. *pileus*), glavna uzlazna struja zraka (engl. *main updraft*), oblačni zid (engl. *wall cloud*) i ljevkast oblak (engl. *funnel cloud*). Izvor: Stull (2015).

Jednoćelijska konvekcija označava vrstu DMK-a koja se sastoji od samo jedne uzlazne struje i koja ne započinje daljnju organiziranu konvekciju (npr. Markowski i Richardson, 2010). Ona nastaje u okruženju relativno malog iznosa vertikalnog smicanja vjetra ($< \frac{10}{4} \text{ms}^{-1} \text{km}^{-1}$), pa je uzdizanje duž fronte udara vjetra slabo i plitko što onemogućuje daljnje organizirano stvaranje novih ćelija. Životni vijek je relativno kratak, do 60 minuta, te može proizvesti umjereni pljusak od desetak minuta.

Multićelijska konvekcija vjerojatno je najčešći oblik konvekcije u umjerenim širinama. Obilježena je neprestanim razvojem novih ćelija uzduž fronte udara vjetra gdje je prisilno uzdizanje zraka dovoljno jako da čest podigne do LFC-a. Tako dolazi do nastanka konvektivnog sustava veće skale koji se sastoji od niza običnih jednoćelijskih Cb-a, pri čemu pojedina ćelija ne živi dulje od sat vremena. Najžešće multićelije mogu trajati i do deset sati te proizvesti jaki vjetar s olujnim udarima i tuču veličine golf loptica (npr. Markowski i Richardson, 2010). Za njihovu organizaciju potrebno je smicanje vjetra $\sim 10 - 20 \text{ ms}^{-1}$ unutar donjih 4 – 6 km atmosfere pri čemu su uvjeti za nastanak povoljniji, ako je većina smicanja sadržana u prva tri kilometra od tla.

Superćelijska konvekcija vjerojatno je najrjeđi tip oluje, ali je odgovorna za najveći udio izvještaja opasnih vremenskih pojava (Markowski i Richardson, 2010). Superćelije često traju do 4 h, poneke i do 10 h, te nastaju u uvjetima velikog vertikalnog smicanja vjetra ($> \frac{20}{4} \text{ ms}^{-1} \text{ km}^{-1}$). Posljedično, uzlazna struja zraka nagnuta je po visini u odnosu na silaznu što ju održava na životu. Jedine su ćelije organizirane konvekcije koje imaju rotacijsku uzlaznu struju. Svi događaji tuče s promjerom većim od 5 cm i snažna tornada povezani su sa superćelijskim olujama. Dinamički kriterij za prepoznavanje superćelija je postojanje mezociklone (slika 1.4), područje vertikalne vrtložnosti koje zauzima barem polovinu dubine uzlazne zračne struje (npr. Markowski i Richardson, 2010).



Slika 1.4. Shematski prikaz mezociklone. Izvor: URL05.

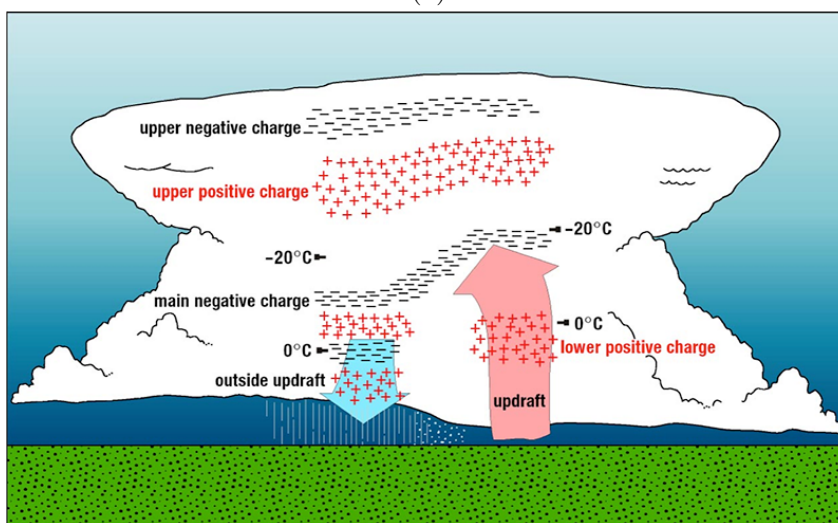
1.3. Munje i proces elektrifikacije u cumulonimbusu

Munje (slika 1.5a) su kratkotrajna električna izbijanja koje se odvijaju uzduž udaljenosti od nekoliko kilometra, unutar konvektivnog oblaka Cb-a. Najveći dio energije izbijanja pretvara se u toplinu, a manji dijelovi u zvuk, svjetlost i ostale oblike elektromagnetskog zračenja (npr. Gelo i sur., 2005). Tijekom početnih faza razvoja munja, zrak djeluje kao izolator između pozitivnih i negativnih nabojnih područja u oblaku ili između oblaka i tla. Procesi razdvajanja naboja u oblaku još uvijek nisu u cijelosti istraženi. No, poznato je kako je za stvaranje područja naboja ključno sudaranje različitih oblačnih čestica, najčešće solike i manjih kristala leda prilikom kojega solika najčešće preuzme negativan naboj s kristalića. Kako su kristalići leda lakši od solike,

oni se uglavnom nakupljaju u višim slojevima oblaka te se formiraju dva glavna područja naboja: negativno nabijena solika u nižim slojevima Cb-a i pozitivno nabijeni kristali leda u gornjem dijelu oblaka. Kada se suprotni naboji dovoljno nagomilaju, zrak izgubi svoju sposobnost izolatora i dolazi do naglog izboja elektriciteta (URL06).



(a)



(b)

Slika 1.5. (a) Prikaz tipične grmljavinske oluje i munja. Izvor: URL07. (b) Shematski prikaz raspodjele naboja unutar Cb-a. Izvor: URL08.

Na slici 1.5b shematski je prikazana tipična vertikalna raspodjela naboja unutar zrele faze Cb-a. Raspodjela naboja unutar uzlazne zračne struje često se sastoji od četiri područja naboja. U najnižem sloju nalazi se područje relativno slabog pozitivnog naboja iznad kojeg se nalaze područja glavnog negativnog i gornjeg pozitivnog naboja (tzv. glavni dipol). Četvrto i najviše područje unutar oblaka sadrži negativan naboj i obično je plitko. Glavno obilježje električne strukture grmljavinske oluje (oblaka) je horizontalna stratifikacija područja naboja; vertikalna debljina pojedinog područja značajno je manja od horizontalne (npr. Betz i sur., 2009b).

Postoje dvije osnovne vrste munja:

- CG (engl. *cloud-to-ground*) – munje između oblaka i tla
- IC (engl. *intracloud, cloud-to-cloud, cloud-to-air*) – munje unutar oblaka, munje između oblaka i munje prema okolnom zraku iznad oblaka.

Iako su munje IC tipa učestalije, zbog (ne)dostupnosti podataka i opasnosti za ljudski život većina ranijih istraživanja bila je vezana uz munje CG tipa. Njih dijelimo u četiri kategorije na temelju polariteta naboja koji se prenosi prema tlu: (a) silazna negativna, (b) uzlazna negativna, (c) silazna pozitivna i (d) uzlazna pozitivna munja. Smatra se da su silazne negativne munje odgovorne za otprilike 90 % munja tipa CG (npr. Betz i sur., 2009b). U novije vrijeme razvojem senzora za detekciju munja te zbog spoznaja o mogućnosti procjene intenziteta konvektivne ćelije pomoću grmljavinske aktivnosti, sve se češće proučava ukupan broj munja (CG + IC) (npr. Höller i sur., 2009; Mikuš i Strelec Mahović, 2013; Jelić i sur., 2021).

1.4. Dosadašnja istraživanja u Hrvatskoj i svijetu

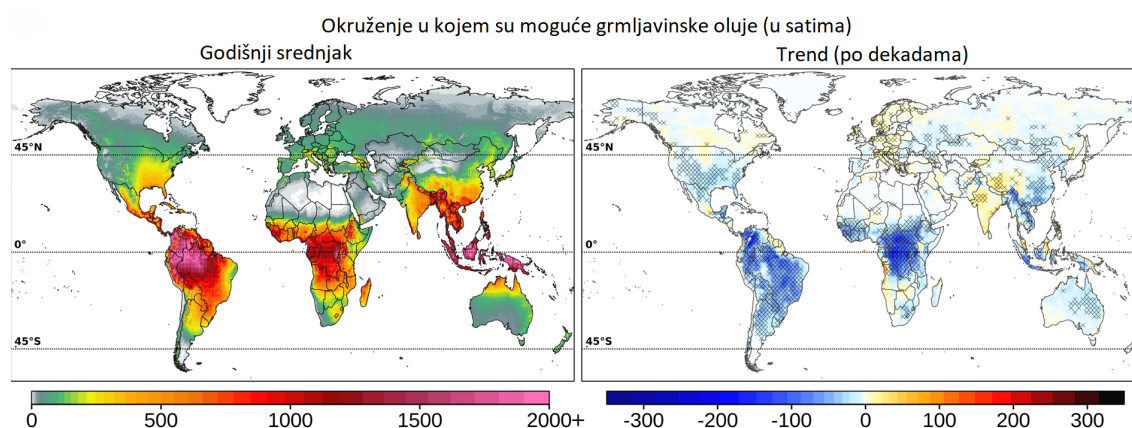
Meteorolozi se bave istraživanjem DMK-a već desetljećima jer grmljavinske oluje predstavljaju rizik gospodarstvu, infrastrukturi i ljudskim životima. Česte posljedice grmljavinske oluje su bujične poplave, odroni zemlje, snažan i destruktivan vjetar, velika i krupna tuča i često po život opasna tornada. Procjenjuje se da globalna financijska šteta koju su prouzročili intenzivne grmljavinske oluje za 2022. godinu iznosi 45 milijardi američkih dolara (URL09).

Od druge polovine 20. stoljeća američki znanstvenici prednjače u promatranju, detektiranju, razumijevanju i prognoziranju vrlo intenzivnih oluja (npr. Pacey i sur., 2021). Svakako je njihovom istraživanju pridonijela činjenica da Sjedinjene Američke Države (SAD) imaju najviše događaja tornada od bilo koje druge države u svijetu. Za tako rekordan broj zaslužna je u velikoj mjeri orografija: velika središnja regija s relativno ravnim terenom koji se može brzo zagrijati stvarajući područja vrlo toplog zraka. Osim što ima pristup izvoru vlage iz Meksičkog zaljeva, također postoji dotok hladnijeg zraka iz Kanade i Velike nizine (engl. *Great Plains*). Svi ti faktori doprinose razvoju intenzivnih grmljavinskih oluja koje za posljedicu mogu imati tornada (URL10). Začetnici su također takozvanih *proximity sounding* (npr. Beebe, 1958) studija u kojima najvažniju ulogu imaju radiosondažna mjerenja pomoću kojih se određuju potrebni uvjeti za nastanak intenzivnih grmljavinskih oluja (npr. Brooks i sur., 2019). Početna istraživanja su se fokusirala na tornada, a od 1980-ih počelo se sve više proučavati razlike između uvjeta u slučajevima grmljavinskih oluja s i bez razvoja tornada. Takva istraživanja usko su bila povezana s razvojem prognoze DMK-a pomoću takozvanih "sastojaka" (*ingredient based* prognoze) (npr. u Doswell III i sur., 1996). Za nastanak DMK-a nužna su tri "sastojaka": (a) uvjetna nestabilnost – vertikalni gradijenti temperature koji su po iznosu između suhadijabatičkih i mokroadijabatičkih, (b) dovoljno vlage u nižim slojevima i (c) mehanizam dizanja koji će podići čest do njezinog LFC-a. Takav prilično moćan pristup može se koristiti u svim područjima umjerenih širina jer se temelji na meteorološko-fizičkim uvjetima i procesima prema kojima samo uz prisustvo sva tri sastojka može doći do iniciranja DMK-a (npr. Johns i Doswell III,

1992, Kuchera i Parker, 2006, Púčik i sur., 2015; Brooks i sur., 2019).

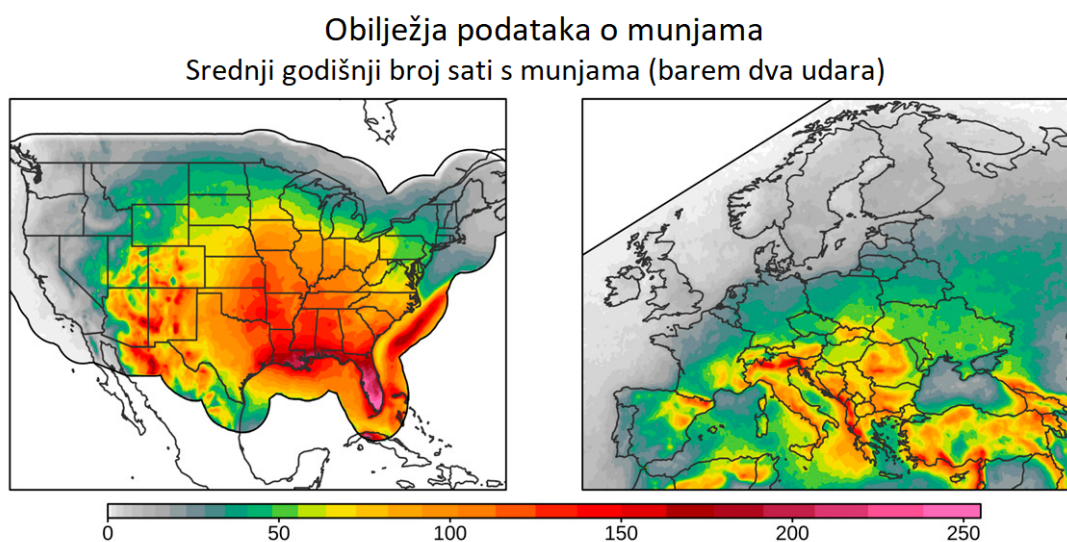
Interes Europe za istraživanjem DMK-a osobito je porastao početkom 21. stoljeća kada je po prvi puta organizirana Europska konferencija o opasnim olujama u Toulouseu u Francuskoj. Tamo je posebno istaknuta potreba za zajedničkim djelovanjem i učenjem, a konferencija se i ubuduće nastavila održavati svake druge godine (uz izostanak 2021. zbog pandemije Covid-19) (Brooks i sur., 2019). Na tim konferencijama iskazao se njemački znanstvenik Nikolai Dotzek koji je ubrzo postao jedna od vodećih osoba za istraživanje intenzivnih oluja u Europi (npr. Dotzek, 2001, Dotzek, 2003). Počeo je prikupljati i arhivirati izvješće intenzivnih oluja, dok ga suradnja s Charlesom A. Doswellom III i Haroldom Brooksom nije navela da predloži osnutak ESSL-a (engl. *European Severe Storms Laboratory*) što je dovelo do razvoja ESWD-a (engl. *European Severe Weather Database*), pan-europske baze podataka o opasnim vremenskim pojavama. Postojanje i daljnji razvoj te baze podataka povećao je interes i mogućnosti istraživanja opasnih konvektivnih oluja u Europi, kao i za daljnje mapiranje i razumijevanje takvih događaja. Nedavne publikacije uključuju klimatološke analize intenzivnih konvektivnih oluja nad Europom (npr. Taszarek i sur., 2018a), tuče zbog mogućnosti ogromnih ekonomskih gubitaka (npr. Púčik i sur., 2019) i tornada (npr. Groenemeijer i Kühne, 2014).

Jedno od novijih istraživanja konvekcije na globalnoj razini napravili su Taszarek i sur. (2021). Procijenili su okruženja na globalnoj skali u kojima je moguća grmljavinska aktivnosti te njihove trendove tijekom 41-godišnjeg razdoblja (1979. – 2019. godine) koristeći podatke ERA5 reanalize i radiosondaža. Na slici 1.6 prikazani su globalni godišnji srednjaci broja sati moguće pojave olujnih sustava (na lijevoj slici) te trendovi broja sati s mogućim olujnim sustavima po dekadama (na desnoj slici). Područja s najvećim brojem sati u kojima su moguće grmljavinske oluje, prate intertropsku zonu konvergencije s najvećim iznosima (> 1000 h) unutar Amazone, zaljeva Konga i jugoistočne Azije. Povećani broj sati grmljavinskih oluja (> 400 h) zabilježen je u jugoistočnom SAD-u, južnoj Kini, Indiji i sjevernoj Australiji.



Slika 1.6. Lijeva slika: Godišnji srednjaci broja sati s okruženjem u kojem su moguće grmljavinske oluje u svijetu za razdoblje 1979. – 2019. godine. Desna slika: Trendovi broja sati u svijetu po dekadama za razdoblje 1979. – 2021. godine. Križići predstavljaju statistički značajna područja. Vrijednosti su dobivene koristeći podatke ERA5 reanalize. Preuzeto i prilagođeno iz Taszarek i sur. (2021).

Na slici 1.7 (desno) pokazana je prostorna raspodjela srednjeg godišnjeg broja sati s udarima munja u Europi. Najrjeđa konvektivna aktivnost zabilježena je na području Skandinavije, Britanskih otoka i sjevernog Atlantika (< 25 h godišnje), dok su Italija, Balkanski poluotok i dijelovi planinskih lanaca najviše izloženi udarima munja s više od 100 h godišnje (Taszarek i sur., 2018b). U istoj studiji napravljena je i sezonska varijabilnost prostorne raspodjele udara munja nad Europom koja je prikazana na slici 1.8. Vrhunac aktivnosti je tijekom ljeta s 30-40 h na sjeveroistočnom dijelu Iberskog poluotoka, Balkanskom poluotoku, u središnjoj Europi i zapadnoj Rusiji. Zimi su pak područja najveće aktivnosti istočno Sredozemlje te povremeno zapadni dijelovi Europe što je uobičajeno povezano s izvantropskom ciklonalnom aktivnošću (Piper i sur., 2019).

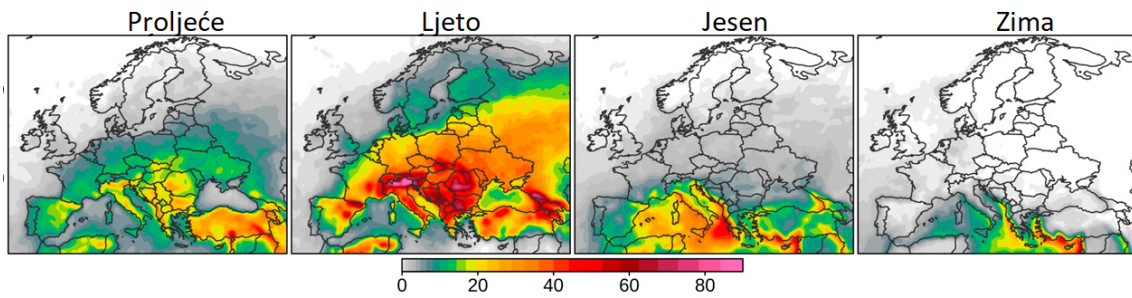


Slika 1.7. Godišnji srednjak broja sati s udarima munja u SAD-u za razdoblje 1989. – 2018. (lijeva slika) i Europi za razdoblje 2006. – 2018. (desna slika). Podaci su prikazani na prostornoj mreži rezolucije 0.25° s prostornim izgladivanjem od $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ (odnosno s 3×3 kliznim srednjakom). Preuzeto i prilagođeno iz Taszarek i sur. (2018b).

