Dijagnostika i analiza konvektivnih procesa nad južnom Europom u hladnom dijelu godine

Korotaj, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:464832

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Ivan Korotaj

DIJAGNOSTIKA I ANALIZA KONVEKTIVNIH PROCESA NAD JUŽNOM EUROPOM U HLADNOM DIJELU GODINE

Diplomski rad

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOGRAFIJA

Ivan Korotaj

Diplomski rad

DIJAGNOSTIKA I ANALIZA KONVEKTIVNIH PROCESA NAD JUŽNOM EUROPOM U HLADNOM DIJELU GODINE

Voditeljica diplomskog rada: doc. dr. sc. Nataša Strelec Mahović

Zagreb, 2019.

Vrlo sam zahvalan svojoj mentorici doc. dr. sc. Nataši Strelec Mahović na velikoj pomoći, uloženom trudu i vremenu te korisnim savjetima pri pisanju diplomskog rada.

Posebno sam zahvalan dr. sc. Petri Mikuš Jurković koja me od početka vodila kroz istraživanje i čija pomoć mi je bitno olakšala rad.

Zahvaljujem dipl. ing. Vinku Šoljanu na pomoći pri odabiru teme rada te obradi podataka radiosondažnih mjerenja.

Hvala Otíliji Anni Megyeri na pomoći pri pronalaženju znanstvenih radova i bezuvjetnoj podršci.

Hvala mojoj obitelji na velikoj potpori bez koje moje viskoškolsko obrazovanje ne bi bilo moguće.

Sažetak

U radu su analizirane konvektivne oluje nad područjem južne Europe u hladnom dijelu godine. Temeljem dojava o nevremenu iz Europske baze opasnih oluja (ESWD) izdvojeni su slučajevi nevremena s tučom i jakom kišom, a nakon analize podataka o električnom pražnjenju za daljnju analizu je odabrano ukupno 66 slučajeva. Cilj rada bio je analizirati sinoptičke i termodinamičke uvjete u kojima se konvektivni sustavi razvijaju u zimskim mjesecima s posebnim osvrtom na oluje koje se razvijaju u uvjetima jakog smicanja i male konvektivne raspoložive potencijalne energije (HSLC - od engl. High Shear - Low CAPE). Takve oluje pokazale su se iznimno zahtjevnima za prognoziranje, a dosadašnja istraživanja uglavnom su se odnosila na SAD.

Zbog relativno skromne zastupljenosti konvektivnih procesa nad južnom Europom u hladnom dijelu godine u znanstvenim publikacijama, posebice za područje Hrvatske, u ovom je radu napravljena analiza termodinamičkih parametara kao i sinoptičkih uvjeta odnosno režima strujanja na 500 hPa za odabranih 50 oluja s intenzivnom kišnom oborinom i 16 oluja praćenih tučom. Među tim olujama, 19 njih bilo je HSLC tipa. Za te slučajeve analiza je proširena s dva dodatna parametra, SHERBE i SHERBS3, koji su po prvi puta izračunati za područje južne Europe. Oni služe za procjenu hazarda oluje u slučaju razvoja konvekcije u HSLC uvjetima.

Rezultati pokazuju da je konvektivna raspoloživa potencijalna energija (CAPE) oluja u hladnom dijelu godine bitno manja u odnosu na oluje u toplom dijelu godine. To je očekivano s obzirom na to da je Sunčevo zračenje bitno manje zimi. Nadalje, CAPE je veći u južnoj Europi nego u središnjoj u istom periodu vjerojatno zbog utjecaja mora i veće insolacije. U promatranim slučajevima na 500 hPa najčešće je bilo prisutno jugozapadno strujanje.

Vrijednosti K-indeksa govore da je to dobar pokazatelj nestabilnosti atmosfere u promatranim situacijama. Također, prve analize SHERBE i SHERBS3 nad južnom Europom ukazuju na dobro slaganje s vrijednostima dobivenim za područje SAD-a. Ovi parametri ne mogu biti jedini kriterij u prognoziranju konvektivnog razvoja, ali mogu poslužiti kao indikator nestabilnosti.

Sadržaj

1 Uvod **1**

1.1 Duboka konvekcija u atmosferi 1

1.2 Parametri važni za termodinamiku duboke konvekcije 5

1.3 Tipovi konvektivnih oluja i njihov razvoj 7

1.4 Oluje s jakim smicanjem i malim vrijednostima CAPE-a (HSLC) 8

2 Podaci i metode **11**

2.1 Baza olujnih događaja 11

2.2 Zapisi o munjama 12

2.3 Podaci radiosondažnih mjerenja 13

2.4 Visinske i prizemne sinoptičke karte 16

3 Rezultati **19**

3.1 Termodinamički parametri 19

3.2 Analiza visinske i prizemne sinoptičke situacije 26

3.3 Oluje tipa HSLC 29

4 Primjeri analize **34**

4.1 Prvi slučaj: 17.11.2014. 34

4.2 Drugi slučaj: 7.3.2018. 36

5 Zaključak **41**

Literatura **43**

1 Uvod

Duboka konvekcija je turbulentan, nelinearan, trodimenzionalan, nehidrostatički proces pod kojim se u meteorologiji podrazumijeva pojačano vertikalno gibanje i miješanje fluida (Grisogono i Belušić, 2015). Zbog iznimne kompleksnosti procesa i nelinearnosti, ovaj fenomen i dalje predstavlja veliki izazov za prognoziranje (Markowski i Richardson, 2010). I dok su konvektivni procesi nad širim područjem Hrvatske u toplom dijelu godine relativno dobro obrađeni u domaćim i stranim publikacijama, oni u hladnom dijelu godine skromno su proučeni u znanstvenim radovima. No, poznato je da zimska konvekcija nije rijetka pojava, pogotovo na Jadranu. Nadalje, za isto područje ne postoji sustavna analiza konvektivnih oluja s velikim vrijednostima smicanja i malom termičkom nestabilnošću. Takve oluje pokazale su se iznimno zahtjevnima za prognoziranje pa je posljednjih godina njihova analiza i modeliranje vrlo aktualno u mezoskalnoj meteorologiji (Sherburn i Parker, 2016). Sve navedeno bilo je motivacija za ovaj rad koji sadrži analizu konvektivnih procesa nad južnom Europom u hladnom dijelu godine.