Većina istraživanja provedena je za konvekciju u toplom dijelu godine jer je konvekcija u hladnom dijelu rjeđa i često nije toliko intenzivna. Unatoč tome, zimi ima vrlo intenzivnih konvektivnih oluja koje mogu ugroziti materijalna dobra, ali i ljudske živote, osobito oluje s jakim vjetrom. Pacey i sur. (2021) napravili su klimatološku analizu intenzivnih oluja s jakim vjetrom tijekom cijele godine u Europi na temelju izvještaja iz baze ESWD-a. Tijekom ljetne sezone intenzivni vjetar proizveden konvektivnom aktivnošću bio je prijavljen prosječno svaki drugi dan (54 % dana), dok je tijekom zime (prosinac – veljača) snažan vjetar prijavljen samo u 6 % dana. Iako je većina izvješća prijavljena tijekom ljetnog razdoblja, krajnji zapad Europe (Ujedinjeno Kraljevstvo, Irska, sjeverozapad Francuske, zapadna obala Španjolske i Portugala) ima najviše dana s jakim vjetrom tijekom zime iniciran dubokom konvekcijom (slika 3 u Pacey i sur., 2021).

Grmljavinske oluje u hladnom dijelu godine najčešće nastaju u okruženju koje se skraćeno naziva HSLC (engl. *high shear – low CAPE*) okruženje, odnosno okruženje

Godišnji srednjak broja sati s konvektivnom aktivnosti (udari munja)



Slika 1.8. Godišnji srednjak broja sati s udarima munja u Europi za razdoblje 2006. – 2018. po godišnjim dobima. Podaci su prikazani na prostornoj mreži rezolucije 0.25° s prostornim izgladivanjem od $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ (odnosno s 5×5 kliznim srednjakom). Preuzeto i prilagođeno iz Taszarek i sur. (2018b).

sa značajnim vertikalnim smicanjem vjetra i manjim iznosima CAPE-a. Takve osobine prvi su otkrili američki istraživači (npr. Burke i Schultz, 2004). Budući da grmljavinske oluje nastale u HSLC okruženju mogu biti razarajuće i opasne po život te ih je teže prognozirati nego oluje s većim CAPE-om, napravljene su klimatološke analize takvih (HSLC) oluja za različita područja SAD-a. Guyer i Dean (2010) su promatrali čitavo područje SAD-a bez Aljaske i Havaja, Sherburn i Parker (2014) fokusirali su se na jugoistočni dio SAD-a gdje su događaji HSLC-a najčešći dok je područje istraživanja u studiji Main i sur. (2010) obuhvatio sjeveroistočni dio SAD-a. U novije vrijeme europski meteorolozi se sve više bave istraživanjem grmljavinskih oluja u HSLC okruženju. Celiński-Mysław i sur. (2020) proveli su klimatološku analizu mezoskalnih konvektivnih sustava tijekom hladne sezone čiji radarski odziv podsjeća na luk (engl. *cool season bow echo storms*; CSBE) u Poljskoj kako bi prognostičari lakše procijenili njihov intenzitet, odnosno rizik. Zbog nedostatka istraživanja snažnih udara vjetra uslijed konvektivne aktivnosti na paneuropskoj skali, Pacey i sur. (2021) analizirali su višegodišnje podatke o pojavi takvog tipa vjetra. Tijekom analize predkonvektivnih uvjeta atmosfere pomoću radiosondažnih podataka primijetili su da postoji veliki raspon vrijednosti termodinamičkih i konvektivnih parametara, pa su podijelili sondaže u dvije grupe. Pritom su se služili metodom klasteriranja koja se zasniva na određivanju takozvanih *k*-sredina¹, po jednu za svaki klaster (engl. *k-means clustering*, npr. poglavlje 14.3.1 u Wilks, 2006). Pokazalo se da se grmljavinske oluje s jakim udarima vjetra, koje su pripale grupi s manjim brojem sondaža, većinom događaju tijekom hladnog dijela godine. Njihova predkonvektivna okruženja mogla su se pripisati HSLC okruženjima.

Za područje Hrvatske rađen je određen broj studija koje su analizirale konvektivne strukture (produkte) pomoću različitih mjerenja bilo staničnog ili daljinskog tipa. Dostupnost mjerenja o munjama u zadnjih desetak godina omogućio je bolji uvid u detekciju DMK-a. Tako su Mikuš i sur. (2012) proveli sustavnu analizu DMK-a nad Hrvatskom istražujući prostorno-vremenska obilježja mjerenja o munjama i pripadnih

¹Metoda *k*-sredina je najčešće korištena nehijerahijska metoda klasteriranja. *k* označava broj grupa (klastera) u koje će se grupirati podaci tako da su svi podaci unutar grupe najbliži vrijednosti srednjaka te grupe.

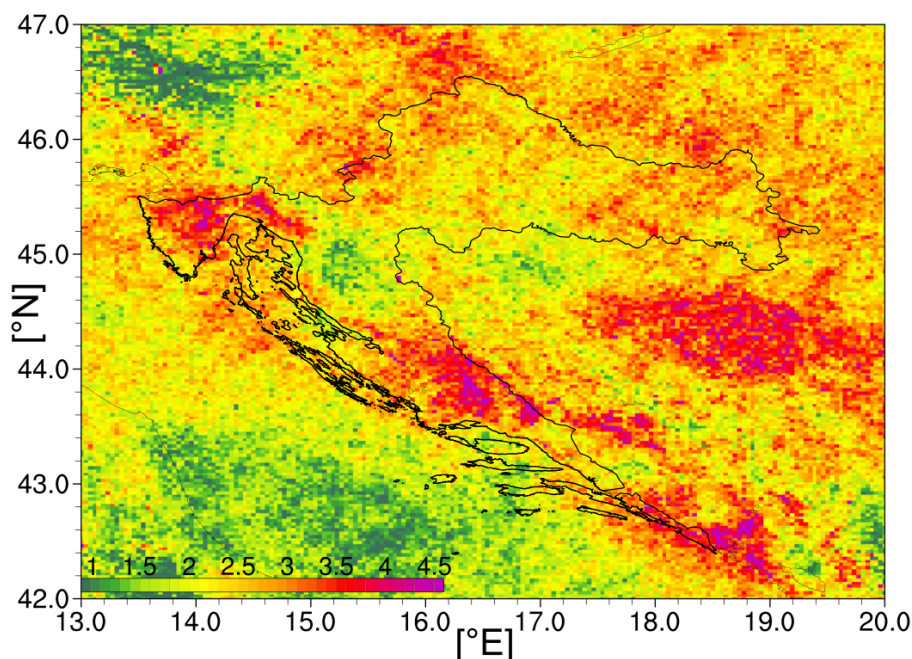
sinoptičkih tipova vremena. Proveli su četverogodišnje istraživanje (2006. – 2009. godine) za topli dio godine (travanj – listopad), a rezultati su pokazali da je konvektivno najaktivnije područje Hrvatske sjeverni Jadran. Udio konvektivnih dana na tom području u odnosu na sve zabilježene konvektivne dane u Hrvatskoj u navedenom razdoblju iznosio je 62,4 % konvektivnih dana, dok planinska podregija s 40,1 % predstavlja najmanje konvektivno aktivno područje (tablica 1.1). Najčešći sinoptički tip vremena koji se javljao tijekom konvektivnih dana odgovarao je razvijenim ciklonama ili gotovo bezgradijentnim poljima tlaka zraka. Pritom je bila vrlo česta advekcija toplog i vlažnog zraka sa Sredozemlja u jugozapadnoj struji po visini.

Tablica 1.1. Broj dana s konvektivnom aktivnosti u određenoj regiji za danu godinu i ukupno promatrano razdoblje (15.4 – 15.10., 2006. – 2009.). Kratice za podregije označavaju: EC – istočna Hrvatska, CC – središnja Hrvatska, MC – planinska Hrvatska, NA – sjeverni Jadran, CA – središnji Jadran, SA – južni Jadran. Preuzeto i prilagođeno iz: Mikuš i sur. (2012).

	EC	CC	MC	NA	CA	SA	Ukupno	
2009	42	54	27	53	41	46	97	24,1 %
2008	44	43	41	67	43	35	100	24,9 %
2007	57	59	53	70	54	46	103	25,6 %
2006	49	52	40	61	54	62	102	25,4 %
Ukupno	192	208	161	251	192	189	402	
	47,8 %	51,7 %	40,1 %	62,4 %	47,8 %	47,0 %		

Nedavno je Jelić (2022) u svojoj disertaciji napravio prostorno-vremensku raspodjelu srednjeg godišnjeg broja dana s indeksom nazvanim TSII² (engl. *Thunderstorm intensity index*). Za proračun indeksa koristio je 13-godišnji niz podataka (2008. – 2020. godine) o munjama iz mreže LINET. Slika 1.9 raspodjele indeksa TSII-a ukazuje da se najveći broj dana s nekim oblikom intenzivne konvektivne aktivnosti (tuča, jak vjetar, jaka oborina i munje) može očekivati u priobalnom području, a posebice na području sjeverno od Kvarnera. Slijede područja Šibensko-kninske županije i sjeverni dio Splitsko-dalmatinske županije te južni dio Dubrovačko-neretvanske županije. Raspodjela indeksa TSII predstavlja i kartu hazarda za pojave intenzivnog nevremena na području Hrvatske i susjednih zemalja.

²TSII je binarni indeks s kojim se mogu detektirati značajne promjene u dinamici munja unutar oluje, odnosno koji ističe najdinamičnija područja grmljavinske oluje. Dodatno je objašnjen je u poglavlju 2.2 i u radu Jelić i sur. (2021).



Slika 1.9. Prostorna raspodjela srednjeg godišnjeg broja dana s nizom vrijednosti TSII-a na temelju 13-godišnjeg niza podataka (2008. – 2020.) o munjama iz mreže LINET. Izvor: Jelić (2022).

1.5. Motivacija i cilj istraživanja

Većina dosadašnjih istraživanja konvektivne aktivnosti usmjerena je na ljetnu sezonu kako u Europi tako i u Hrvatskoj, dok je konvekcija unutar hladnog dijela godine često zanemarivana u analizama. Razlog ovakvog pristupa leži u činjenici da je ljetna konvekcija iznad kontinenta češća i povećanog intenziteta. Navedeno je prikazano u tablici 1.2 koja ilustrira učestalost grmljavinskih oluja na temelju broja munja unutar različitih radijusa oko zračnih luka u Hrvatskoj unutar jednog sata. Plavom i crvenom bojom istaknute su ćelije s minimalnim i maksimalnim iznosima učestalosti grmljavinske aktivnosti za radijus od 50 km. Za sve zračne luke minimum je ostvaren u zimskoj sezoni (DJF), dok je vrhunac aktivnosti u ljetnoj sezoni (JJA). Značajno smanjenje učestalosti konvektivne aktivnosti posebno je izraženo kod kontinentalnih zračnih luka (Zračna luka Zagreb i Zračna luka Osijek), smanjujući se i za red veličine.

Međutim duž obale, stanje je ipak drugačije. Razlike tijekom godine u konvektivnoj aktivnosti puno su manje izražene kod Zračne luke Rijeka te još manje kod Zračne luke Split. Razlike se smanjuju prema jugu. Kako je zimska konvekcija puno manje istraživana od ljetne, uglavnom sporadično kroz tzv. istraživanje izoliranih slučajeva (engl. *case studies*, npr. Mathias i sur., 2019) ili ponekad kroz klimatološke analize cjelogodišnjih podataka o pojavama konvektivnih oluja, odnosno konvektivnih produkata (npr. Blašković i sur., 2023), o njoj se puno manje zna. Zimska konvekcija predstavlja jedan od najvećih izazova u operativnoj prognozi zbog svoje pojave izvan uobičajenog konvektivnog razdoblja i nastanka u okruženju s niskim vrijednostima CAPE-a. Usprkos slabom CAPE-u, zimske konvektivne oluje predstavljaju znatnu prijetnju od opasnog vremena zbog čestog nastanka u uvjetima izrazitog vertikalnog smicanja vjetera

(URL11). Stoga je cilj ovog istraživanja dati pregled vremenskih i prostornih obilježja konvektivne aktivnosti iz hladnog dijela godine na temelju detekcije skoka munje te analize sinoptičkih i termodinamičkih uvjeta u kojima skok munja nastaje. Time bi se poboljšalo razumijevanje nastanka DMK-a tijekom hladnog dijela godine u Hrvatskoj čime bi se unaprijedila i njena prognoza.

Tablica 1.2. Učestalost sati s barem jednim udarom munje u razdoblju 14. 2. 2020. – 30. 4. 2023. za različite sezone: DJF (prosinac, siječanj, veljača), MAM (ožujak, travanj, svibanj), JJA (lipanj, srpanj, kolovoz), SON (rujan, listopad, studeni); za (a) Zračnu luku Zagreb (ZG), (b) Zračnu luku Osijek (OS), (c) Zračnu luku Rijeka (RI) i (d) Zračnu luku Split (ST). Plavom su bojom označene ćelije s minimalnim vrijednostima učestalosti, a crvenom bojom ćelije s maksimalnim vrijednostima učestalosti. Izvor podataka: HKZP.

(a) ZG	DJF	MAM	JJA	SON	(b) OS	DJF	MAM	JJA	SON
8 km	0.001	0.004	0.014	0.005	8 km	0	0.005	0.013	0.003
16 km	0.001	0.008	0.026	0.009	16 km	0	0.01	0.024	0.006
30 km	0.003	0.016	0.05	0.019	30 km	0.001	0.016	0.044	0.01
50 km	0.008	0.029	0.084	0.034	50 km	0.002	0.026	0.077	0.019
100 km	0.025	0.068	0.183	0.072	100 km	0.008	0.058	0.171	0.044
150 km	0.065	0.119	0.29	0.13	150 km	0.015	0.099	0.264	0.073
200 km	0.103	0.17	0.391	0.19	200 km	0.037	0.134	0.347	0.113
(c) RI	DJF	MAM	JJA	SON	(d) ST	DJF	MAM	JJA	SON
8 km	0.005	0.006	0.018	0.013	8 km	0.008	0.006	0.012	0.012
16 km	0.013	0.012	0.031	0.027	16 km	0.019	0.013	0.025	0.025
30 km	0.024	0.025	0.055	0.047	30 km	0.034	0.022	0.045	0.044
50 km	0.041	0.04	0.095	0.071	50 km	0.057	0.04	0.074	0.073
100 km	0.068	0.08	0.188	0.126	100 km	0.115	0.082	0.141	0.144
150 km	0.099	0.13	0.293	0.182	150 km	0.161	0.135	0.219	0.203
200 km	0.136	0.181	0.396	0.24	200 km	0.206	0.189	0.311	0.261

2. Podaci i metode

2.1. Geografski opis domene

Hrvatska je država u jugoistočnoj Europi (slika 2.1) te ju presijeca paralela 45° sjeverne geografske širine što ju smješta u sredinu sjevernog umjerenog toplinskog pojasa. Zauzima površinu od $56\,561\text{ km}^2$ s geografskim koordinatama krajnjih točaka: na sjeveru Žabnik, općina Sveti Martin na Muri, $46^\circ 33'N$ i $16^\circ 22'E$; na jugu otok Galijula (palagruški otoci), $42^\circ 23'N$ i $16^\circ 20'E$ na jugu; na istoku Ilok $45^\circ 12'N$ i $19^\circ 27'E$; na zapadu Bašanija (rt Lako), $45^\circ 29'N$ i $13^\circ 30'E$ (URL12). Hrvatska je pretežno nizinska zemlja. Nizine (teren ispod 200 m apsolutne visine) zauzimaju $53,4\%$ teritorija, brežuljci (200 do 500 m apsolutne visine) $25,6\%$ teritorija, a gorsko i planinsko područje (iznad 500 m apsolutne visine) $21,0\%$ Hrvatske. Nalazi se na dodiru tri veće europske cjeline: Panonske nizine, Jadranskog mora i Dinarida, na temelju kojih Hrvatsku dijelimo na tri regije:

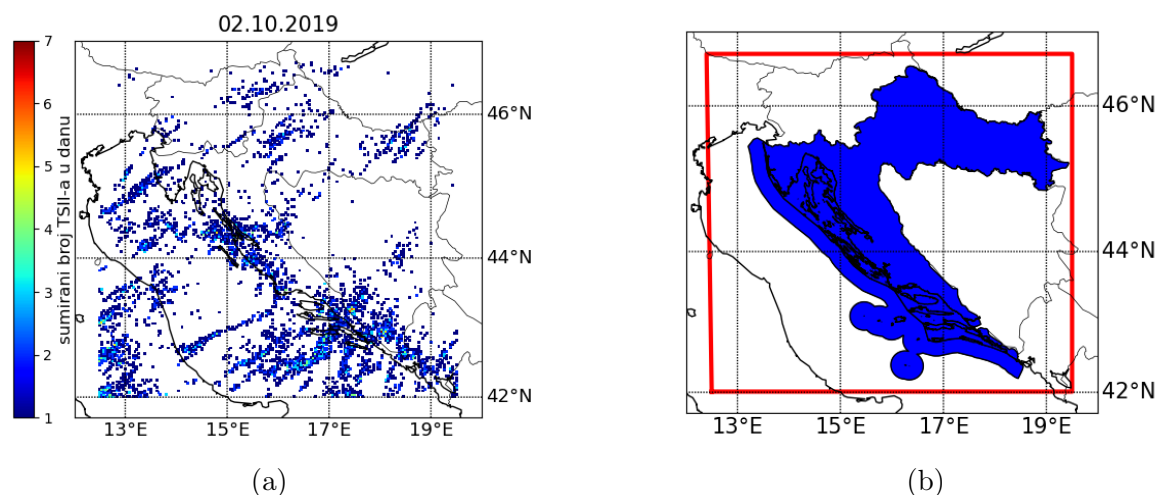
- Panonska Hrvatska (oko 55% teritorija)
- Gorska Hrvatska (oko 30% teritorija)
- Jadranska Hrvatska (oko 15% teritorija).



Slika 2.1. Prikaz geografskog položaja Hrvatske na karti Europe. Izvor: URL13.

2.2. Indeks intenziteta munja

Za izradu analize konvekcije u hladnom dijelu godine koristio se indeks intenziteta munja, TSII, nedavno razvijenog (Jelić i sur., 2021) na temelju podatka o munjama (slika 2.2a iz mreže LINET (engl. *Lightning Detection Network in Europe*; Betz i sur., 2009a). Više o samom indeksu može se naći u Jelić (2022) gdje je napravljena dvodimenzionalna baza podataka o udarima munja na rezoluciji $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ i intervalima od 2 minute za cijelo razdoblje od $1.$ siječnja $2008.$ do $31.$ prosinca $2020.$ unutar domene koja je prikazana na slici 2.2b.