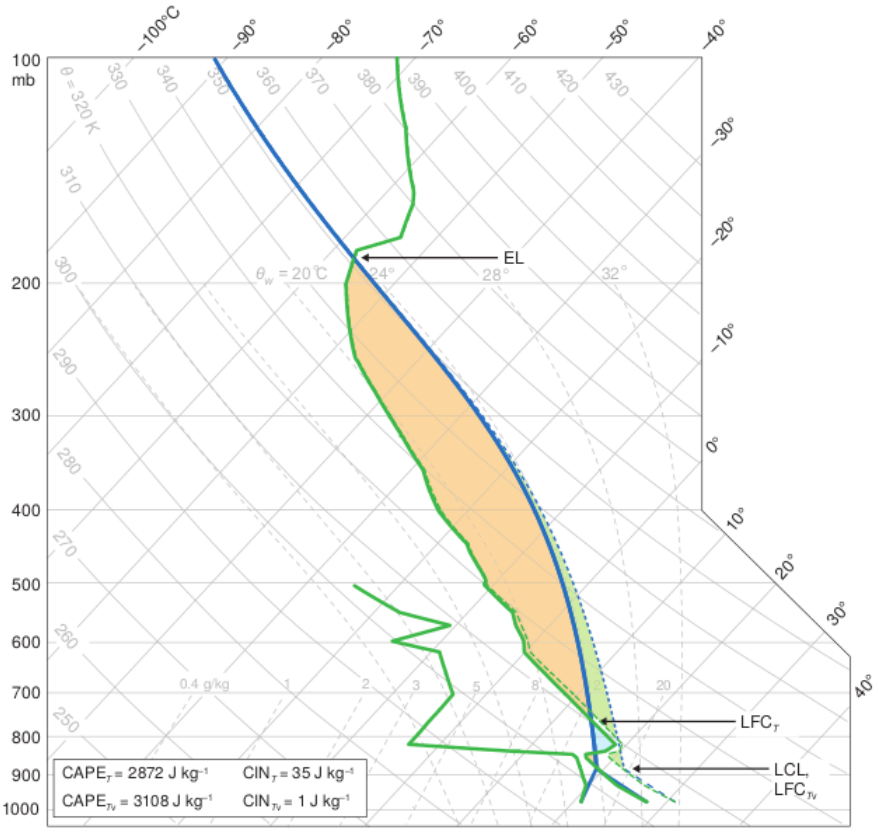
1.1 Duboka konvekcija u atmosferi

Za pojavu duboke konvekcije u atmosferi, općenito su potrebna tri uvjeta (Doswell i sur., 1996):

1. nestabilan zrak ili izvor nestabilnosti
2. vlaga
3. mehanizam podizanja

Čest čija je relativna vlažnost manja od 100% u statički stabilnoj atmosferi, u kojoj potencijalna temperatura s visinom raste ($\partial\theta/\partial z > 0$), može biti prisiljena na gibanje nekim vanjskim forsiranjem. Ako je to forsiranje dovoljno intenzivno, čest će se podizati dok ne dosegne nivo kondenzacije (LCL). Daljnje podizanje uzrokovat će kondenzaciju i oslobađanje latentne topline. Mehanizmi koji mogu biti uzrokom intenzivnom podizanju česti su primjerice orografija, frontalni sustavi, obalna cirkulacija (Pandžić, 2002). Na određenoj visini čest će postati lakša od okolnog zraka te će se dalje nastaviti gibati uvis zbog uzgona. Visina na kojoj se to događa naziva se

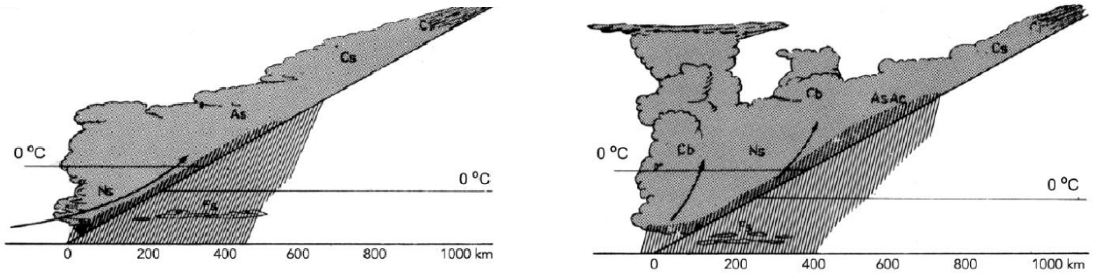
nivo slobodne konvekcije (LFC). Daljnje gibanje nastavlja se do ravnotežnog nivoa (EL) (Holton, 2004). Navedeni nivoi prikazani su na slici (1.1).



Slika 1.1: Skew T – log p dijagram radiosondaže u Del Riu 14. svibnja 2008. u 18:00 UTC. CAPE je osjenčan svjetlo narančasto, a CIN svjetlo plavom. Izvor: Markowski i Richardson, 2010

U slučajevima nekih konvektivnih oluja gibanje se zbog iznimno jake uzlazne struje u oblaku može nastaviti i iznad ravnotežnog nivoa, što se manifestira kao „overshooting top" odnosno premašujući vrh konvektivnog oblaka (Mikuš i Strelec Mahović, 2013). Mehanizam podizanja koji je potreban kako bi se čest zraka podigla do nivoa slobodne konvekcije može biti vezan uz podizanje zraka zbog orografske prepreke, uz konvergenciju u površinskom ili prizemnom sloju zraka (primjerice u području hladne, tople ili stacionarne fronte, linije konvergencije vjetra, suhe linije, fronte obalne cirkulacije ili na „outflow boundary" prethodnog konvektivog sustava), a moguća je i konvekcija uslijed uzdignutog mehanizma podizanja kao primjerice u toplom zraku iznad tople fronte ili prizemne inverzije (Doswell i sur., 1996). Navedeni mehanizmi su različito zastupljeni ovisno o geografskom području i dijelu godine. Mehanizam podizanja često je dizanje zraka duž frontalne zone kod kojeg je topli zrak koji nailazi na sloj hladnog zraka prisiljen podizati se pri čemu u slučaju

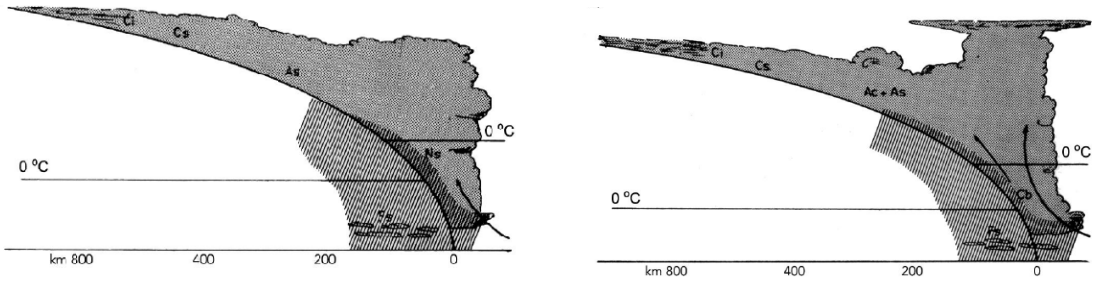
hidrostatički nestabilnog zraka može doći do razvoja konvektivnih oblaka. Shematski je to prikazano na slici (1.2).



(a) Stabilna topla fronta *(b) Nestabilna topla fronta*

Slika 1.2: Razvoj naoblake i gibanja u toploj fronti (Devuyst, 1972)

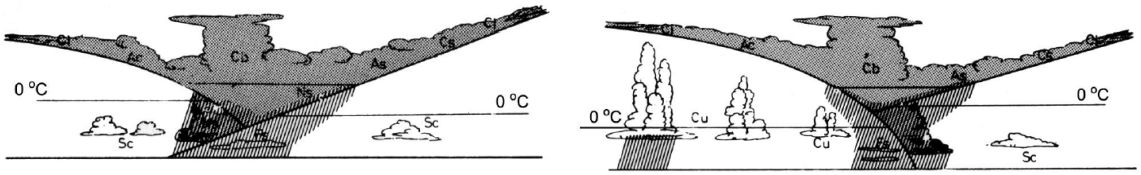
U slučaju hladne fronte hladni se zrak giba prema toplom stoga do podizanja toplog zraka dolazi ispred fronte. Postoje dva tipa hladne fronte. Fronta prvog reda je sporija, a oblaci koji se javljaju su slojeviti te smješteni iza nje. Ako je topli zrak nestabilan, može doći do razvoja intenzivnije konvekcije. Fronte drugog reda su brže, a javljaju se u područjima velikih horizontalnih gradijenata tlaka. Tamo su, dakle, brzine njenog premještanja velike. U tom slučaju javlja se intenzivna konvekcija ispred fronte. Razvoj oblaka prikazan je na slici (1.3).



(a) Hladna fronta prvog reda *(b) Hladna fronta drugog reda*

Slika 1.3: Razvoj naoblake i gibanja u hladnoj fronti (Devuyst, 1972)

Okludirana fronta je sustav sastavljen od hladne i tople fronte. Postoje okluzije tipa hladne i tople fronte. Hladni tip češći je ljeti, a topli zimi. Oborine kod fronti okluzije su slabije nego kod prije opisanih. Oblačni sustav dan je na slici (1.4).



(a) Okluzija tipa tople fronte *(b) Okluzija tipa hladne fronte*

Slika 1.4: Razvoj naoblake i gibanja u fronti okluzije (Devuyst, 1972)