Slika 2.2. (a) Prikaz jednog dana s barem jednim tragom (nizom vrijednosti) TSII-a. (b) Prikaz domene unutar koje postoje zabilježene vrijednosti TSII-a. Plavom bojom prikazan je hrvatski teritorij.³

Sam indeks TSII nastao je na temelju matematičke metode za detekciju skoka munje (npr. Schultz i sur., 2009). Uobičajeno se definira središte oluje pomoću određenog algoritma za praćenje oluje te se definira područje utjecaja oko središta oluje za koje se prikuplja broj munja u svakom vremenskom koraku. TSII se razlikuje od ostalih metoda skoka munje zbog prijelaza s Lagrangeovog na Eulerov sustav, odnosno u grupiranju podataka munja, iako se matematički metoda bitno ne mijenja. Eulerov sustav omogućava promatranje svakog dijela oluje zasebno za što je potrebna unaprijed definirana mreža točaka (u ovom slučaju $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$). Algoritam računanja indeksa uključuje računanje prosječne gustoće munja po minuti u intervalima od 2 minute na koji se primjenjuje otežani klizni srednjak. Zatim se računaju uzastopni trendovi za cijelo razdoblje i dvostruke standardne devijacije (2σ). Kako bi se TSII-u dodijelila pozitivna vrijednost ($\text{TSII}=1$) šesti uzastopni trend (u 12. minuti) mora biti veći od 2σ dobivenih iz prethodnih pet trendova. Tako dobiven indeks je dijagnostički alat koji ističe najdinamičnija područja grmljavinske oluje. Treba naglasiti da je TSII binarni indeks koji dobiva vrijednost jedan ako se broj munja naglo poveća te se može sumirati za isto područje tako da se dobije vrijednost TSII-a za jedan sat, dan ili bilo koje odabrano razdoblje. Slika 2.2a prikazuje primjer dana s barem jednim nizom vrijednosti TSII-a na području Hrvatske. Treba napomenuti ako je niz vrijednosti TSII-a za jedan kvadratić veći od jedan, ne može se razaznati je li uzrok skoku munja bio jedan sustav u različito doba dana ili više sustava oluja koji su prolazili tim područjem taj dan.

2.3. Prostorna i vremenska analiza

Za potrebe ovog rada analizirano je razdoblje od pet godina, 2016. – 2020., ali samo hladni dio godine od listopada do ožujka. Zbog jednostavnosti nisu uključeni prijestupni dani (29. 2. 2016. i 29. 2. 2020.), ali vremenski niz je dovoljno dug da bi njihovo isključivanje utjecalo na rezultate. Dan je odabran kao *dan s konvekcijom* ako je unutar granica Hrvatske zabilježen barem jedan niz vrijednosti TSII-a što odgovara

³Obje slike napravljene su pomoću ekstenzije *Basemap* Python paketa *matplotlib*.

nizu uzastopnih vrijednosti TSII-a u prostoru. Taj uvjet je smanjio vremenski niz na 290 dana. Za konvektivne dane provedena je prostorna i vremenska raspodjela. Za prostornu raspodjelu korištena je geografska podjela Hrvatske koju koristi DHMZ za izdavanje vremenskih upozorenja (URL14). Hrvatski teritorij je podijeljen na osam regija: osječka (A), zagrebačka (B), karlovačka (C), gospićka (D), kninska (E), riječka (F), splitska (G) i dubrovačka (H) regija što je i prikazano na slici 2.3.

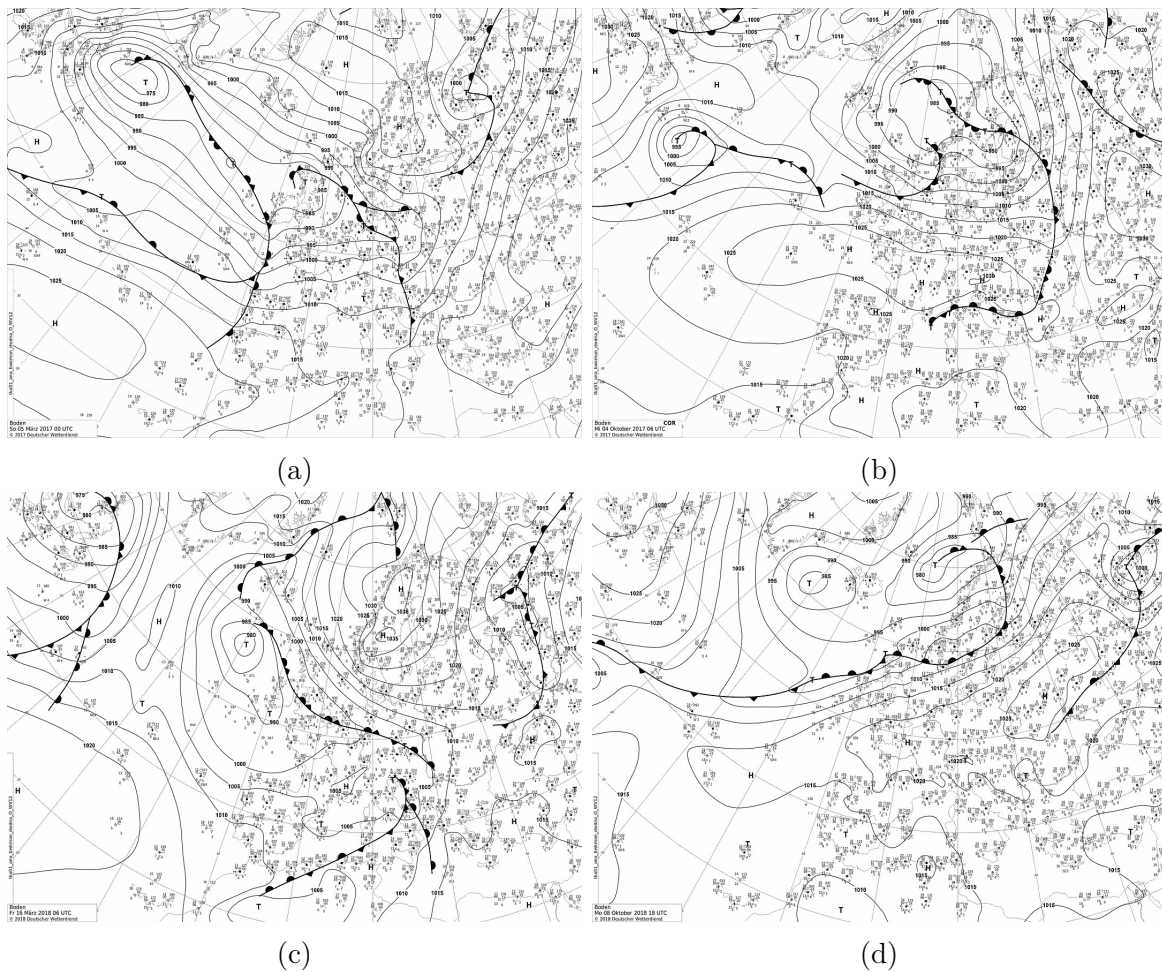


Slika 2.3. Karta Hrvatske s prostornim regijama na temelju kojih je provedena prostorna i vremenska analiza dana s konvekcijom u hladnom dijelu godine. Svakoj regiji pridruženo je slovo: osječka (A), zagrebačka (B), karlovačka (C), gospićka (D), kninska (E), riječka (F), splitska (G) i dubrovačka (H) regija. Izvor: DHMZ.

2.4. Prizemna i visinska sinoptička analiza

U umjerenim širinama sinoptički uvjeti mogu uvelike pogodovati, ali s druge strane i nepovoljno djelovati na razvoj povoljnog okruženja za nastanak DMK-a (Plant i Yano, 2016). Stoga je u ovome radu napravljena prizemna i visinska sinoptička analiza. Za svaki dan s konvekcijom korištene su sinoptičke karte prizemnog polja tlaka njemačke prognostičke službe (njem. *Europäischer Wetterbericht Deutscher Wetterdienst*) kao i sinoptičke karte na 500 hPa plohi u 00, 06, 12 i 18 UTC dostupne na: URL15. Na prizemnim sinoptičkim kartama detektirana je i analizirana pojava frontalnih zona, odnosno tople, hladne i okludirane fronte tijekom dana s konvekcijom (slika 2.4).

Također se za odabrane dane provela analiza visinskih sinoptičkih situacija na plohi od 500 hPa kako bi se procijenila prevladavajuća strujanja zraka na velikoj skali. Režimi strujanja koji su detektirani tijekom tog razdoblja su: sjeverno (N), sjeveroistočno

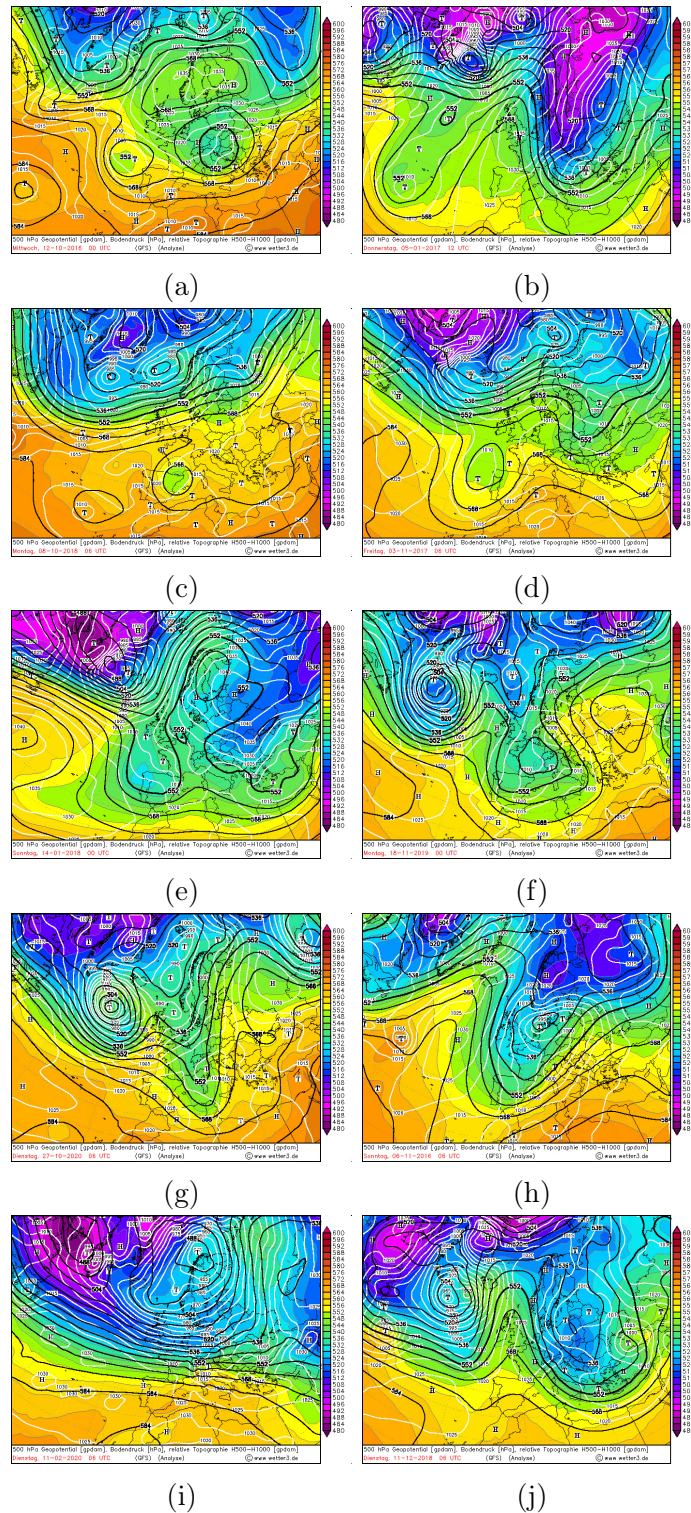


Slika 2.4. Prikaz tipičnih slučajeva prizemnih sinoptičkih situacija u danima s konvekcijom nad Hrvatskom. (a) Hladna fronta na dan 5. 3. 2017. (b) Topla fronta na dan 4. 10. 2017. (c) Okludirana fronta 16. 3. 2018. (d) Bez fronti na dan 8. 10. 2018. Izvor: URL15.

(NE), jugoistočno (SE), južno (S), jugozapadno (SW), zapadno (W) i sjeverozapadno (NW) strujanje. Od sinoptičkih struktura promatrane su se: visinska ciklona, os doline i kvazi bezgradijentno polje. Svi primjeri visinskih režima strujanja i sinoptičkih oblika tlaka prikazani su na slici 2.5.

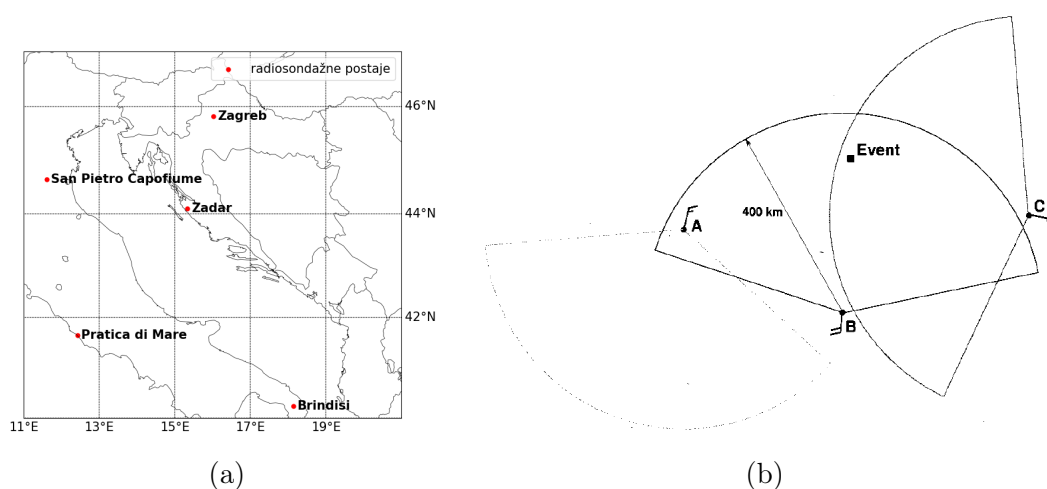
2.5. Radiosondažni podaci

Za određivanje konvektivnih parametara korišteni su podaci radiosondažnih mjerenja dostupni na internetskim stranicama Sveučilišta u Wyoming-u u SAD-u. Reprezentativne sondaže su smatrane one koje su odgovarale uvjetima nadolazeće struje zraka (engl. *proximity inflow method*) kako je predloženo u Rasmussen i Blanchard (1998). Baza podataka o munjama/TSII-u omogućila je dnevne i satne vrijednosti suma TSII-a unutar svakog kvadratića na domeni (slika 2.2b) za dane s konvekcijom. Metoda se primijenila na sve kvadratiće s nizom vrijednosti TSII-a koji pripadaju Hrvatskoj, njenim unutarnjim vodama i teritorijalnom moru. *Shape* datoteke, s kojima se provjeravala pripadnost kvadratića hrvatskom teritoriju, preuzete su s internetske stranice *Mari-neregions.org* (URL16). Od početnih 52 701 kvadratića s nizom vrijednosti TSII-a,



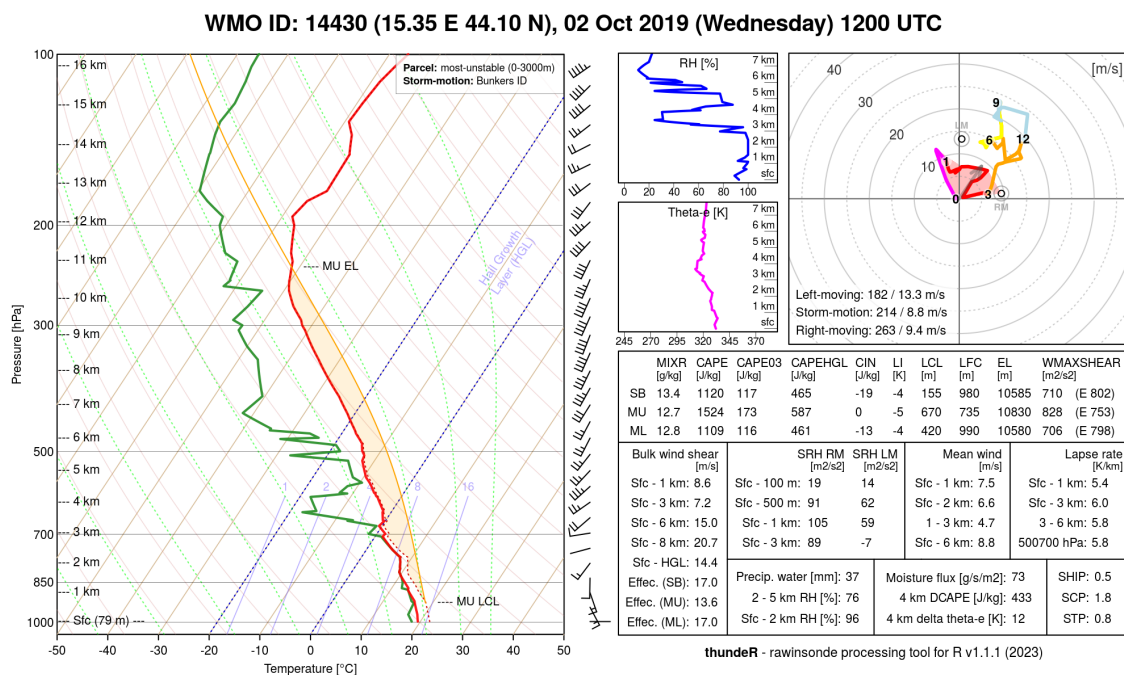
Slika 2.5. Prikaz tipičnih slučajeva visinskih sinoptičkih situacija u danima s konvekcijom. (a) Visinska ciklona na dan 12. 10. 2016. (b) Os doline na dan 5. 1. 2017. (c) Bezgradijentno polje na dan 8. 10. 2018. (d) Sjeverno strujanje na dan 3. 11. 2017. (e) Sjeveroistočno strujanje na dan 14. 11. 2018. (f) Jugoistočno strujanje na dan 18. 11. 2019. (g) Južno strujanje na dan 27. 10. 2020. (h) Jugozapadno strujanje na dan 6. 11. 2016. (i) Zapadno strujanje na dan 11. 2. 2020. (j) Sjeverozapadno strujanje na dan 11. 12. 2018. Izvor: URL15.

njih 23 098 pripada hrvatskom teritoriju. Nakon toga su iz vremenskog niza maknuti svi kvadratići koje nisu ispunjavali vremenski uvjet: sondaža je reprezentativna ako se meteorološki događaj (u ovom slučaju niz vrijednosti TSII-a) dogodio 3 h prije ili 6 h poslije puštanja sondaže. Drugim riječima za sondaže koje su puštene u 00 UTC događaj je morao biti zabilježen između 21 i 06 UTC, a za sondaže u 12 UTC između 09 i 18 UTC. Osim spomenutog vremenskog uvjeta, analizirana sondaža mora se nalaziti u dolaznom sektoru zraka od meteorološkog događaja – mora biti udaljena manje od 400 km te upadati unutar $\pm 75^\circ$ od srednjeg vektora vjetra u graničnom sloju (Rasmussen i Blanchard, 1998). Shema uvjeta je prikazana na slici 2.6b. Odabrane radiosondažne postaje su: San Pietro Capofiume, Brindisi, Pratica di Mare, Zagreb, i Zadar te su njihovi geografski položaji prikazani na slici 2.6a. Istu metodu i iste radiosondažne postaje koristila je Renko (2018) u svojoj disertaciji.



Slika 2.6. (a) Lokacije radiosondažnih mjerenja čiji su podaci korišteni u ovome radu. (b) Shema pravila za odabir reprezentativne sondaže za meteorološki događaj. Radiosondažne postaje su označene s A, B i C, a vremenski događaj s kvadratićem i oznakom "Event". Vjetar u graničnom sloju je označen konvencionalnim simbolima. Područja inkluzije su kružni odsječci od 150° s radijusom od 400 km sa središtem u točki mjerenog vjetra graničnog sloja. Reprezentativne radiosondaže za meteorološki događaj su B i C. Izvor: Rasmussen i Blanchard (1998).

Svi su kvadratići ispunili prostorni kriterij za barem jednu radiosondažnu stanicu. Srednji vektor vjetra računao se pomoću u i v komponenti vjetra unutar prvih 500 metara iznad tla. Također ako je za jedan događaj više sondaža imalo sve odgovarajuće uvjete, odabrana je ona koja je izmjerila veći CAPE. Sve navedene uvjete ispunilo je ukupno 15 449 sondažnih mjerenja. Za potrebe mezoskalne analize konvektivnih dana odabrana su sondažna mjerenja koja su bila reprezentativna za različite nizove vrijednosti TSII-a u danu, ali tako da nisu višestruko iskorištena u analizi. Drugim riječima, unutar jednog dana moglo je biti najviše deset reprezentativnih sondaža jer su se koristili radiosondažni podaci s pet postaja koje mjere dva puta dnevno u 00 i 12 UTC. Konačno, obrađeno je 517 različitih radiosondažnih mjerenja, nakon što su izbačena mjerenja kod kojih vrijednosti MUCAPE-a nisu bile veće od 0 Jkg^{-1} .



Slika 2.7. Prikaz grafičkog sučelja *thundeR*-a s radiosondažnim profilom, hodografom i ispisanim parametrima konvekcije. Prikazano je radiosondažno mjerenje na stanici Zadar 2.10.2019. u 12 UTC. Izvor: URL17.

2.5.1. Parametri konvekcije

Radiosondažni podaci obrađeni su u besplatnom programskom paketu *thundeR* (URL18), koji služi za brzi izračun i vizualizaciju parametra konvekcije često korištenih u operativnoj prognozi intenzivnih konvektivnih oluja. Paket su razvili i stalno obnavljaju Taszarek i sur. (2023). Glavni algoritam napisan je u C++ programskom jeziku te je implementiran u R programski jezik što omogućava izračun preko 200 termodinamičkih i kinematičkih parametara. Moguće ga je pokrenuti i preko Pythona pomoću *rpy2* paketa kako je i napravljeno u ovome radu. Na slici 2.7 prikazano je grafičko sučelje *thundeR*-a kojemu se može pristupiti i preko: URL17.

Za prognozu DMK-a prognostičari uobičajeno koriste set termodinamičkih i kinematičkih parametara i indeksa (npr. Taszarek i sur., 2017) dobivenih iz numeričkih prognostičkih modela (poznati kao NWP modeli). Ti parametri konvekcije i indeksi označavaju potencijal razvitka grmljavinske oluje prema prevladavajućim svojstvima zračne mase. Za kvantitativno određivanje prva dva nužna sastojka za nastanak DMK-a (nestabilnost atmosfere i vlažni granični sloj) razvijeni su razni termodinamički i kinematički konvektivni parametri u zadnjih nekoliko desetljeća (npr. Kunz, 2007).

U ovom potpoglavlju opisani su kinematički i termodinamički uvjeti korišteni za mezoskalnu analizu dana s konvekcijom. Možemo ih podijeliti u tri skupine: parametri česti, parametri temperature i vlage te kinematički parametri (Stull, 2015). Za potrebe ovog rada izračunati su određeni parametri česti: visine LCL-a, LFC-a i EL-a, CAPE, CIN, DCAPE i kinematički parametri: vertikalno smicanje vjetera u slojevima 0-1 km, 0-3 km, 0-6 km iznad tla. Parametri česti imaju dodatnu podjelu na:

- SB (engl. *surface based*)-podizanje česti počinje u blizini površine, najčešće se koristi temperatura i rosište na 2 m visine
- MU (engl. *most unstable*)-podiže se ona čest koja ima najveću vrijednost nestabilnosti (najveći CAPE); *thundeR* ju definira kao onu s najvećom ekvivalentnom potencijalnom temperaturom između površine i 3 km visine
- ML (engl. *mixed layer*)-čest koja se diže s površine, ali se njena svojstva dobiju usrednjavanjem stanja atmosferskog graničnog sloja u donjih 500 m ili 1 km; u *thundeR*-u čest graničnog sloja se računa usrednjavanjem potencijalne temperature i omjera miješanja unutar donjih 500 m graničnog sloja i podiže se s površine

U prvom i drugom potpoglavlju (1.1., 1.2.) objašnjenje su visine LCL-a, LFC-a i EL-a.

CAPE (engl. *Convective Available Potential Energy*, raspoloživa konvektivna potencijalna energija) procjenjuje maksimalnu energiju koju mogu dobiti grmljavinske oluje od uzgona povezanu s otpuštanjem latentne topline kada se vodene para kondenzira. Proporcionalna je crveno obojanoj površini na slici 2.7 između visine LFC-a i visine EL-a koja se nalazi između krivulja temperature okoline i mokre adijabate po kojoj se čest diže. Mjerna jedinica joj je Jkg^{-1} . Može se izraziti preko relacije:

$$CAPE = \int_{z_{LFC}}^{z_{EL}} g \left(\frac{T_{v,p} - T_{v,env}}{T_{v,env}} \right) dz, \quad (2.1.)$$

pri čemu su g akceleracija sile teže i T_v virtualna temperatura. Virtualna temperatura je temperatura koju bi imao suhi zrak, takva da mu gustoća i tlak budu jednaki gustoći i tlaku vlažnog zraka. Indeks p označava čest, dok indeks env okoliš.

Između vrha sloja miješanja i visine LFC-a čest koja se diže je hladnija nego njen okoliš što znači da ima negativan uzgon. Vanjski okidač koji uzdiže čest mora djelovati protiv tog negativnog uzgona i rad koji mora obaviti proporcionalan je površini između visine na kojoj se čest krene uzdizati z_i i LFC-a. Taj rad se naziva CIN-om (engl. *Convective Inhibition*), konvektivnom inhibicijom. Jednadžba joj je identična CAPE-ovoj samo s različitim granicama:

$$CIN = - \int_{z_i}^{z_{LFC}} g \left(\frac{T_{v,p} - T_{v,env}}{T_{v,env}} \right) dz, \quad (2.2.)$$

Njezine vrijednosti su negativne i mjerne jedinice su Jkg^{-1} .

DCAPE (engl. *Downdraft Convective Available Potential Energy*) je procjena jačine propada (engl. *downburst*) i izražava se preko:

$$DCAPE = - \int_{z_i}^{z_{LFS}} g \left(\frac{\theta_{v,p} - \theta_{v,env}}{\theta_{v,env}} \right) dz, \quad (2.3.)$$

gdje θ_v predstavlja virtualnu potencijalnu temperaturu česti što je virtualna temperatura koju bi čest imala da se adijabatički spusti na tlak od 1000 hPa. Visina z_{LFS} (LFS, engl. *level of free sink*) je visina na kojoj zrak pun oborine prvi put ima negativni uzgon što je analogno LFC-u, samo za silaznu struju zraka. Kao i CIN, DCAPE ima negativnu vrijednost i mjerne jedinice Jkg^{-1} . U *thundeR*-u se z_{LFS} smatra visina

od 4 km iznad tla sa srednjom vrijednošću θ_{env} u sloju od 3 do 5 km iznad tla.

Smicanje vjetra (BS, engl. *bulk wind shear*) je promjena horizontalne brzine ili smjera vjetra s visinom. To je vektorska razlika između vjetra na vrhu promatranog sloja i vjetra na dnu promatranog sloja. Njegova glavna uloga je organizacija konvekcije. U radu se koriste iznosi smicanja vjetra između tla i 1, 3 te 6 km visine. Mjerna jedinica je ms^{-1} , a iznos i smjer smicanja vjetra računa se kao:

$$BS(\text{iznos}) = \sqrt{(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2} \quad (2.4.)$$

$$BS(\text{smjer}) = 90^\circ - \arctan\left(\frac{\Delta v}{\Delta u}\right) + \alpha_0 \quad (2.5.)$$

$$\alpha_0 = \begin{cases} 180^\circ & \text{ako } \Delta u > 0; \\ 0^\circ & \text{ako } \Delta u < 0. \end{cases} \quad (2.6.)$$

Navedeni paramteri korišteni su potpoglavlju 3.3. za potrebe mezoskalne analize.

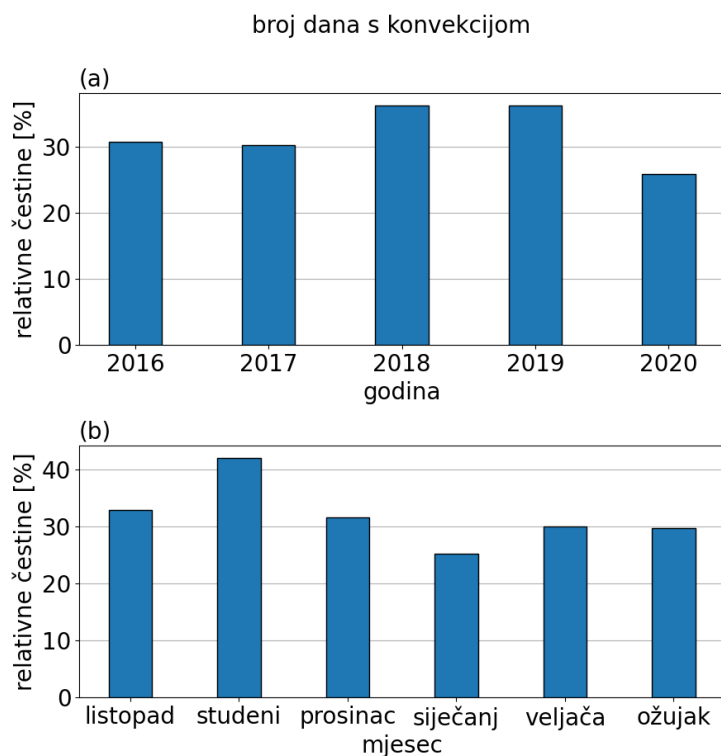
3. Rezultati i diskusija

3.1. Vremenska i prostorna raspodjela dana s konvekcijom

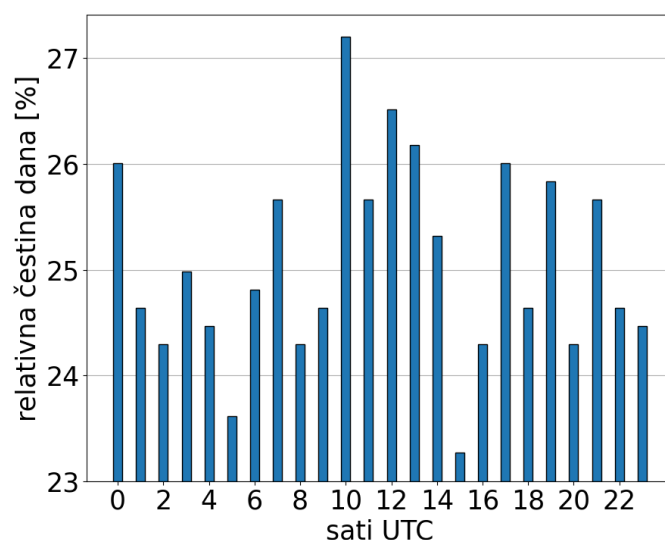
Na slici 3.1 prikazane su relativne čestine broja dana s konvekcijom po godinama i po mjesecima tijekom hladne sezone, od listopada do ožujka, za čitav teritorij Hrvatske. Razlike u broju dana po godinama nisu velike i pokazuju višegodišnju varijabilnost konvektivne aktivnosti (slika 3.1a). Najmanji udio dana s konvekcijom ima 2020. godina s 25,82 %, dok najviše dana imaju 2018. i 2019. godina s 36,26 % dana. Sve godine, osim 2020., imaju više od 30 % dana s konvekcijom godišnje u promatranom razdoblju. Prosječno, tijekom petogodišnjeg razdoblja 2016. – 2020., zabilježeno je 31,87 % dana s konvekcijom, što znači da prosječno tijekom hladnih mjeseci skoro svaki treći dan možemo očekivati konvektivnu aktivnost povezanu s munjama. Tijekom tople sezone nad područjem Hrvatske prosječno se očekuje konvektivna aktivnost svaki drugi dan (Mikuš i sur., 2012). Na slici 3.1b prikazan je godišnji hod dana s konvekcijom tijekom hladnih mjeseci. Studeni se ističe s najvećom relativnom čestinom od 42 % dana u odnosu na ostale mjeseci u hladnom dijelu godine. Ovaj rezultat se dobro slaže s rezultatima koji su dobiveni za raspodjelu tlaka i učestalost jesenskih ciklona (npr. Penzar i sur., 2001) te druge produkte konvekcije kao što su tuča (npr. Blašković i sur., 2023) ili pijavice (npr. Renko i sur., 2016). Također se može primijetiti da je tijekom posljednjeg godišnjeg tromjeseča (listopad, studeni, prosinac) broj dana s konvekcijom u jesen nešto veći. Svi jesenski mjeseci zabilježili su više od 30 % dana s konvekcijom u odnosu na mjeseci na početku godine (siječanj, veljača, ožujak). Siječanj je mjesec s najmanjim udjelom konvektivnih dana (25,16 %), odnosno sa skoro dvostruko manjim brojem dana od onog za studeni.

Dnevni hod relativnih čestina dana u kojima je zabilježen barem jedan niz vrijednosti TSII-a unutar određenog sata prikazan je na slici 3.2. Mogu se primijetiti nekoliko razdoblja češće pojave, ali najveću učestalost ima razdoblje od 10 do 13 h. U svakom satu registrirano je barem 23 % dana koji su imali zabilježen niz vrijednosti TSII-a u odgovarajućem satu. Najveća relativna učestalost zabilježenog niza vrijednosti TSII-a je od 10 do 11 h s više od 27 % konvektivnih dana. Zanimljivo je da je tijekom ponoći po UTC-u zabilježen relativno veliki udio dana (26 %) u odnosu na termine nekoliko sati prije i poslije ponoći. Apsolutno najmanje dana s barem jednim nizom vrijednosti TSII-a unutar jednog sata je zabilježeno između 15 i 16 h. Ovdje je također vidljivo da se dnevni hod konvektivne aktivnosti nad područjem Hrvatske tijekom hladnog dijela godine bitno razlikuje od onog tijekom toplog dijela (Mikuš i sur., 2012). Tada je maksimum aktivnosti zabilježen u poslijepodnevnim satima što je uvelike posljedica porasta uvjetne nestabilnosti zbog dnevnog Sunčevog zagrijavanja. U hladnim mjesecima porast nestabilnosti uslijed Sunčevog zagrijavanja površine ima bitno manju ulogu, a do izražaja više dolaze drugi sinoptički i mezoskalni procesi koji su pobliže analizirani u potpoglavljima 3.2 i 3.3. Zaključno, Sunčevo zagrijavanje je slabije i doseže svoj minimum tijekom zimskih mjeseci zbog čega vremenska raspodjela ne pokazuje karakterističan maksimum u poslijepodnevnim satima.

Na slici 3.3 prikazana je učestalost broja tragova TSII-a unutar jednog sata za promatrano razdoblje kako bi se mogla procijeniti veličina i/ili intenzitet sustava grmljavinskih oluja koji su prolazili Hrvatskom. Najviše puta (više od 1000) su se pojavili

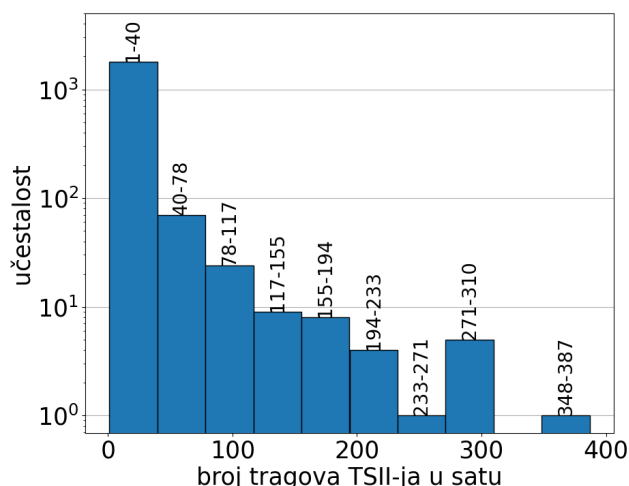


Slika 3.1. Relativne čestine dana s konvekcijom po (a) godinama i (b) po mjesecima (donja slika) tijekom promatranog hladnog dijela godine (listopad – ožujak) od 2016. do 2020. godine. kumulativno za čitavu Hrvatsku.



Slika 3.2. Dnevni hod relativnih čestina dana s konvekcijom s barem jednim uzastopnim nizom vrijednosti TSII-a u jednom satu. Promatrano razdoblje pokriva hladni dio godine (listopad – ožujak) od 2016. do 2020. godine kumulativno za čitavu Hrvatsku.

sustavi koji su imali 1-40 vrijednosti TSII-a u istom satu. Općenito može se primijetiti da su sustavi s manjim brojem tragova učestaliji tijekom zimske konvekcije, odnosno

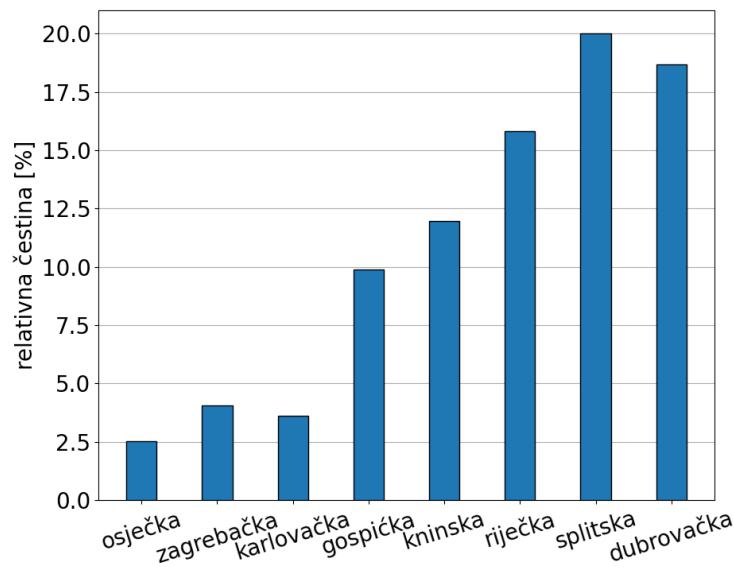


Slika 3.3. Učestalost broja tragova TSII-a unutar jednog sata tijekom hladnih mjeseci (listopad – ožujak) od 2016. do 2020. godine. Iznad svakog razreda slijedi interval vrijednosti broja tragova TSII-a u satu.

da se učestalost grmljavinskih oluja smanjuje što su olujni sustavi veći. Jedino razred s 271-310 tragova TSII-a u satu odstupa od primijećenog trenda. No, potrebno je napomenuti da konvektivne oluje u hladnom dijelu godine često imaju manji broj munja nego one u ljetnim mjesecima kao posljedicu razlike u termodinamičkim uvjetima, osobito u vrijednostima CAPE-a (Williams i sur., 1999) te razlike u količini jezgara kondenzacije (engl. *cloud condensation nuclei*, CCN) i ledenih jezgara u oblaku (Rosenfeld i Lensky, 1998). Također, konvektivna aktivnost češća je duž obale i iznad mora, a ranija istraživanja su potvrdila kako maritimni konvektivni oblaci često imaju plitko područje mješovite faze te sukladno tome i manji potencijal za proizvodnju munja (Rosenfeld i Lensky, 1998).