Orografija također može biti okidač za razvoj duboke konvekcije. Tri su načina na koje orografija može pokrenuti konvektivni razvoj: direktno podizanje zraka zbog čvrste prepreke, termalna cirkulacija te aerodinamički efekt prepreke. Prvi mehanizam temelji se na blokiranju horizontalnog strujanja zraka koji je naišao na orografsku prepreku. Zbog forsiranja, prisiljen je gibati se uvis. O vlažnosti i intenztetu forsiranja ovisit će oborinski režim i druge posljedice takve konvekcije. Termalna cirkulacija odnosi se na topli sloj zraka uz prepreku do čijeg stvaranja može doći u određenim okolnostima kao na primjer vedro i mirno vrijeme bez izraženog turbulentnog miješanja tijekom dana u toplom dijelu godine. Posljedično se javljaju gradijenti tlaka te strujanje prema obronku što u konačnici rezultira uzlaznim strujanjem. Aerodinamički efekt odnosi se na strujanja oko planine uslijed nemogućnosti fluida da u potpunosti prijeđe preko nje. Pri tom dolazi do navjetrenog blokiranja, težinskih valova, turbulencije u zavjetrini, zavjetrinske konvergencije. Usporavanje struje može izazvati navjetrenu konvekciju. Ako zračna masa nailazi na prepreku pod malim kutom, na navjetrinskoj strani dolazi do konvergencije, a na zavjetrinskoj do divergencije. Ovdje se misli na stanje u horizontalnoj ravnini. Za veliki kut situacija je obratna (Pandžić, 2002).

Do razvoja konvektivih oblaka dolazi i u područjima prizemne konvergencije strujanja, primjerice uslijed obalne cirkulacije. Tada je dizanje toplijeg zraka nad kopnom uvjetovano interakcijom s hladnijim zrakom nad morem. Kod nas je takva konvekcija česta, primjerice, u Istri gdje zbog utjecaja zmorca često dolazi do razvoja duboke mokre konvekcije (Poljak i sur., 2014).

Iako nije nužno, konvektivni sustavi često su praćeni grmljavinom. Dovoljan uvjet za detekciju konvekcije jest upravo grmljavina.

1.2 Parametri važni za termodinamiku duboke konvekcije

U meteorologiji se često koriste parametri čije numeričke vrijednosti sažimaju stanje atmosfere. Oni nisu univerzalni alati u kojima su sadržane sve informacije u nekom trenutku, već su izračunati pomoću nekih izmjerenih fizikalnih veličina (npr. temperatura i vlaga na određenoj visini). Svaki parametar ima određena ograničenja i ne može se primijeniti u svim uvjetima nad svakim područjem. Fizikalna interpretacija pojedinog parametra ovisi o ukupnom stanju atmosfere. Tako primjerice neki parametar može ukazivati na nestabilnost atmosfere, ali to ne znači da će nužno doći do razvoja duboke mokre konvekcije ako nisu zadovoljeni svi uvjeti za to. U ovom radu opisani su parametri koji govore o nestabilnosti atmosfere.

Konvektivna raspoloživa potencijalna energija (CAPE) je mjera najveće moguće kinetičke energije po jedinici mase koju statički nestabilna čest može postići (zanemarujući efekte vodene pare i kondenzirane vode na uzgon) pod pretpostavkom da se čest uzdiže bez miješanja s okolinom i trenutno se prilagođava okolnom tlaku (Holton, 2004). To je mjera tendencije atmosfere ka dubokoj konvekciji. Matematički je formulirana relacijom:

$$\mathrm{CAPE} = \int_{z_{\mathrm{LFC}}}^{z_{\mathrm{EL}}} g \left(\frac{T_{\mathrm{v,cest}} - T_{\mathrm{v,okolina}}}{T_{\mathrm{v,okolina}}} \right) \mathrm{d}z = \frac{w_{\max}}{2} \,,$$

pri čemu su z_{LFC} i z_{EL} visine LFC-a i EL-a, $T_{\mathrm{v,cest}}$ virtualna temperatura česti, $T_{\mathrm{v,okolina}}$ virtualna temperatura okoline, $w_{\max}$ najveća moguća vertikalna brzina česti. Virtualna temperatura je ona temperatura koju suhi zrak mora imati da bi bio iste gustoće kao i vlažni zrak pri istom tlaku. CAPE čije su vrijednosti u olujama manje od 1000 J/kg uobičajeno se smatra niskim dok one veće od 2500 J/kg visokima (Markowski i Richardson, 2010). Na slici (1.1) dan je grafički prikaz CAPE-a u skew T – log p dijagramu. Postoji nekoliko modifikacija odnosno načina računanja CAPE-a. „Surface-Based" CAPE (SBCAPE) odnosi se na čest koja se podiže s površine prema LFC-u. „Most unstable" CAPE (MUCAPE) je mjera za potencijalnu energiju najnestabilnije česti atmosfere u najnižih 300 hPa prilikom podizanja do LFC-a. „Mixed Layer" CAPE (MLCAPE) jednak je srednjoj raspoloživoj potencijalnoj energiji česti u dobro izmiješanom sloju atmosfere u najnižih 100 hPa (Bunkers i sur., 2002).

Ako je prizemni sloj atmosfere statički stabilan (odnosno stabilno stratificiran), za podizanje česti potrebno je uložiti rad jer se atmosfera opire uzgonu. Konvektivna

inhibicija (CIN) je jednaka radu kojeg je potrebno uložiti za svladavanje stabilne stratifikacije atmosfere pri podizanju česti od površine do LFC-a. To je dakle fizikalna veličina koja mjeri opiranje atmosfere pojavi konvekcije. Matematička formula glasi:

$$\mathrm{CIN} = -\int_0^{z_{\mathrm{LFC}}} g\left(\frac{T_{\mathrm{v,cest}} - T_{\mathrm{v,okolina}}}{T_{\mathrm{v,okolina}}}\right)\mathrm{d}z$$

Apsolutne vrijednosti CIN-a manje od 10 J/kg se uobičajeno smatraju malima, dok one veće od 50 J/kg velikima (Markowski i Richardson, 2010). Geometrijska interpretacija CIN-a prikazana je na slici (1.1). Slično kao za CAPE, i za CIN postoje modifikacije. U ovom radu bit će korišten samo „Surface-Based" CIN (SBCIN) koji se odnosi na čest koja se podiže s površine.

„Low-Level Lapse Rates" (LLLR) je parametar koji govori kako se temperatura mijenja s visinom u nižim slojevima atmosfere. Konkretno, radi se o temperaturnom gradijentu u prva 3 km. Atmosfera je to nestabilnija što je brže opadanje temperature s visinom. Vrijednosti manje od 5.5–6.0 °C/km uglavnom se povezuju sa stabilnom atmosferom. Vrijednosti veće od 9.8 °/km smatraju se apsolutno nestabilnima. Za vrijednosti između navedenih, atmosfera je uvjetno nestabilna što znači da dovoljna količina vlage može promijeniti stanje u nestabilno (Bryan i Fritsch, 1999; Schultz i sur., 2000).

„Lapse Rates 3–6 km" (LR3–6) je ista fizikalna veličina kao i LLLR, ali za sloj visine od 3 do 6 km.

Smicanje vjetra „Bulk Shear" (BS) predstavlja razliku vektora vjetra na različitim nivoima (`https://www.spc.noaa.gov/exper/soundings/help/shear.html`). Smicanje koje se proučavalo u ovom radu računato je za nivoe: 0–1 km, 0–3 km, 0–6 km. Prema nivoima definirane su i oznake: BS0–1, BS0–3, BS0–6.

K-indeks je mjera potencijalnog razvoja konvektivnog nevremena. Temelji se na vertikalnom temperaturnom gradijentu, količini vlage u nižim slojevima atmosfere i vertikalnom opsegu vlažnog sloja. Formula za računanje indeksa je

$$K = T_{850} - T_{500} + T_{\mathrm{d}850} - (T_{700} - T_{\mathrm{d}700})\,,$$

pri čemu je T_x temperatura na x-mb plohi, a $T_{\mathrm{d}x}$ temperatura rosišta na x-mb plohi. Koristan je jer ukazuje na nestabilnost u atmosferi, ali nije pouzdan za visinske postaje. Iako vrijednosti koreliraju s vjerojatnošću pojave nevremena, one ovise o dijelu

godine, lokaciji i sinoptičkoj situaciji (Doswell i Schultz, 2006). U tablici (1.1) dan je popis uobičajenih vrijednosti indeksa.

K	Karakteristike oluja
manji od 20	ne očekuje se nevrijeme
20 do 25	izolirani konvektivni sustav
26 do 30	široko raspršeni sustavi
31 do 35	raspršeni sustavi
veći od 35	brojne oluje

Tablica 1.1: Vrijednosti K-indeksa s pripadajućim očekivanim karakteristikama oluja.

LI-indeks („Lifted index") je definiran kao razlika temperature na 500 hPa i temperature česti podignute sa nivoa blizu tla na 500 hPa. Što je atmosfera nestabilnija, indeks je negativniji (Doswell i Schultz, 2006). U tablici (1.2) dane su tipične vrijednosti iz literature.

LI	Naznake oluje
0 do -2	konvektivna oluja moguća – potreban dobar mehanizam za inicijaciju
-3 do -5	nestabilno – oluja vjerojatna
manje od -5	vrlo nestabilno – mogućnost vrlo jakog grmljavinskog nevremena

Tablica 1.2: Vrijednosti LI-indeksa s pripadajućim očekivanim scenarijima oluja.

1.3 Tipovi konvektivnih oluja i njihov razvoj

Konvektivne oluje možemo podijeliti na jednoćelijske, multićelijske i superćelijske. Tip organizacije oluje ovisi prvenstveno o vertikalnom smicanju vjetra. Kada je vertikalno smicanje malo (manje od 10 m/s u prva 4 km), za očekivati je formiranje jednoćelijske oluje. One u prosjeku traju 30-ak minuta i kreću se sa srednjim vjetrom u najnižih 8 km. Umjereno smicanje vjetra (10-20 m/s u prvih 4 km) pogoduje stvaranju multićelijske oluje. Pojedine ćelije unutar takve tvorevine mogu trajati 30-ak

minuta, ali životni vijek oluje može biti nekoliko sati. U slučaju jakog smicanja vjetra (većeg od 20 m/s u prva 4 km) jako naginjanje konvektivnih ćelija odgađa razvoj oluje čak i u termodinamički vrlo povoljnom okruženju. Razvoj može biti praćen razdvajanjem na dvije oluje od kojih se jedna giba ulijevo, a druga udesno u odnosu na prosječni vjetar. Prva često brzo nestaje, dok druga sporo evoluira u rotacijsku cirkulaciju s jednom uzlaznom jezgrom i pratećim silaznim strujanjima. Kao konačni rezultat često se javlja jaka kiša, tuča ili tornado. Sam razvoj započinje horizontalnom vrtložnošću koja se s vremenom naginje te postaje uspravna (Holton, 2004).

Dinamika sinoptičke skale ima važnu ulogu u generiranju konvekcije iako je ona primarno mezoskalni proces. Jedan od načina na koji gibanja sinoptičke skale utječu na razvoj konvekcije jest advekcijom stope ohlađivanja. Naime, povećanje stope ohlađivanja rezultira većom nestabilnošću što implicira veći CAPE. Vertikalna gibanja sinoptičke skale također utječu na konvektivne procese. Iako su brzine vertikalnih gibanja velike skale zanemarive u odnosu na vertikalne brzine u vrtlozima graničnog sloja, ona mogu imati veliki utjecaj na CIN. Ako su uzlazna strujanja (sinoptičke skale) od samo nekoliko cm/s perzistentna satima, često dolazi do smanjenja CIN-a. Supsidencija (silazno gibanje) zraka na sinoptičkoj skali može pak odgoditi ili onemogućiti razvoj konvekcije. Pozitivna advekcija vlage u nižim slojevima atmosfere i produbljivanje vlažnog sloja također smanjuje CIN, ali povećava CAPE. Smanjenjem CIN-a te povećanjem CAPE-a rezultira i zagrijavanje u nižim slojevima koje može biti posljedica insolacije (Markowski i Richardson, 2010).