Prostorna raspodjela dana s konvekcijom po regijama (koje su definirane na slici 2.3) prikazana je na slici 3.4. Regije s najvećom učestalošću konvektivne aktivnosti (s više od 15 % dana s konvekcijom u hladnom dijelu godine) su riječka, splitska i dubrovačka, odnosno obalne regije. Dobiveni rezultati u skladu su s ranijim istraživanjima u kojima je pokazano kako je konvektivna aktivnost i pojava konvektivnih produkata u hladnom dijelu godine uglavnom zabilježena uzduž jadranske obale i nad morem (npr. Renko i sur., 2016; Mikuš, 2017; Jelić, 2022; Blašković i sur., 2023). Posljedica je to razlike temperature između toplijeg mora i hladnog kopna zbog čega dolazi do porasta uvjetne nestabilnosti, ali i zbog frontalnih poremećaja povezanih uz ciklone koje se razvijaju nad Sredozemljem (npr. Horvath i sur., 2008).

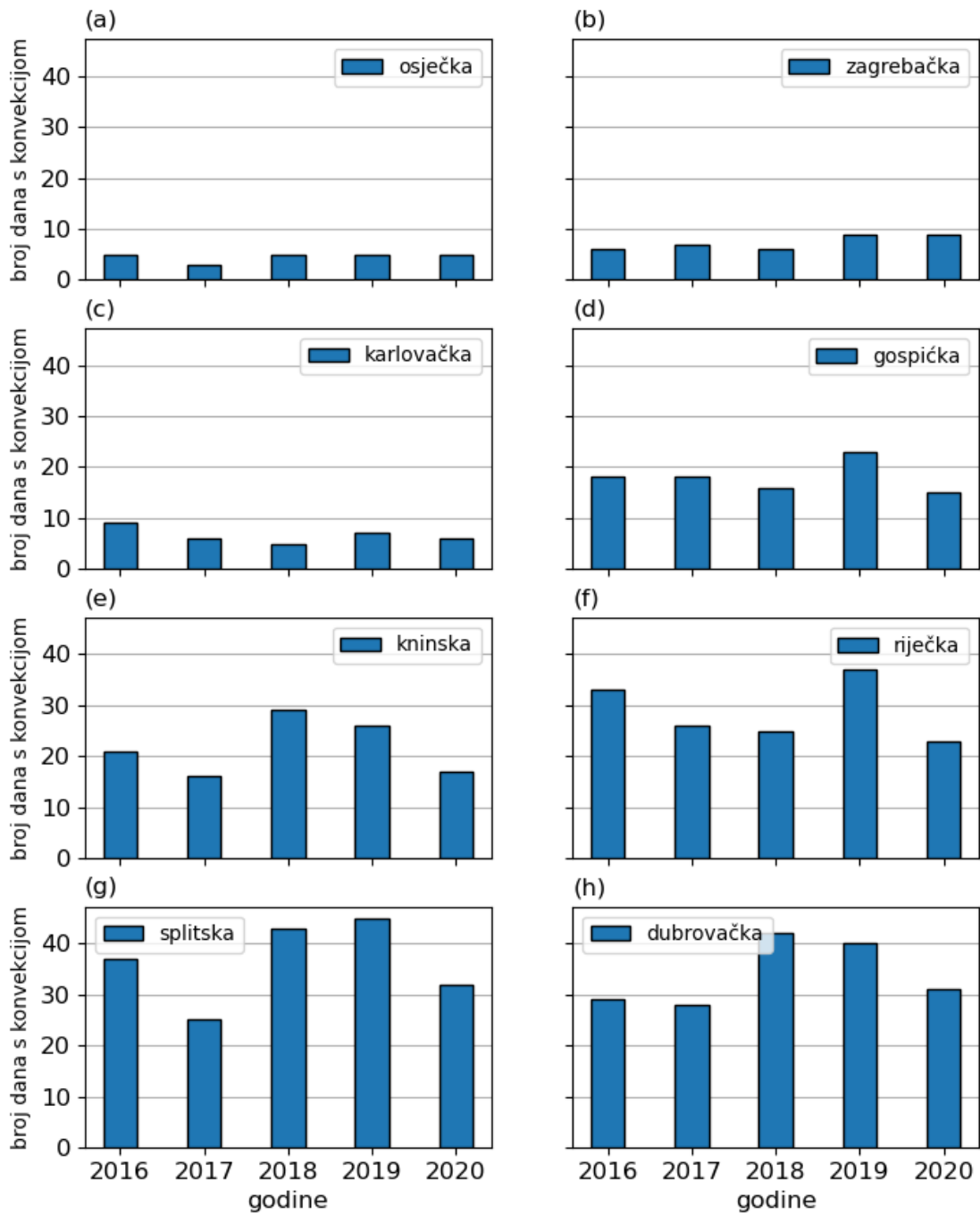
Splitska regija u analiziranom razdoblju ima najveći broj dana s konvektivnom aktivnošću, 20 % (182 dana) te ju odmah slijedi dubrovačka s 18,68 % (170 dana). Najmanji udio dana (< 5 %) imaju kontinentalne regije (osječka, zagrebačka i karlovačka), pri čemu najmanji postotak dana ima osječka s 2,53 % (23 dana). Srednje vrijednosti udjela (< 12 %) imaju regije koje se nalaze u unutrašnjosti Hrvatske, ali s manjom udaljenosti od Jadranskog mora; kninska i gospićka. Ukratko, zamjetno je smanjenje učestalosti konvektivne aktivnosti udaljavanjem od obale.



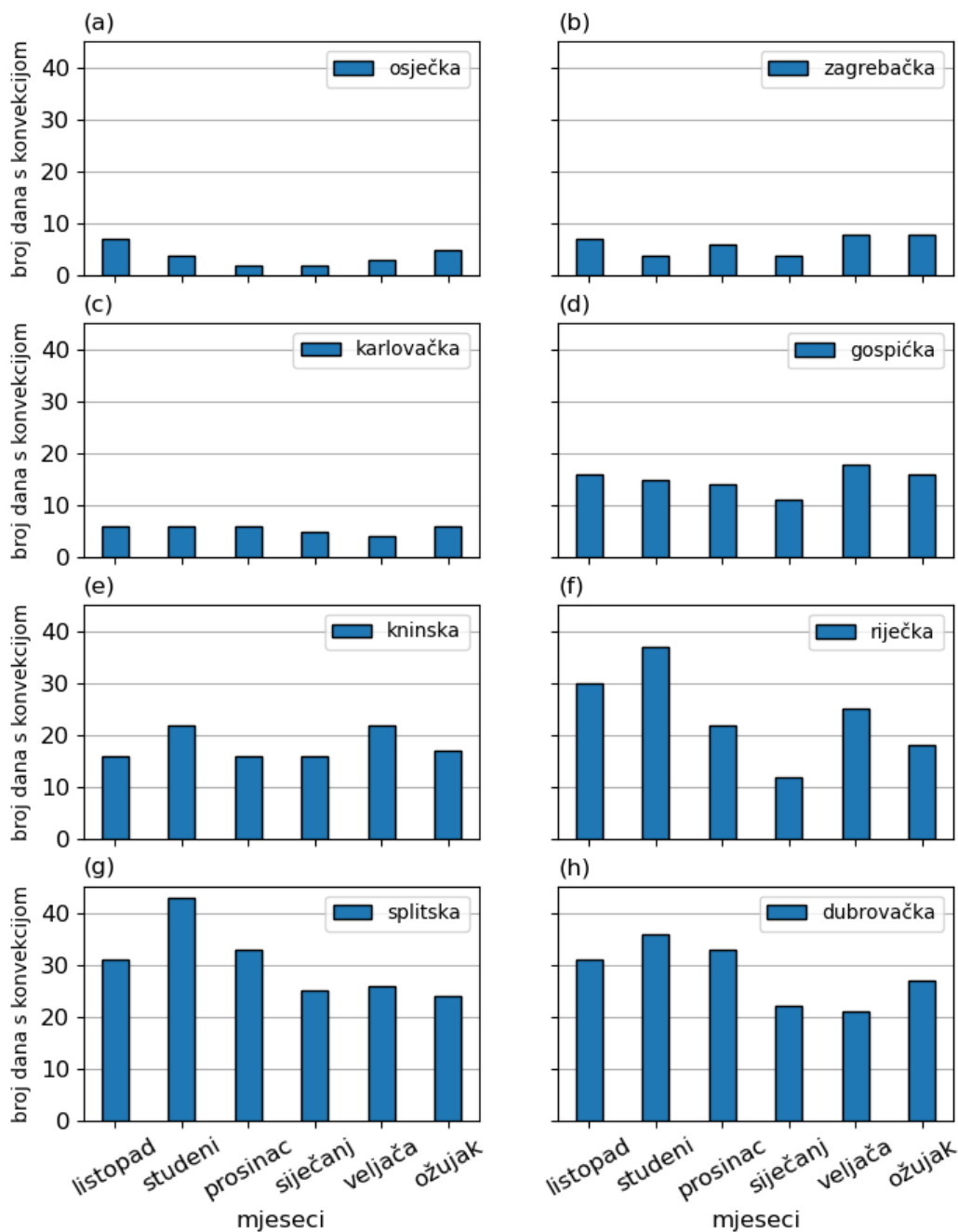
Slika 3.4. Raspodjela relativnih čestina dana s konvekcijom tijekom hladnih mjeseci (listopad – ožujak) kumulativno od 2016. do 2020. godine po regijama.

Na slici 3.5 prikazana je raspodjela dana po godinama za svaku regiju. Slično kao i kod gornje slike 3.1 razlike broja dana po godinama u regiji možemo pripisati višegodišnjoj varijabilnosti. Broj konvektivnih dana po godini uvelike ovisi o regiji; broj dana u kontinentalnim regijama udaljenijima od Jadranskog mora (zagrebačka, osječka i karlovačka) ne premašuje 10 dana, dok gospićka i kninska regija prosječno godišnje imaju 18, odnosno 21,8 konvektivnih dana. Tijekom svake godine u obalnim regijama zabilježeno je više od 20 konvektivnih dana, s time da riječka ima najrjeđu pojavu konvektivne aktivnosti s prosječno godišnje 28,8 dana. Splitska i dubrovačka regija su regije s najčešćom grmljavinskom aktivnošću u hladnom dijelu godine s prosječno 36,4 i 34 dana godišnje. Zanimljivo je primijetiti da je pad broja dana s konvekcijom u 2017. godini malo izraženiji kod obalnih regija (splitska i dubrovačka), nego kod kontinentalnih (primjerice zagrebačka i gospićka regija).

Slika 3.6 pokazuje ukupni broj dana s konvekcijom po regijama i po mjesecima. Očito je da i vremenska raspodjela dana po mjesecima, kao i mjesec u kojem se postiže maksimum grmljavinske aktivnosti, ovisi o regiji. Osječka regija bilježi maksimalni broj dana u listopadu, a zagrebačka u ožujku (slika 3.6a, b). Broj dana po mjesecu u karlovačkoj i gospićkoj regiji (slika 3.6c, d) približno je konstantan za sve hladne mjeseci s manje od 10, odnosno 20 dana po mjesecu. Gospićka regija postiže maksimum u veljači, dok u kninskoj regiji (slika 3.6e) prva tri i posljednja tri mjeseca u godini pokazuju slično ponašanje s maksimumom od 22 dana u veljači, odnosno studenom. Obalne regije: riječka, splitska i dubrovačka (slike 3.6f, g, h) imaju veću konvektivnu aktivnost tijekom zadnjeg tromjesječa u kalendarskoj s maksimalnim brojem u studenom koji iznosi 37, 43 i 36 dana s konvekcijom. Također kontinentalne regije (primjerice zagrebačka i karlovačka) pokazuju puno manju varijabilnost po mjesecima za razliku od obalnih (riječka, splitska, dubrovačka). Ukupan godišnji hod prikazan na donjoj slici 3.1 najviše podsjeća na godišnji hod obalnih regija jer one imaju najveći udio dana s konvekcijom (slika 3.4).



Slika 3.5. Raspodjela ukupnog broja dana s konvekcijom tijekom hladnih mjeseci (listopad – ožujak) od 2016. do 2020. godine po regijama i po godinama: (a) osječka, (b) zagrebačka, (c) karlovačka, (d) gospićka, (e) kninska, (f) riječka, (g) splitska i (h) dubrovačka regija.

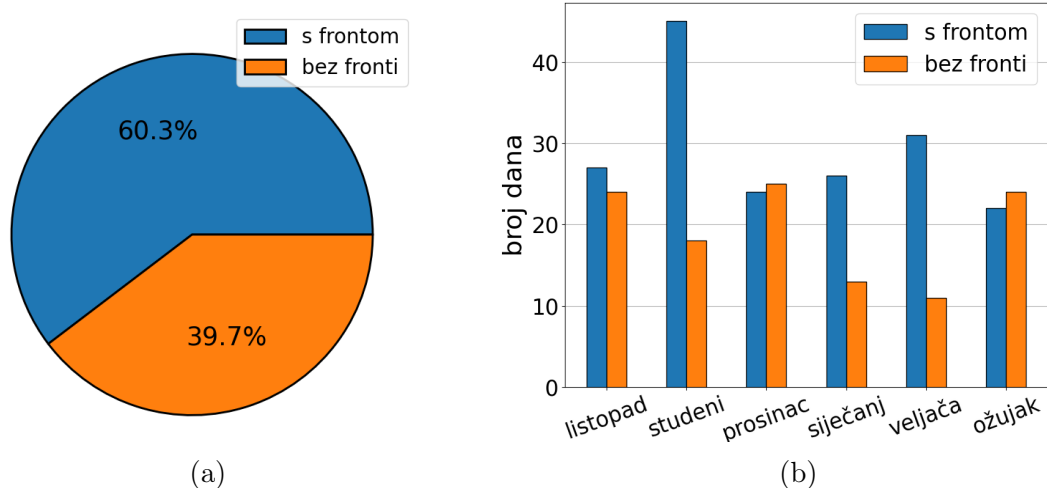


Slika 3.6. Raspodjela ukupnog broja dana s konvekcijom od 2016. do 2020. godine po regijama i po mjesecima: (a) osječka, (b) zagrebačka, (c) karlovačka, (d) gospička, (e) kninska, (f) riječka, (g) splitska i (h) dubrovačka regija.

3.2. Prizemna i visinska sinoptička analiza

Analiza sinoptičke situacije daje nam uvid u mehanizam stvaranja uvjeta pogodnih za nastanak konvekcije te također posljedično omogućava bolju i pouzdaniju prognozu ovakve pojave. Na slici 3.7a prikazan je dijagram udjela pojavljivanja frontalnih sustava u promatranim danima s konvekcijom. Tijekom većine konvektivnih dana (60,3 % što čini 175 dana) nad analiziranim područjem premještala se hladna, topla ili okludirana fronta. Ostale dane (39,7 % od skupa konvektivnih dana) ne možemo dovesti u vezu s frontalnim iniciranjem konvektivnih procesa. Promatrajući godišnji hod hladnog

dijela godine (slika 3.7b) u većem broju mjeseci prevladavali su dani povezani s nekom frontalnom strukturom. Izuzetak predstavljaju ožujak i prosinac za koje je uočeno da je broj dana s frontalnim poremećajem bio podjednak s brojem dana bez pojava fronti. U siječnju, veljači i studenom može se primijetiti da je broj dana s formiranom frontom više nego dvostruko nadmašio broj dana bez fronti u analiziranim konvektivnim danima. U tablici 3.1 prikazana je raspodjela konvektivnih dana s frontalnim poremećajem po godinama te njihova ukupna pojava i učestalost u promatranom razdoblju. Najčešći frontalni poremećaj bila je hladna fronta koja je bila prisutna tijekom približno 23 % konvektivnih dana u hladnom dijelu godine. Udio dana s toplom frontom je bio tek nešto manji, 22,07 % dana. Najmanje puta se pojavila okludirana fronta s 15,17 % ukupnih dana s konvekcijom. Usporedbom rezultata s istraživanjem aktivnosti munja u toplom dijelu godine (Mikuš i sur., 2012) može se zaključiti da sinoptičko forsiranje i modificiranje termodinamičkog okruženja tijekom hladnih mjeseci ima veću ulogu u razvijanju DMK-a. Primjerice, u približno 28 % konvektivnih dana u promatranom razdoblju toplog dijela godine bila je prisutna neka vrsta frontalnog poremećaja. Isto tako hladna fronta je imala dominantniji utjecaj od tople, dok je u hladnom dijelu godine njihova učestalost sličnog iznosa.



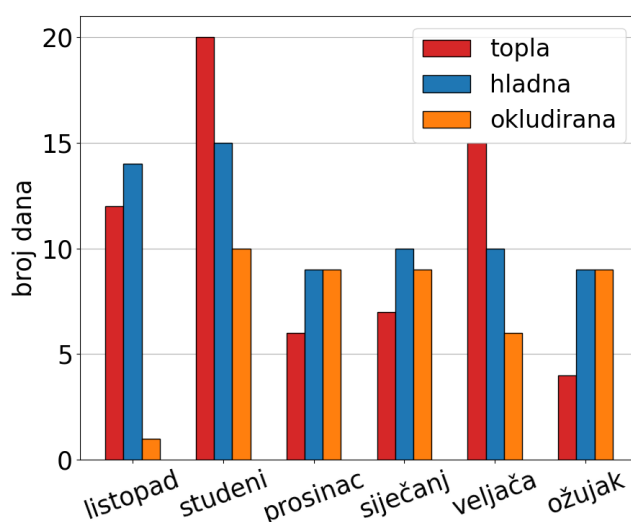
Slika 3.7. (a) Raspodjela broja dana s frontalnim poremećajima tijekom dana s konvekcijom. (b) Broj dana s frontalnim poremećajima po mjesecima tijekom dana s konvekcijom.

Promatrajući brojeve dana s različitim vrstama fronti po mjesecima na slici 3.8 ne može se primijetiti neka određena pravilnost. Broj dana s toplom frontom nadmašuje broj dana s hladnom i okludiranom tijekom veljače i studenog, a u listopadu je zabilježen samo jedan dan s frontom okluzije koja se premještala preko analiziranog područja. Mjesec s najmanjim brojem konvektivnih dana tijekom kojih je analizom sinoptičkih karata detektiran frontalni poremećaj je ožujak s 22 dana, dok se studeni ističe kao mjesec s najviše dana s detektiranim frontalnim poremećajem (45 dana). Takvi rezultati mogu se povezati i s dinamikom ciklonalne aktivnosti nad Sredozemljem koja ima svoj maksimum tijekom jesenskih mjeseci (npr. Penzar i sur., 2001; Horvath i sur., 2008). Također u tom dijelu godine putanja ciklona koje se razvijaju nad sjeverozapadom Afrike uglavnom je prema sjeveroistoku i sjeveru (npr. Alpert i sur., 1990), dok u proljeće one putuju ponajprije na istok te stoga bitno manje utječu na vremenske

prilike u Hrvatskoj, odnosno Dalmaciji.

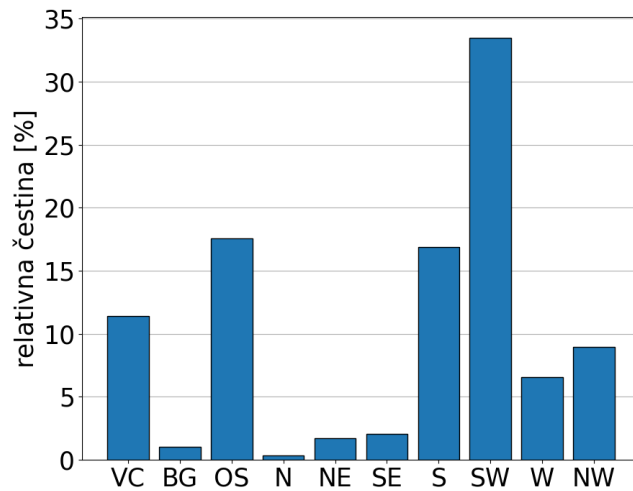
Tablica 3.1. Broj dana s konvekcijom u Hrvatskoj tijekom kojih su se nad analiziranim područjem premještali frontalni poremećaji te njihova relativna učestalost (f) tijekom hladnih mjeseci promatranog razdoblja po godinama.

	2016	2017	2018	2019	2020	ukupno	f (%)
topla fronta	17	15	10	13	9	64	22,07
hladna fronta	14	13	11	16	13	67	23,1
okludirana fronta	7	8	11	9	9	44	15,17
ukupno	38	35	32	38	31	175	60,3

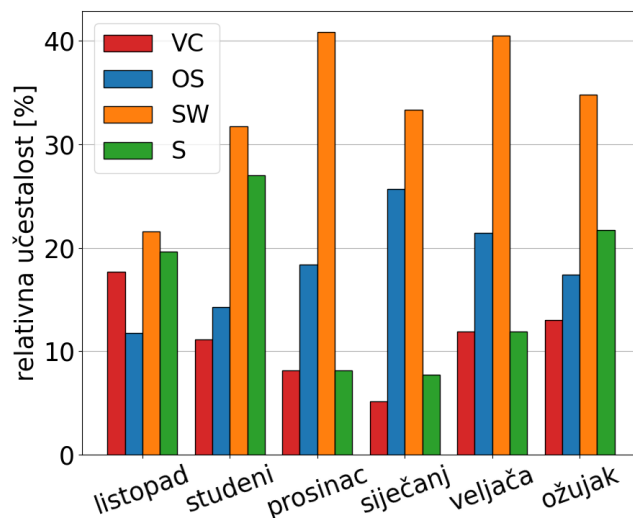


Slika 3.8. Raspodjela broja toplih, hladnih i okludiranih fronti po mjesecima tijekom analiziranih konvektivnih dana.

Slika 3.9 pokazuje zastupljenost pojedinih režima strujanja i tipova vremena tijekom dana s konvekcijom u hladnom dijelu godine. Najdominantnije strujanje je jugozapadno koje se pojavljuje tijekom trećine dana s konvekcijom (33,45 %). Isti režim strujanja najčešći je i u toplom dijelu godine s podjednakim udjelom (Mikuš i sur., 2012). Jugozapadni režim strujanja donosi topao i vlažan zrak sa Sredozemlja nad hladniji europski kontinent, odnosno Hrvatsku što uvelike doprinosi stvaranju pogodnih uvjeta za nastanak DMK-a. U takvim sinoptičkim situacijama advekcija toplog i vlažnog zraka najčešće je najizraženija u nižim slojevima troposfere, odnosno opada s visinom. Zbog gomilanja toplijeg i vlažnijeg zraka u nižim slojevima dolazi do povećanja nestabilnosti (odnosno povećanja vrijednosti stopa ohlađivanja). Takav režim strujanja uobičajeno je posljedica određenog tipa vremena; razvijene ciklone ili termobaričke doline sa središtem u zapadnoj ili sjeverozapadnoj Europi. Zatim slijedi južno strujanje s 16,9 % učestalosti. Od tipova vremena učestalost od 17,58 % pripada formiranju osi doline iznad Hrvatske koje je povezano s južnim strujanjem. Među značajnijim tipovima vremena (koji utječu na režim strujanja) tijekom hladnog dijela godine je svakako i visinska ciklona s 11,37 %. Navedena sinoptička okruženja (os doline i visinska ciklona) također doprinose advekciji vlažnog i relativno toplog zraka sa



Slika 3.9. Raspodjela zastupljenosti tipova vremena i režima strujanja na 500 hPa plohi tijekom konvektivnih dana. Oznake predstavljaju različite tipove vremena i režime strujanja: VC-visinska ciklona, BG-kvazi bezgradijentno polje, OS-os doline, N-sjeverno strujanje, NE-sjeveroistočno strujanje, SE-jugoistočno strujanje, S-južno strujanje, SW-jugozapadno strujanje, W-zapadno strujanje, NW-sjeverozapadno strujanje.



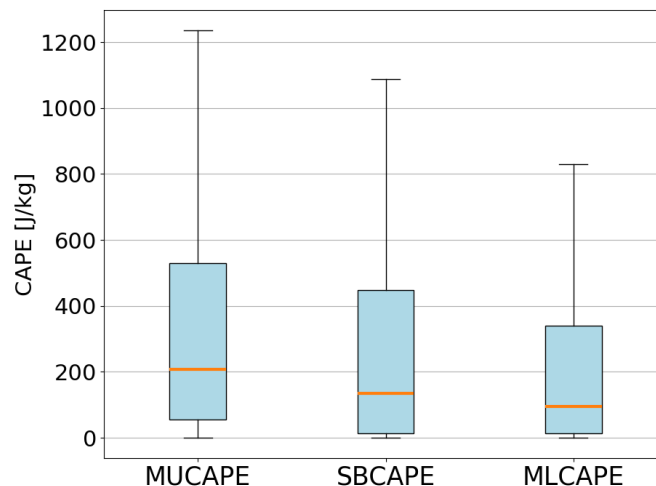
Slika 3.10. Raspodjela relativne učestalosti najdominantnijih tipova vremena i režima strujanja na 500 hPa plohi tijekom konvektivnih dana u hladnim mjesecima od 2016. do 2020. godine. Oznake predstavljaju: VC-visinsku ciklonu, OS-os doline, SW-jugozapadno strujanje i S-južno strujanje.

Sredozemlja prema području Hrvatske. Ostali režimi strujanja ne prelaze prag od 10 %, pri čemu najmanji udio ima sjeverno strujanje sa samo jednim zabilježenim slučajem u skupu konvektivnih dana (njih 290). Sjeverozapadno strujanje formira se uglavnom na stražnjoj strani razvijene visinske ciklone ili doline smještene sjeveroistočno od promatrane domene, odnosno Hrvatske. To strujanje ima najveću zastupljenost od 8,97 % dana s konvekcijom od ostalih rijetko razmjerno zastupljenih režima strujanja.

Godišnji hod relativnih učestalosti tijekom hladnih mjeseci četiri najzastupljenija režima visinskog strujanja i tipova vremena prikazan je na slici 3.10. Prikazana četiri dominantna režima strujanja i tipa vremena: jugozapadno (SW) i južno strujanje (S) te os doline (OS) i visinska ciklona (VC) bila su prisutna tijekom 79,32 % konvektivnih dana. Učestalost ta četiri režima strujanja i tipa vremena varirala je po mjesecima od 70 % (u listopadu) do 87 % zastupljenosti (u ožujku). Očekivano najdominantnije strujanje tijekom svih mjeseci je bilo jugozapadno, ali u listopadu učestalost pojave jugozapadnog strujanja je bila podjednaka učestalosti južnog strujanja i pojave visinske ciklone.

3.3. Mezoskalna analiza

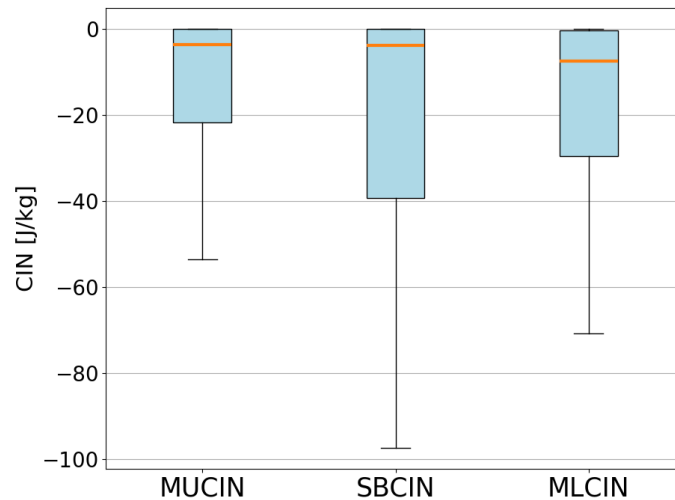
Kako bi dobili uvid u povoljno okruženje za nastanak DMK-a tijekom hladnih mjeseci u promatranom razdoblju, potrebno je analizirati određene termodinamičke parametre. Izračunati kinematički i termodinamički parametri objašnjeni u potpoglavlju 2.5.1. prikazani su u pravokutnim dijagramima.



Slika 3.11. Prikaz vrijednosti MUCAPE-a, SBCAPE-a i MLCAPE-a. Donja i gornja stranica pravokutnika predstavljaju prvi q_1 , odnosno treći q_3 kvartil skupa prikazanih podataka. Narančasta crta unutar pravokutnika je drugi kvartil ili medijan m niza. Završeci linija okomitih na donju i gornju stranicu pravokutnika označuju najmanji podatak koji je veći od $q_1 - 1.5 \cdot (q_3 - q_1)$, odnosno najveći podatak koji je manji od $q_3 + 1.5 \cdot (q_3 - q_1)$.

Raspodjela MUCAPE-a, SBCAPE-a i MLCAPE-a prikazana je na slici 3.11. Većina promatranih vrijednosti SBCAPE-a manje su od 500 Jkg^{-1} ($q_3=447 \text{ Jkg}^{-1}$) što ih prema kriteriju Sherburn i Parker (2014) čini sondažama s niskim CAPE-om. Osim toga, većina slučajeva ispunjava kriterij da i MUCAPE treba biti manji ili jednak 1000 Jkg^{-1} ($q_3 = 529 \text{ Jkg}^{-1}$). Dobivena vrijednost medijana MLCAPE-a iznosi: 95 Jkg^{-1} što je dobro slaganje s rezultatima istraživanja pojava grmljavinskih oluja u središnjoj Europi u kojem je dobivena vrijednost medijana MLCAPE-a 50 Jkg^{-1} za hladnu sezonu (Kolendowicz i sur., 2017). Za analizirano razdoblje hladnog dijela godine u ovom radu medijani MUCAPE-a i SBCAPE-a iznose 208 i 134 Jkg^{-1} . Očekivano je

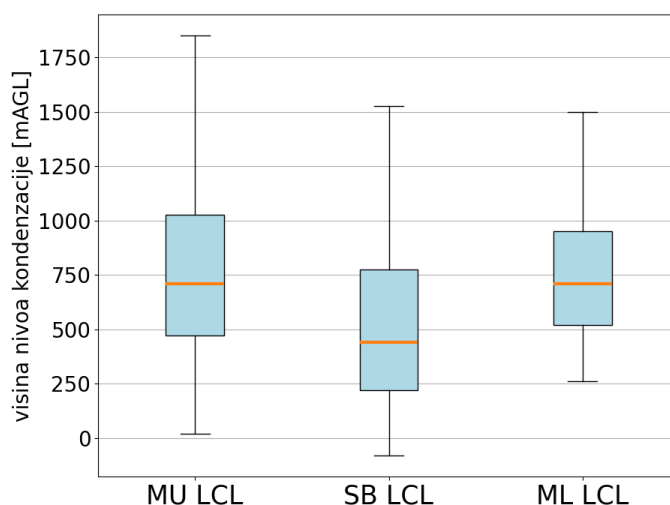
vrijednost medijana MUCAPE-a najveća kao i njegov interkvartilni raspon (434 Jkg^{-1}). Vrijednosti medijana SBCAPE-a i MLCAPE-a su relativno bliske, ali MLCAPE ima manji interkvartilni raspon što ukazuje na njegovu manju varijabilnost zbog toga što se za izračun koristi čest zrak čija se svojstva dobivaju usrednjavanjem stanja atmosferskog graničnog sloja. Budući da se u izračunu SBCAPE-a koriste površinske vrijednosti temperature zraka i rosišta, SBCAPE može biti značajno promjenjiv na malim vremenskim i prostornim skalama. Također, potrebno je napomenuti da u zimskim mjesecima radiosondažna mjerenja potrebna za izračun često nemaju ni jednu pouzdanu točku mjerenja u prizemnom sloju te da je, primjerice, u slučajevima izdignute konvekcije (engl. *elevated convection*) SBCAPE nula. Zbog navedenog MUCAPE je najprikladniji parametar za procjenu najvećeg mogućeg CAPE-a u određenom okruženju, odnosno za procjenu mogućnosti i intenziteta DMK-a, ukoliko postoji određen mehanizam dizanja te naravno za opisivanje nestabilnosti u slučajevima izdignute konvekcije. Za svaki tip CAPE-a u promatranom razdoblju postoji $\sim 8 \%$ radiosondaža čiji izmjereni iznosi CAPE-a premašuju gornji ekstrem (engl. *outliers*), ali oni nisu prikazani na grafičkim prikazima. Taszarek i sur. (2018a) dobili su podjednake vrijednosti medijana MUCAPE-a (približno 150 Jkg^{-1}), ali i treći kvartil doseže vrijednosti od 400 (čak i preko 800) Jkg^{-1} tijekom hladnih mjeseci za područje južne Europe. Ovdje prikazani rezultati su usporedivi s navedenim radom jer područje južne Europe obuhvaća tri od pet radiosondažnih stanica korištenih u ovome radu te obalne regije Hrvatske koje su zabilježile najviše nizova vrijednosti TSII-a.



Slika 3.12. Isto kao na slici 3.11, ali za MUCIN, SBCIN i MLCIN.

CIN je parametar koji se koristi za procjenu potencijala razvitka grmljavinske oluje, odnosno potrebne energije kako bi se nadvladao negativan uzgon. Zajedno s CAPE-om daje dodatni uvid u nastanak i intenzitet konvekcije (npr. Riemann-Campe i sur., 2009). Dobivene vrijednosti su prikazane na slici 3.12. Medijani CIN-ova redom iznose: 4, 4 i 8 Jkg^{-1} te svi q_3 su približno jednaki 0. SBCIN ima najveći interkvartilni raspon s 39 Jkg^{-1} te ga slijedi MLCIN s 29 Jkg^{-1} . Rijetki slučajevi su prelazili vrijednosti 50 Jkg^{-1} , pri čemu donji ekstrem MUCIN-a nije veći od 40 Jkg^{-1} . Osim u listopadu, vrijednosti MLCIN-a dobiveni u ovom radu podudaraju se s rezultatima u Taszarek i sur. (2018a). Prvi kvartili mjesečnih vrijednosti MLCIN-a u navedenom radu rijetko su veći od 50 Jkg^{-1} , dok su vrijednosti medijana veće (otprilike 20 Jkg^{-1}). S obzirom

da su vrijednosti u ovome radu rijetko veće od 50 Jkg^{-1} , CIN u većini slučajeva neće nepovoljno djelovati na iniciranje DMK-a.

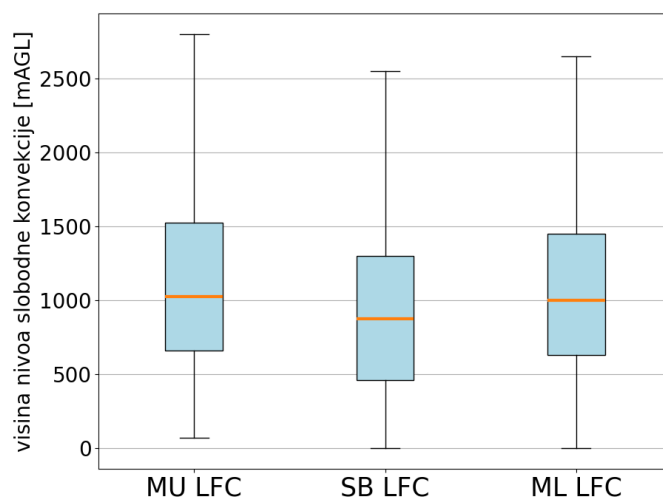


Slika 3.13. Slično kao na slici 3.11, ali za MU LCL, SB LCL i ML LCL. Kratica mAGL označava udaljenost iznad Zemljine površine.

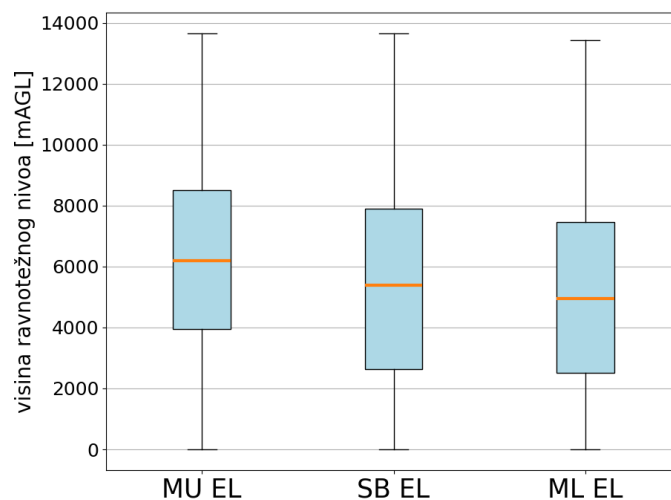
Na slici 3.13 prikazane su vrijednosti visina nivoa kondenzacije izražene u metrima iznad tla. MU LCL i ML LCL imaju podjednake vrijednosti medijana: 710 i 709 m iznad Zemljine površine; te imaju podjednake vrijednosti interkvartilnog raspona. SB LCL sadrži najmanje vrijednosti; iznos njegovog medijana blizak je vrijednosti prvih kvartila MU i ML LCL-a. Prema vrijednostima u Sherburn i Parker (2014), dobivene vrijednosti LCL-a su poprilično niske jer tek manji udio vrijednosti prelazi 1000 m iznad površine tla. Može se zaključiti da je kondenzacija započinjala na niskim nivoima, odnosno da je uglavnom došlo do razvoja konvektivnih ćelija koje imaju nisku bazu. Dobivene vrijednosti ML LCL-a u Taszarek i sur. (2018a) barem su dvostruko veće, a razlog se može pronaći u činjenici da su oni u svojem istraživanju obuhvatili sve dane u odabranom razdoblju, a ne samo konvektivne.

Raspodjele vrijednosti MU LFC-a, SB LFC-a i ML LFC-a (slika 3.14) su slične (imaju bliske vrijednosti interkvartilnog raspona), jedino SB LFC ima malo niže vrijednosti prvog i trećeg kvartila. Medijani LFC-a redom iznose: 1025, 875, 1000 m iznad Zemljine površine. Razlika visine između LCL-a i LFC-a je relativno mala u analiziranim danima što potvrđuje kako za iniciranje DMK-a u takvim uvjetima najčešće nije potreban izrazito snažan mehanizam dizanja na mezoskali.