1.4 Oluje s jakim smicanjem i malim vrijednostima CAPE-a (HSLC)

Konvektivna raspoloživa potencijalna energija (CAPE) jedan je od najvažnijih parametara za predviđanje i karakterizaciju konvektivnih oluja. Intenzitet duboke konvekcije izvantropskih širina ugrubo je određen CAPE-om dok je njen oblik ovisan o smicanju vjetra (Grisogono, Belušić, 2015). I dok su oluje s velikim CAPE-om relativno dobro obrađene u domaćim i stranim publikacijama, razvoj konvektivnih oblaka u uvjetima jakog smicanja, ali malih vrijednosti CAPE-a (HSLC - od engl. „High Shear Low Cape") dosta su skromno proučene u znanstvenim radovima. Od interesa je proučiti ove konvektivne sustave jer predstavljaju veliki izazov za prognoziranje vremena (Dean i Schneider, 2008). Iako su relativno česti, tek rijetko rezultiraju olujnim

vremenom, ali kad do toga dođe, materijalna šteta uslijed njihova prolaska može biti značajna s obzirom na to da mogu uzrokovati pojavu tornada, tuče, olujnog vjetra te velike količine oborine. Oluje ovakvog tipa najčešće su u hladnom dijelu godine. Što se dnevnog hoda tiče, najčešće su zabilježene između 16 i 2 sata po lokalnom Sunčevu vremenu s maksimumom u 19 sati (Sherburn i Parker, 2014). Udio tornada intenziteta EF1 (138 do 177 km/h) i većeg te jakog olujnog vjetra (120 km/h i više) u uvjetima HSLC u ukupnom broju ovakvih pojava najveći je zimi. Ovisno o mjesecu u godini i dobu dana, taj udio nerijetko iznosi 100 % (Sherburn i sur., 2016). Navedene informacije odnose se na područje SAD-a. Slika (1.5) prikazuje tornado koji se 3. studenog 2013. stvorio u Arnhemu (Nizozemska).



Slika 1.5: Tornado u Arnhemu 3. studenog 2013. u 14:50 UTC. CAPE je iznosio 120 J/kg, a ravnotežni nivo 5600 m. Izvor: http://www.severe-weather.eu/recent-events/tornado-in-arnhem-netherlands-photo-video-nov-3-2013/

Za HSLC okruženja posebno su razvijeni relativno novi tzv. „severe hazards in environments with reduced buoyancy" (SHERB) parametri. Sherburn i Parker 2014. definiraju i analiziraju dvije verzije, SHERBE i SHERBS3 koje su se pokazale najuspješnijima u prognoziranju olujnog scenarija u HSLC okruženjima.

SHERBE je definiran relacijom

$$\mathrm{SHERBE} = (\mathrm{ESHR}/27\,\mathrm{ms}^{-1}) \cdot (\mathrm{LLLR}/5.2\,\mathrm{Kkm}^{-1}) \cdot (\mathrm{LR3}-6/5.6\,\mathrm{Kkm}^{-1})\,.$$

ESHR je efektivno smicanje definirano kao iznos razlike vektora vjetra na polovici visine između efektivne baze dotoka i EL-a i vektora vjetra na efektivnoj bazi dotoka za najnestabilniju čest u najnižih 300 mb. Efektivna baza dotoka je prvi sloj u sondaži u kojem sve podignute susjedne česti imaju CAPE ≥ 100 J/kg i CIN ≥ -250 J/kg. Ta baza se interpretira kao sloj dotoka za oluju u kojem podignute česti imaju dovo-

ljan CAPE i CIN koji nije prevelik (Thompson i sur., 2006). Korištenje efektivnog smicanja, odnosno vertikalnog smicanja normaliziranog na dubinu oluje, omogućava konzistentnu i potencijalno korisnu usporedbu vrlo dubokih, relativno plitkih i uzdignutih konvektivnih oluja. Pri tome ESHR zamjenjuje klasični BS0–6 kod primjene na superćelije. Kritična vrijednost SHERBE-a je 1.00, iznad koje bi trebalo uzeti u obzir mogućnost razvoja oluje. Matematički izraz za SHERBS3 je

$$\mathrm{SHERBS3} = (\mathrm{BS0} - 3/26\,\mathrm{ms}^{-1}) \cdot (\mathrm{LLLR}/5.2\,\mathrm{Kkm}^{-1}) \cdot (\mathrm{LR3} - 6/5.6\,\mathrm{Kkm}^{-1})\,.$$