Pravokutni dijagrami MU EL-a, SB EL-a i ML EL-a prikazani su na slici 3.15. SB EL i ML EL imaju slične raspodjele vrijednosti, osim podudaranja vrijednosti medijana (5400, 4950 m iznad Zemljine površine) i vrijednosti prvog i trećeg kvartila ne odstupaju previše međusobno ($q_1=2625$, 2500 m, $q_3=7900$, 7466 m iznad Zemljine površine). Vrijednosti MU EL-a većinom su veće zbog većih vrijednosti prvog i trećeg kvartila; također ima veću vrijednosti medijana: 6200 m iznad Zemljine površine. Ravnotežni nivo često predstavlja vrh konvektivnog oblaka pa iz dobivenih rezultata možemo zaključiti kako su konvektivni oblaci u hladnom dijelu godine značajno niži u usporedbi s



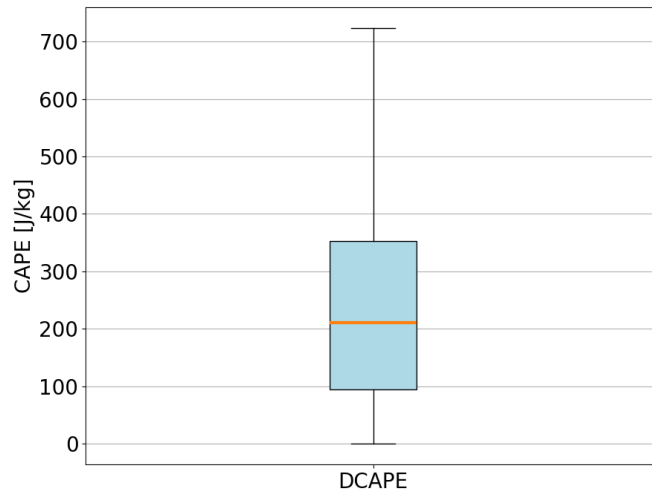
Slika 3.14. Slično kao na slici 3.11, ali za MU LFC, SB LFC i ML LFC. Kratica mAGL označava udaljenost iznad Zemljine površine.



Slika 3.15. Slično kao na slici 3.11, ali za MU EL, SB EL i ML EL. Kratica mAGL označava udaljenost iznad Zemljine površine.

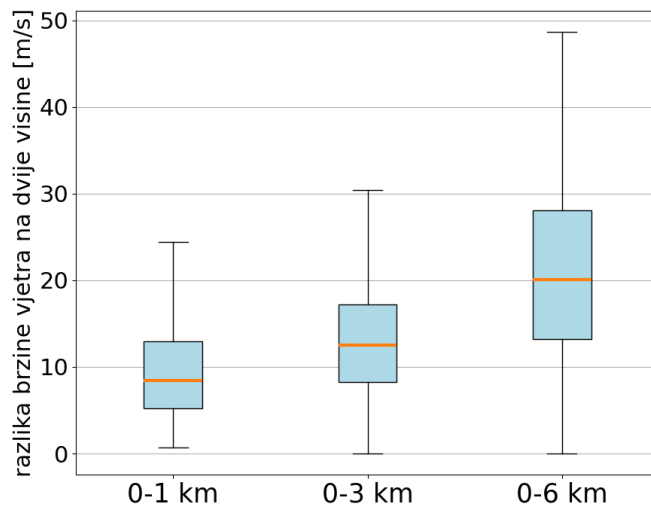
konvekcijom u toplom dijelu godine. Zbog navedenog, najčešće imaju pliću mješovitu fazu u oblaku i manje pothlađenih kapljica, pa sukladno tomu i manju proizvodnju munja te slabiji potencijal za razvoj velike tuče pri tlu. Taszarek i sur. (2017) dobili su veće vrijednosti medijana visine EL-a za razdoblje u toplom dijelu godine, od ožujka do listopada, za različite opasne konvektivne vremenske pojave u Europi. Primjerice za tuču velikih dimenzija medijan EL-a iznosi preko 9000 i 1000 m iznad Zemljine površine, dok za intenzivne grmljavinske oluje s jakim udarima vjetra medijan premašuje vrijednost od 8000 m iznad Zemljine površine.

DCAPE (slika 3.16) je maksimalna energija dostupna česti silazne struje i služi za procjenu potencijalne snage silazne struje popraćene oborinom. Vrijednosti iznad 1000 Jkg^{-1} smatraju se značajnima i impliciraju oštre vertikalne gradijente temperature u niskom sloju koji stvaraju impuls za silazni transport zraka rezultirajući u olujnim, ponekad i orkanskim udarima vjetra. Skoro sve izračunate vrijednosti su daleko manje od



Slika 3.16. Isto kao na slici 3.11, ali za DCAPE.

1000 Jkg^{-1} , što više 75 % vrijednosti ne prelazi prag od 353 Jkg^{-1} . Medijan DCAPE-a iznosi 211 Jkg^{-1} , prvi kvartil 95 Jkg^{-1} . Iz prikazanih rezultata također možemo zaključiti da tijekom hladnog dijela godine na analiziranom području nisu dominantno prisutne oluje s jakim udarima vjetra.



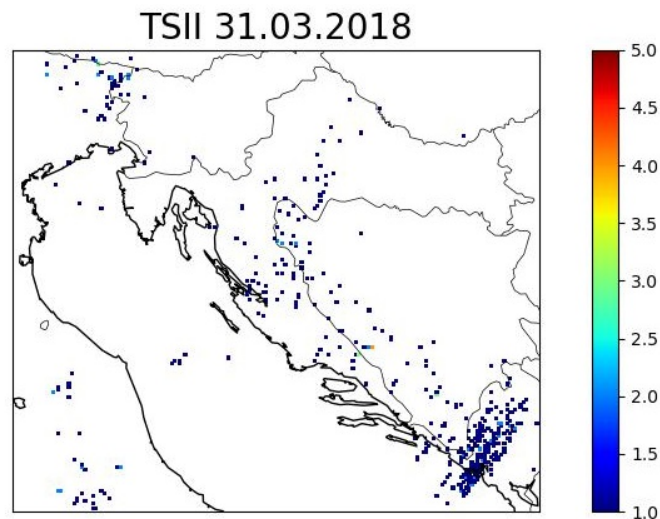
Slika 3.17. Slično kao na slici 3.11, ali za vrijednosti vertikalnog smicanja vjetra u slojevima: 0-1 km, 0-3 km, 0-6 km iznad tla.

Prema kriteriju u Sherburn i Parker (2014), osim prethodno navedenog uvjeta za CAPE, vrijednosti vertikalnog smicanja vjetra u sloju 0-6 km moraju biti veće ili jednake 18 ms^{-1} kako bi se konvektivno termodinamičko okruženje moglo smatrati HSLC okruženjem. Budući da prvi kvartil smicanja vjetra u sloju 0-6 km iznosi 13 ms^{-1} , a medijan 20 ms^{-1} , više od 50 % sondaža je izmjerilo smicanje vjetra veće od 18 ms^{-1} . Od 517 analiziranih radiosondažnih profila, njih 232 (44,87 %) ima odgovarajuće vrijednosti SBCAPE-a, MUCAPE-a i vertikalnog smicanja vjetra u dubokom sloju (0-6 km iznad Zemljine površine). Dakle, skoro polovina radiosondažnih vertikalnih profila analiziranih u ovome radu opisuju HSLC atmosferska okruženja. Također, uobičajeno

je vidljiv zamjetan porast vertikalnog smicanja vjetra s porastom dubine analiziranog atmosferskog sloja zraka. Medijan smicanja u sloju 0-3 km iznad površine tla približno je iste vrijednosti prvog kvartila smicanja 0-1 km ($\sim 12 \text{ ms}^{-1}$), kao što i medijan smicanja 0-6 km odgovara vrijednosti prvog kvartila smicanja u sloju 0-3 km iznad površine tla. Taszarek i sur. (2018a) dobivaju vrijednosti medijana smicanja vjetra u sloju 0-6 km $\sim 15 \text{ ms}^{-1}$ po mjesecima u hladnom dijelu godine. Vrijednosti su niže jer su uključene i sondaže bez konvektivne aktivnosti.

3.4. *Primjer analize konvektivnog dana*

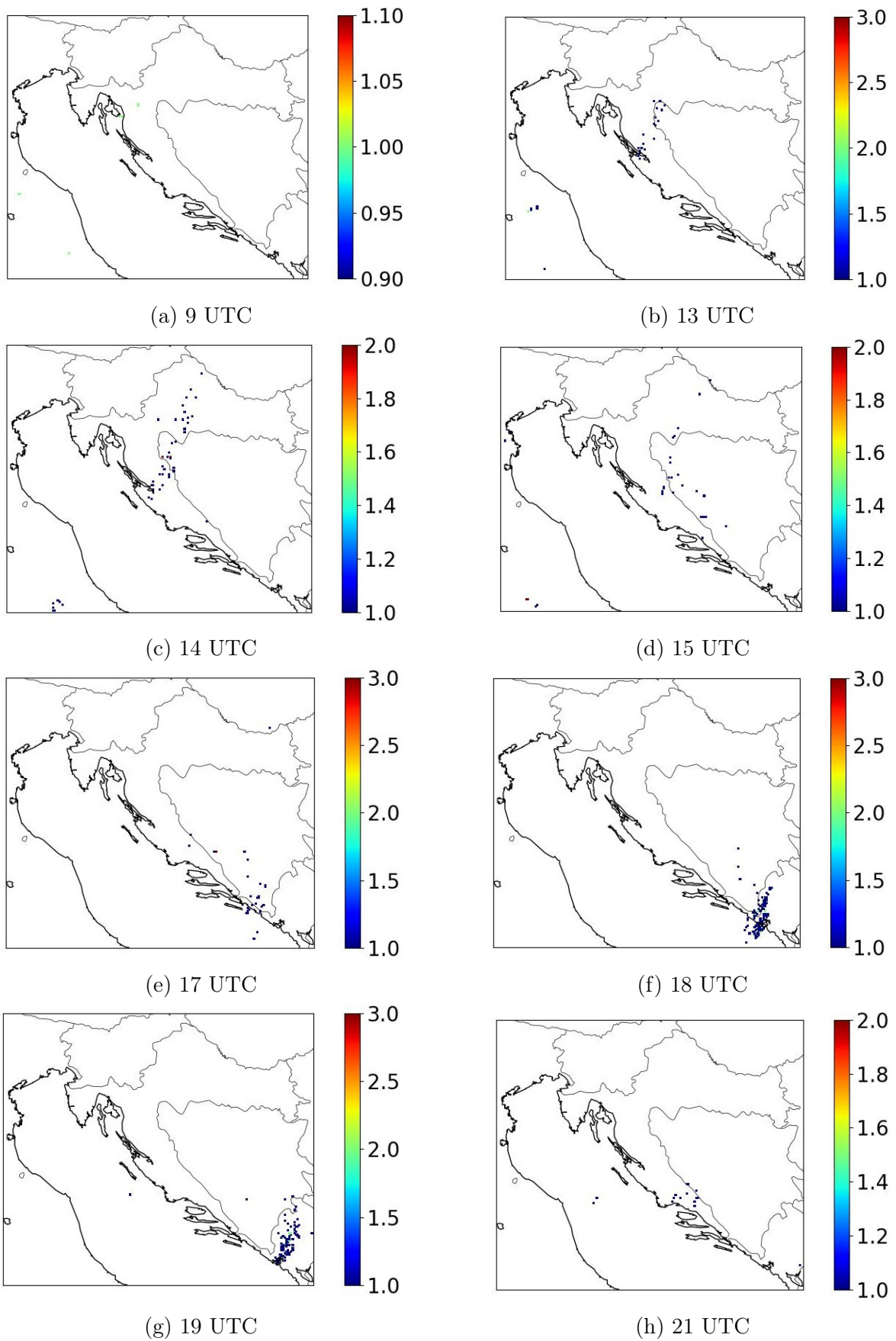
U ovom potpoglavlju odabran je jedan reprezentativan dan s konvekcijom u hladnom dijelu godine kako bi se jasnije prikazala metoda analize konvektivne aktivnosti. Na slici 3.18 prikazani su svi nizovi vrijednosti TSII-a zabilježeni 31. 3. 2018. unutar domene prikazane na slici 2.2b. Od 635 tragova TSII-a zabilježenih taj dan unutar čitave domene, 118 tragova pripada području Hrvatske. Prema podjeli na regije na slici 2.3



Slika 3.18. Prikaz nizova vrijednosti TSII-a na području Hrvatske tijekom dana 31. 3. 2018.

aktivnost munja bila je prisutna u svim regijama osim u osječkoj. Većina kvadratića mreže rezolucije $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ imala je dnevnu sumu vrijednosti TSII-a jednake 1, dok su pojedine sume iznosile i više, ali većinom u susjednim državama (npr. Crnoj Gori). Slika 3.19 pokazuje vremenski razvoj grmljavinske aktivnosti tijekom dana 31. 3. 2018. Početak konvektivne aktivnosti bio je u 9 UTC (slika 3.19a) sa zabilježena četiri niza vrijednosti TSII-a unutar granica Hrvatske. Gibanje konvektivne oluje od središnje Hrvatske prema krajnjem jugu može se pratiti od 13 h po UTC-u (slika 3.19b) do 18 h po UTC-u (slika 3.19f) kada je glavnina vrijednosti TSII-a zabilježena u Crnoj Gori. U terminu 21 h po UTC-u (slika 3.19h) vjerojatno je novi konvektivni sustav uzročnik novih nizova vrijednosti TSII-a te nakon 22 h više nema zabilježene aktivnosti munja u Hrvatskoj.

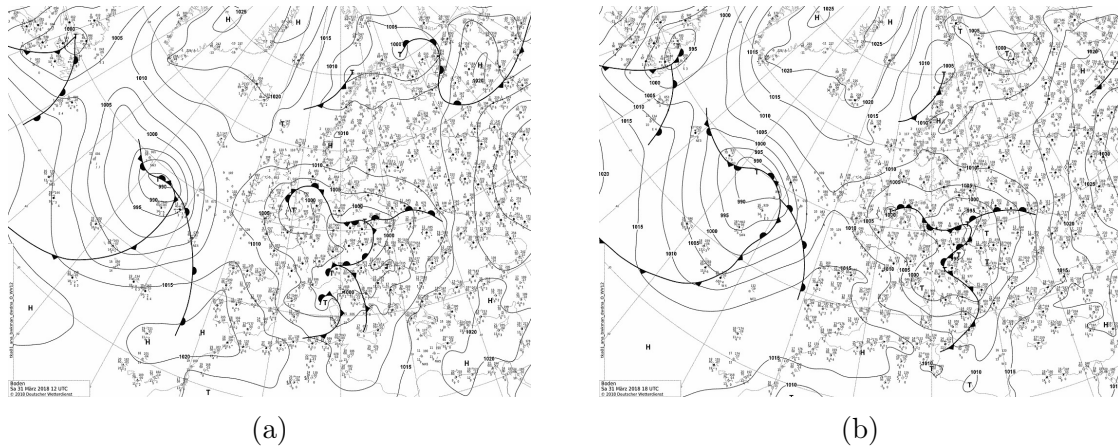
Na slici 3.20 prikazane su prizemne sinoptičke karte u dva uzastopna termina u 12 UTC (slika 3.20a) i 18 UTC (slika 3.20b). Hrvatska, kao i veći dio srednje Europe, nalazila se pod utjecajem polja niskog tlaka zraka s nekoliko centara te s pripadnim



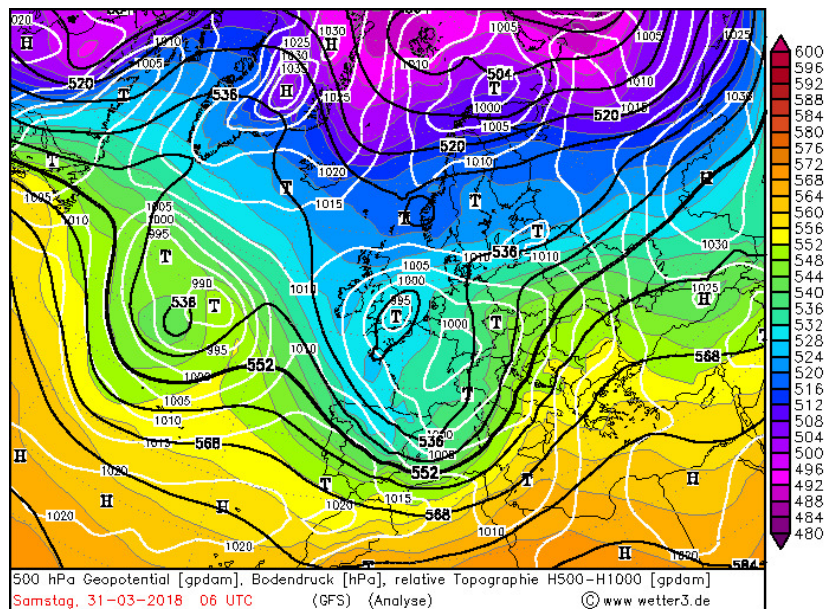
Slika 3.19. Prikaz nizova vrijednosti TSII-a na području Hrvatske tijekom različitih sati u danu 31. 3. 2018.

frontalnim poremećajima. Nad našim područjem dominantni utjecaj imala je hladna fronta koja se u 18 UTC protezala cijelom dužinom Jadranskoga mora. Frontalni poremećaj dio je sustava niskoga tlaka s centrom zapadno od Hrvatske na granici Italije i Francuske koji se postupno premještao prema istoku kontinenta.

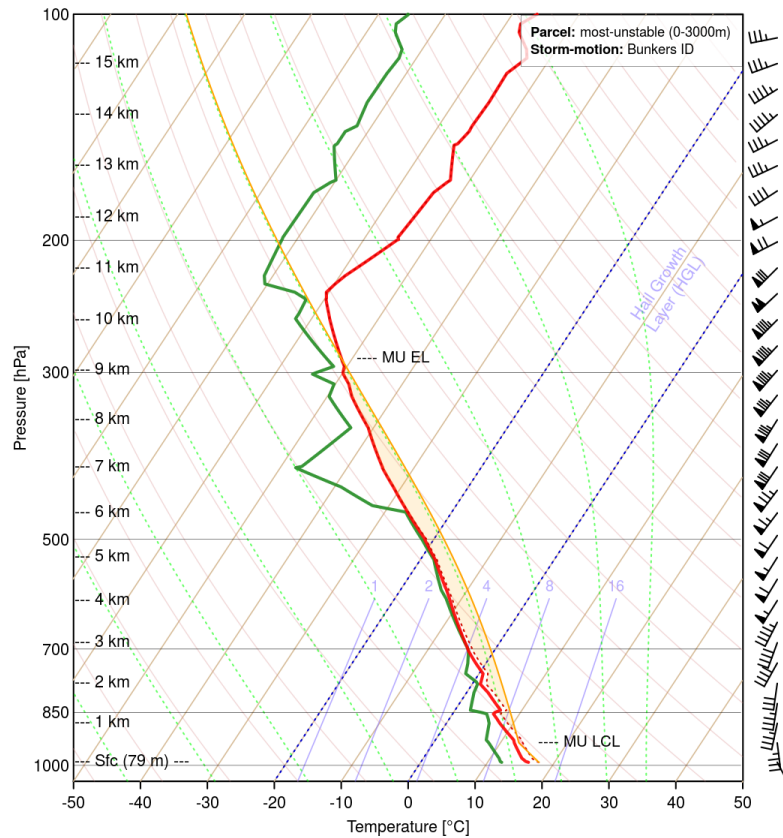
Sustav prizemnog niskoga tlaka povezan je s visinskom ciklonom (engl. *cut-off low*) i izraženom termobaričkom dolinom na 500 hPa plohi prikazanim na slici 3.21. Područje Hrvatske je pod utjecajem prednje strane termobaričke doline te posljedično i jugozapadnog režima strujanja. Topao, vlažan i nestabilan zrak advektira se s jugozapada, točnije Sredozemnog mora te posljedično generira povoljno okruženje za nastanak DMK-a.