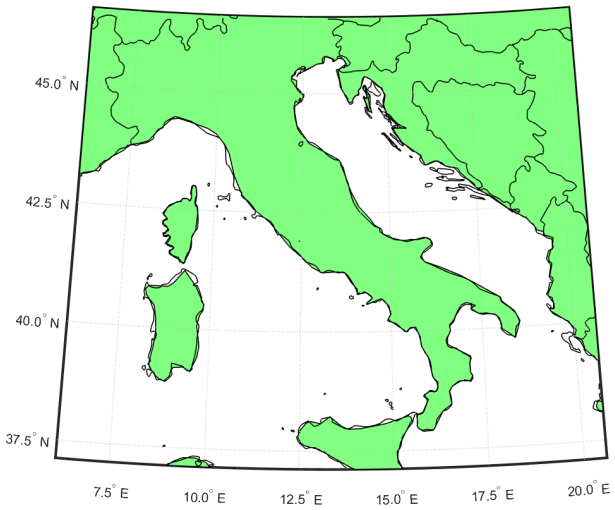
Kritična vrijednost za SHERBS3 je 1.01. U HSLC slučajevima kada je MUCAPE jednak 0 J/kg i ESHR će biti 0 m/s pa tada treba koristiti SHERBS3. SHERBE i SHERBS3 pokazali su se korisnima za područje čitavog SAD-a. Konstruirani su za određivanje vjerojatnosti razvoja oluje u HSLC konvektivnom okruženju, a ne za početni razvoj konvekcije. Zbog toga bi ove parametre trebalo kombinirati s nekim od indeksa iz (1.2) za točniju procjenu mogućnosti razvoja konvekcije.

Logičan je odabir da se kao prva analiza prouči termodinamika HSLC oluja te konstruiraju i izračunaju mogući parametri za predviđanje. Jedan od ciljeva ovog rada je prikazati karakteristike HSLC okruženja i parametara vezanih uz njih na području južne Europe.

2 Podaci i metode

2.1 Baza olujnih događaja

Za izradu analize olujnih događaja, korišteni su podaci o prijavljenim olujama, preuzeti iz European Severe Weather Database (ESWD). S obzirom na to da je cilj ovog rada proučiti konvekciju u hladnom dijelu godine i HSLC oluje u sklopu toga (jer se javljaju češće zimi), u ovom radu proučavane su oluje koje su zabilježene od 1. listopada do 1. travnja. Raspon podataka odabranih iz baze je od 3.11.2008. do 25.3.2018. U obzir su uzimani samo događaji iz južne Europe s geografskog područja prikazanog na slici (2.1). S tog području postoji dovoljan broj prijavljenih oluja u bazi da bi se mogla izraditi zadovoljavajuća analiza te je moguće korištenje podataka o munjama (vidjeti 2.2).



Slika 2.1: Geografsko područje na kojem su zabilježene analizirane oluje.

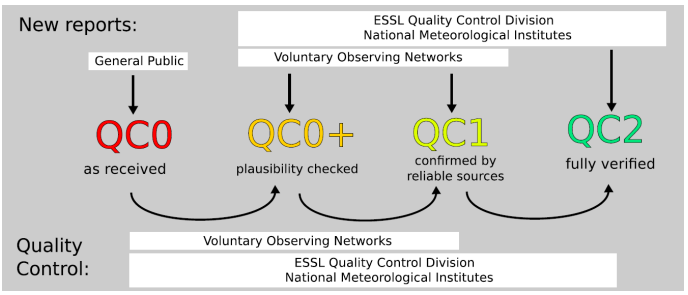
ESWD baza sadrži popis prijavljenih oluja nad Europom koje su ugrozile ljudske živote i/ili prouzročile materijalnu štetu. Mogući tipovi olujnog vremena u bazi su: tornado, olujni vjetar, tuča, intenzivna kišna oborina, lijevkasti oblak, površinski vrtlog, pustinjski vrtlog, snježna oluja, nakupljanje leda, lavina, štetna munja.

Iako se tornado relativno često javlja u HSLC okruženju (Sherburn i Parker, 2014), pijavice nad Jadranom dosta su dobro proučene (Renko i sur., 2016) pa se u ovom radu neće dodatno analizirati. Zbog toga su u ovom radu obrađene karakteristike sustava s krupnom ili obilnom tučom i/ili intenzivnom kišom. Postoje jasni kriteriji koji trebaju biti ispunjeni da bi neki atmosferski događaj bio zabilježen u ESWD

bazi. Za nevrijeme praćeno tučom promjer ledene oborine mora biti najmanje 2 cm ili šteta mora upućivati na to. Drugi kriterij za tuču je da sloj leda na tlu mora biti debljine najmanje 2 cm. Za intenzivnu kišnu oborinu prvi kriterij je velika materijalna šteta. To primjerice znači: obustavljanje prometa važnim cestama, prekid u javnom prometu, poplave u građevinama, odroni tla. Drugi kriterij je da je pala iznimna količina kiše u najviše 24 sata (`https://www.essl.org/cms/wp-content/uploads/20140509-ESWD_criteria.pdf`). Svaka prijava olujnog događaja sadrži vrijeme i koordinate opažanja. Za dojave nevremena postoji sustav provjere kvalitete infromacija. Moguća razina kvalitete je sljedeća:

1. QC0, kako je dojavljeno
2. QC0+, provjera vjerodostojnosti izvršena
3. QC1, izvještaj potvrđen od strane provjerenog izvora
4. QC2, događaj potpuno ovjeren

To je shematski prikazano na slici (2.2).