Slika 3.20. Prizemna sinoptička situacija 31. 3. 2018. u (a) 12 UTC (b) 18 UTC. Izvor: URL15.



u iznosu većima od 20 ms^{-1} . Vjetar na nivoima iznad 850 hPa značajno ne mijenja smjer, već dolazi do povećanja brzine vjetra do 30 ms^{-1} na 500 hPa te 50 ms^{-1} na 250 hPa. Takav profil ukazuje na iznimno jako smicanje vjetra u donjih 6 km iznad tla koje iznosi $34,3 \text{ ms}^{-1}$ (tablica 3.2). Na visinama između 800 i 450 hPa razlika između temperature zraka i rosišta neznatna je zbog čega dolazi do zasićenja, odnosno stvaranja oblaka. Vrijednosti indeksa nestabilnosti ($\text{CAPE}=768 \text{ Jkg}^{-1}$, $\text{CIN}=-5 \text{ Jkg}^{-1}$), uz razmjerno visoki iznos relativne vlažnosti u graničnom sloju ($> 80 \%$), ukazuju na znatnu nestabilnost atmosfere s povećanom mogućnošću razvoja izrazite konvektivne aktivnosti s razvojem čitavog niza konvektivnih produkata ovisno o području.



Slika 3.22. Radiosondažni profil nad Zadrom u 12 UTC 31. 3. 2018. Izvor: URL18.

Tablica 3.2. Vrijednosti termodinamičkih parametara česti i kinematičkih parametara izračunatih na temelju radiosondažnog mjerenja pomoću *thundeR*-a u Zadru 31. 3. 2018. u 12 UTC.

parametri	31. 3. 2018.
MUCAPE [J/kg]	768
SBCAPE [J/kg]	768
MLCAPE [J/kg]	395
MUCIN [J/kg]	-5
SBCIN [J/kg]	-5
MLCIN [J/kg]	-11
MU LCL [mAGL]	505
SB LCL [mAGL]	505
ML LCL [mAGL]	715
MU LFC [mAGL]	745
SB LFC [mAGL]	745
ML LFC [mAGL]	990
MU EL [mAGL]	9240
SB EL [mAGL]	9240
ML EL [mAGL]	8610
DCAPE [J/kg]	121
BS 0-1 km [m/s]	17,6
BS 0-3 km [m/s]	20,5
BS 0-6 km [m/s]	34,3

4. Zaključak

Cilj ovog rada bio je analizirati i sažeti karakteristike duboke mokre konvekcije u Hrvatskoj u hladnom dijelu godine, od listopada do ožujka. Konvekcija u zimskom dijelu godine nije toliko česta niti intenzivna, ali može predstavljati veliki rizik zbog mogućih opasnih vremenskih pojava. Štoviše, zimska konvekcija nije toliko istražena kao konvekcija u toplom dijelu godine, pogotovo s fokusom na hrvatsko područje. Analizirano je 290 konvektivnih dana od listopada do ožujka tijekom petogodišnjeg razdoblja od 2016. do 2020. godine. Za određivanje dana s konvekcijom korištene su vrijednosti TSII-a na unaprijed definiranoj mreži rezolucije $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$. Definirano je osam regija prema geografskoj podjeli za potrebe izdavanja vremenskih upozorenja DHMZ-a. Kriterij za odabir dana s konvekcijom bio je barem jedan zabilježen niz vrijednosti TSII-a unutar Hrvatske.

Vremenska analiza pokazala je da se prosječno svaki treći dan može očekivati konvektivna aktivnost u Hrvatskoj u hladnom dijelu godine, dok se studeni ističe kao konvektivno najaktivniji mjesec (42 % konvektivnih dana). Dnevni hod konvektivne aktivnosti u zimskom dijelu godine nema izražen maksimum u poslijepodnevnom satima kao u toplom dijelu godine jer dnevno Sunčevo zagrijavanje doseže svoj minimum tijekom hladnih mjeseci. Unutar jednog sata najčešće su bile grmljavinske oluje koje su proizvele manji broj povezanog niza vrijednosti TSII-a, odnosno oluje manjih prostornih razmjera i intenziteta. Konvektivno najaktivnije regije bile su obalne, pri čemu je najaktivnija regija bila splitska (20 % dana s konvekcijom), a najmanje aktivna osječka (2,53 %). Zamijećen je pad učestalosti aktivnosti munja za regije udaljenije od obale. Kontinentalne regije, osim što imaju najmanju učestalost aktivnosti munja, pokazuju manju varijabilnost broja konvektivnih dana po godini u odnosu na regije bliže Jadranskome moru. Također, kontinentalne regije nemaju toliko izražen godišnji hod poput obalnih. Obalne regije imaju veću konvektivnu aktivnost tijekom zadnjeg tromjesečja u kalendarskoj godini u usporedbi s prva tri mjeseca tijekom godine u analiziranom razdoblju, dok je broj dana po mjesecima u kontinentalnim podjednak.

Analiza prizemne sinoptičke situacije tijekom konvektivnih dana pokazuje da sinoptičko forsiranje i modificiranje mezoskalnih uvjeta ima značajno veću ulogu nego u toplom dijelu godine, jer se tijekom 60 % dana nad područjem Hrvatske premještala neka vrsta frontalnog poremećaja. Najviše dana s pojavom frontalnih poremećaja detektirano je u studenom. Relativna učestalost pojava hladne i tople fronte podjednaka je te se nije mogla primjetiti neka određena pravilnost pojave frontalnih poremećaja promatrajući njihove mjesečne apsolutne učestalosti. Najdominantniji režim visinskog strujanja je jugozapadno, koje je najčešće posljedica razvijene visinske ciklone ili termobaričke doline s centrom zapadno ili sjeverozapadno od Hrvatske. Dodatno, pokazalo se da je uzrok zimske konvektivne aktivnosti posljedično povezan i s formiranjem osi doline i južnog strujanja. Učestalost je ipak bila dvostruko manja.

Analiza konvektivnih parametara pokazala je da su vrijednosti CAPE-a relativno niske, ali više u odnosu na vrijednosti u srednjoj Europi. Također su vrijednosti LCL-a poprilično niske što znači da je došlo do razvoja konvektivnih ćelija s niskom bazom. Konačno, mezoskalna analiza pokazuje da je atmosfersko okruženje u kojima nastaju grmljavinske oluje u hladnom dijelu godine u Hrvatskoj dominantno HSLC okruženje. Skoro polovina (44,87 %) analiziranih radiosondažnih profila prati kriterij naveden u

Sherburn i Parker (2014). Dobivena vrijednost medijana MUCAPE-a u ovome radu iznosi 208 Jkg^{-1} , a medijan vertikalnog smicanja vjetra u sloju 0-6 km 20 ms^{-1} . Buduća potencijalna analiza ostalih konvektivnih produkata (primjerice tuče, oluja s jakim udarima vjetra) i razvoj alata za praćenje konvektivnih sustava na području Hrvatske i/ili širem području mogla bi dati detaljnije odgovore o konvektivnoj aktivnosti u hladnom dijelu godine.

Literatura

- Alpert, P., Neeman, B., i Shay-El, Y. (1990). Intermonthly variability of cyclone tracks in the Mediterranean. *Journal of Climate*, 3(12), 1474–1478.
- Beebe, R. (1958). Tornado proximity soundings. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 39(4), 195–201.
- Betz, H. D., Schmidt, K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W. P., Defer, E., Dziewit, Z., i Konarski, J. (2009a). LINET—An international lightning detection network in Europe. *Atmospheric Research*, 91, 564–573.
- Betz, H. D., Schumann, U., i Laroche, P. (2009b). *Lightning: Principles, Instruments and Applications*, (pp. 1, 59–60, 448). Springer.
- Blašković, L., Jelić, D., Malečić, B., Omazić, B., Güttler, I., i Telišman Prtenjak, M. (2023). Trend analysis and climatology of hail in Croatia. *Atmospheric Research*, 294.
- Brooks, H. E., Doswell III, C. A., Zhang, X., Chernokulsky, A. A., Tochimoto, E., Hanstrum, B., de Lima Nascimento, E., Sills, D. M., Antonescu, B., i Barrett, B. (2019). A century of progress in severe convective storm research and forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 59(1), 18.1–18.41.
- Burke, P. C., i Schultz, D. M. (2004). A 4-yr climatology of cold-season bow echoes over the continental United States. *Weather and Forecasting*, 19(6), 1061–1074.
- Celiński-Mysław, D., Palarz, A., i Taszarek, M. (2020). Climatology and atmospheric conditions associated with cool season bow echo storms in Poland. *Atmospheric Research*, 240.
- Doswell III, C. A., Brooks, H. E., i Maddox, R. A. (1996). Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Weather and Forecasting*, 11(4), 560–581.
- Dotzek, N. (2001). Tornadoes in Germany. *Atmospheric research*, 56(1-4), 233–251.
- Dotzek, N. (2003). An updated estimate of tornado occurrence in Europe. *Atmospheric research*, 67-68, 153–161.
- Gelo, B., i sur. (2005). *Meteorološki pojmovnik i višejezični rječnik : hrvatski, engleski, njemački i francuski jezik*, (p. 655). DHMZ, HINUS.
- Grisogono, B., Večenaj, Ž., i Belušić, D. (2009). Uvod u mezoskalnu meteorologiju i atmosfersku turbulenciju. (p. 148). Dostupno na: www.gfz.hr/osobne_stranice/grisogono/DM2i3_SKRIPTA.pdf, Zadnja verzija: 24. 2. 2022.
- Groenemeijer, P., i Kühne, T. (2014). A climatology of tornadoes in Europe: Results from the European Severe Weather Database. *Monthly Weather Review*, 142(12), 4775–4790.
- Guyer, J. L., i Dean, A. R. (2010). Tornadoes within weak CAPE environments across the continental United States. *25th Conf. on Severe Local Storms, American Meteorological Society*.

- Horvath, K., Lin, Y.-L., i Ivančan-Picek, B. (2008). Classification of cyclone tracks over Apennines and the Adriatic Sea. *Monthly Weather Review*, 136(6), 2210–2227.
- Höller, H., Betz, H. D., Schmidt, K., Calheiros, R. V., May, P., Houngrinou, E., i Scialom, G. (2009). Lightning characteristics observed by a VLF/LF lightning detection network (LINET) in Brazil, Australia, Africa and Germany. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(20), 7795–7824.
- Jelić, D. (2022). *Obilježja tuče u sadašnjim i budućim klimatskim uvjetima na području Hrvatske*. Doktorski rad, str. 122, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- Jelić, D., Telišman Prtenjak, M., Malečić, B., Belušić Vozila, A., Megyeri, O. A., i Renko, T. (2021). A new approach for the analysis of deep convective events: Thunderstorm Intensity Index. *Atmosphere*, 12(7).
- Johns, R. H., i Doswell III, C. A. (1992). Severe local storms forecasting. *Weather Forecasting*, 7(4), 588–612.
- Kolendowicz, L., Taszarek, M., i Czernecki, B. (2017). Atmospheric circulation and sounding-derived parameters associated with thunderstorm occurrence in Central Europe. *Atmospheric Research*, 191, 101–114.
- Kuchera, E., i Parker, M. (2006). Severe convective wind environments. *Weather Forecasting*, 21(4), 595–612.
- Kunz, M. (2007). The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (7), 327–342.
- Main, M. E., Lazear, R. A., i Bosart, L. F. (2010). Differences between high shear / low CAPE environments in the Northeast US favoring straight-line damaging winds versus tornadoes. *25th Conf. on Severe Local Storms, American Meteorological Society*.
- Markowski, P., i Richardson, Y. (2010). *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*, (pp. 206–215). Wiley-Blackwell.
- Mathias, L., Ludwig, P., i Pinto, J. (2019). Synoptic-scale conditions and convection-resolving hindcast experiments of a cold-season derecho on 3 January 2014 in western Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(5), 1023–1040.
- Mikuš, P. (2017). *Satelitske karakteristike i grmljavinska aktivnost intenzivnih konvektivnih oluja*. str. 137, doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- Mikuš, P., Telišman Prtenjak, M., i Strelec Mahović, N. (2012). Analysis of the convective activity and its synoptic background over Croatia. *Atmospheric Research*, 104-105, 139–153.
- Mikuš, P., i Strelec Mahović, N. (2013). Satellite-based overshooting top detection methods and an analysis of correlated weather conditions. *Atmospheric Research*, 123, 268–280.

- Pacey, G. P., Schultz, D. M., i Garcia-Carreras, L. (2021). Severe convective windstorms in Europe: Climatology, preconvective environments, and convective mode. *Weather and Forecasting*, 36(1), 237–252.
- Penzar, B., Penzar, I., i Orlić, M. (2001). *Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana*, (p. 258). Nakladna kuća « Dr. Feletar» , Hrvatski hidrografski institut Split, Zagreb.
- Piper, D. A., Kunz, M., Allen, J. T., i Mohr, S. (2019). Investigation of the temporal variability of thunderstorms in central and western Europe and the relation to large-scale flow and teleconnection patterns. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(725), 3644–3666.
- Plant, R. S., i Yano, J.-I. (2016). *Parameterization of atmospheric convection. Volume I: Theoretical Background and Formulation*, (pp. 11–22). Imperial College, Engleska.
- Púčík, T., Groenemeijer, P., Rýva, D., i Kolář, M. (2015). Proximity soundings of severe and nonsevere thunderstorm in Central Europe. *Monthly Weather Review*, 143(12), 4805–4821.
- Púčík, T., Castellano, C., Groenemeijer, P., Kühne, T., Rädler, A. T., Antonescu, B., i Faust, E. (2019). Large hail incidence and its economic and societal impacts across Europe. *Monthly Weather Review*, 147(11), 3901–3916.
- Rasmussen, E. N., i Blanchard, D. O. (1998). A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Weather and Forecasting*, 13(4), 1148–1164.
- Renko, T. (2018). *Pijavice na Jadranu: učestalost, karakteristike, uvjeti nastanka i mogućnost prognoziranja*. str. 118, doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
- Renko, T., Kuzmić, J., Šoljan, V., i Strelec Mahović, N. (2016). Waterspouts in the Eastern Adriatic from 2001 to 2013. *Natural Hazards*, 82, 441–470.
- Riemann-Campe, K., Fraedrich, K., i Lunkeit, F. (2009). Global climatology of Convective Available Potential Energy (CAPE) and Convective Inhibition (CIN) in ERA-40 reanalysis. *Atmospheric Research*, 93(1-3), 534–545.
- Rosenfeld, D., i Lensky, I. M. (1998). Satellite-based insights into precipitation formation processes in continental and maritime convective clouds. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(11), 2457–2476.
- Schultz, C. J., Petersen, W. A., i Carey, L. D. (2009). Preliminary development and evaluation of lightning jump algorithms for the real-time detection of severe weather. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(12), 2543–2563.
- Sherburn, K. D., i Parker, M. D. (2014). Climatology and ingredients of significant severe convection in high-shear, low-CAPE environments. *Weather and Forecasting*, 29(4), 854–877.
- Stull, R. (2015). *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science*. 481-533: University of British Columbia, Kanada.

- Taszarek, M., Brooks, H. E., i Czernecki, B. (2017). Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe. *Monthly Weather Review*, 145(4), 1511–1528.
- Taszarek, M., Brooks, H. E., Czernecki, B., Szuster, P., i Fortuniak, K. (2018a). Climatological aspects of convective parameters over Europe: A comparison of ERA-interim and sounding data. *Journal of Climate*, 31(11), 4281–4308.
- Taszarek, M., Allen, J. T., Groenemeijer, P., Edwards, R., Brooks, H. E., Chmielewski, V., i Enno, S.-E. (2018b). Severe convective storms across Europe and the United States. Part I: Climatology of lightning, large hail, severe wind, and tornadoes. *Journal of Climate*, 33(23), 10239–10261.
- Taszarek, M., Allen, J. T., Marchio, M., i Brooks, H. E. (2021). Global climatology and trends in convective environments from ERA5 and rawinsonde data. *npj Climate and Atmospheric Science*, 35(4), 4775–4790.
- Taszarek, M., Czernecki, B., i Szuster, P. (2023). thundeR - a rawinsonde package for processing convective parameters and visualizing atmospheric profiles, poster. *11th European Conference on Severe Storms in Bucharest, Romania*,.
- URL01 (2020). Metoffice. <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/how-weather-works/what-is-convection>.
- URL02 (2021). WMO. <https://cloudatlas.wmo.int/en/species-cumulonimbus-calvus-cb-cal.html>.
- URL03 (2021). WMO. <https://cloudatlas.wmo.int/en/species-cumulonimbus-capillatus-cb-cap.html>.
- URL04 (2020). WMO. <https://cloudatlas.wmo.int/en/cumulonimbus-cb.html>.
- URL05 (2021). PennState. https://www.e-education.psu.edu/meteo3/19_p9.html.
- URL06 (2012). NSSL. https://www.e-education.psu.edu/meteo3/19_p9.html.
- URL07 (2023). Facebook. <https://web.facebook.com/photo/?fbid=699380215557086&set=pcb.699382082223566>.
- URL08 (2012). NSSL. <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/lightning>.
- URL09 (2023). Munich RE. <https://www.munichre.com/en/risks/natural-disasters/thunderstorms-hail-tornados.html>.
- URL10 (2022). Britannica. <https://www.britannica.com/story/why-does-the-united-states-have-more-tornadoes-than-any-other-country>.
- URL11 (2023). EUMeTrain. <https://eumetrain.org/index.php/resources/deep-moist-convection-winter>.
- URL12 (2023). Hrvatska enciklopedija. <https://www.enciklopedija.hr/clanak/26390>.

- URL13 (2011). Wikipedia. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Croatia_in_Europe.svg.
- URL14 (2018). DHMZ. <https://meteo.hr/naslovnica-upozorenja.php?tab=upozorenja>.
- URL15 (2018). DWD. https://www.wetter3.de/index_en.html.
- URL16 (2020). Marineregions. <https://marineregions.org/gazetteer.php?p=details&id=2160>.
- URL17 (2021). thundeR. http://rawinsonde.com/thunder_app/.
- URL18 (2021). Github. https://bczernecki.github.io/thundeR/articles/gets_tarted.html.
- Wilks, D. S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, (pp. 559–560). 2nd ed. International Geophysics Series, Vol. 100, Academic Press.
- Williams, E., Boldi, B., Matlin, A., Weber, M., Hodanish, S., Sharp, D., Goodman, S., Raghavan, R., i Buechler, D. (1999). The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms. *Atmospheric Research*, 51(3-4), 245–265.