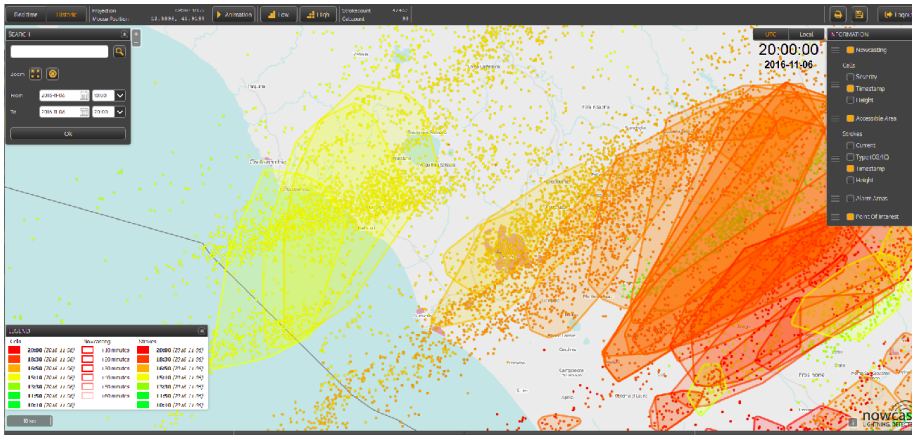
Slika 2.2: Shematski prikaz kontrole kvalitete podataka u ESWD bazi (`https://www.essl.org/cms/wp-content/uploads/ESWD-QC-scheme.png`)

U ovom radu korišteni su samo podaci koji su označeni razinom QC1 i QC2. To su dojave visoke pouzdanosti, a ima ih dovoljno da se može izraditi kvalitetna statistička analiza.

2.2 Zapisi o munjama

Kao što je već ranije spomenuto, dovoljan uvjet za detekciju konvektivnih oblaka je grmljavina. Iz tog razloga zapisi o munjama često se koriste za pronalaženje područja nad kojim se razvila konvekcija (npr. Mikuš i sur., 2012). Za provjeru je li neka oluja

bila konvektivna korišteni su podaci o električnim pražnjenjima iz LINET sustava. Računalno okruženje prikazano je na slici (2.3).

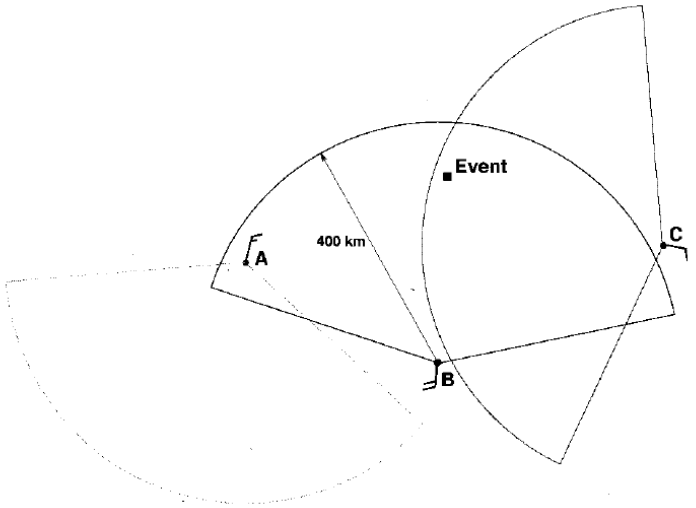


Slika 2.3: Grafičko sučelje LINET sustava za prikaz detektiranih munja

LINET sustav je razvijen na Sveučilištu u Münchenu. Sustav senzora bilježi vrlo niske/niske frekvencije magnetskog polja koje se javlja kao posljedica elektriciteta munje. Svaka mjerna stanica ima ugrađen GPS prijamnik. Metoda vremena dolaska (TOA) omogućuje da se odredi lokacija udara munje. Osim horizontalnog položaja, komponente sustava omogućavaju da se odredi i vertikalni u slučaju munje oblak – oblak. Nadalje, bilježi se jačina i polaritet udara. Trenutno oko 90 senzora pokriva veliki dio Europe. Srednja devijacija u izračunu lokacije munje je manja od 150 m (Betz i sur., 2008). Za tipični sustav koji se sastoji od centralne stanice i pet okolnih, minimalna jačina koja se može opaziti iznosi 1 – 2 kA (Höller i sur., 2009).

2.3 Podaci radiosondažnih mjerenja

Za određivanje termodinamičkih parametara pojedinog događaja korišteni su podaci radiosondažnih mjerenja s internetskih stranica Sveučilišta u Wyomingu. Za određivanje reprezentativne sondaže iskorištena je metoda dotoka (Rasmussen i Blanchard, 1998.). To je objektivna metoda koja je razvijena kako bi se svakom meteorološkom događaju pridružila odgovarajuća reprezentativna sondaža. Meteorološki događaj definiran je kao munja između oblaka i tla ili prijavljeno nevrijeme. Sondaža se, prema metodi, nalazi u dolaznom sektoru bilo kojeg metorološkog događaja ako je udaljena manje od 400 km od događaja te on upada u $\pm 75°$ srednjeg vektora vjetra u graničnom sloju. To je shematski prikazano na slici (2.4).



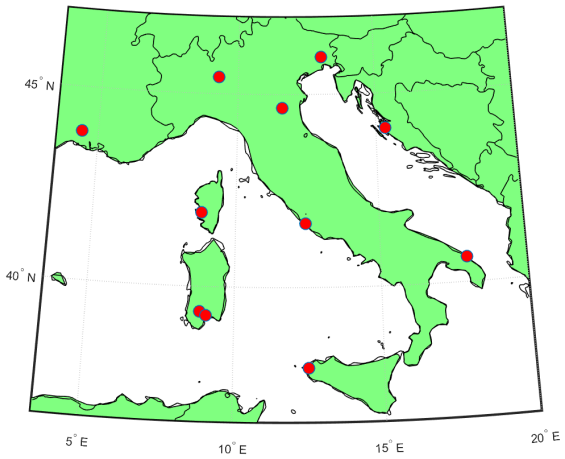
Slika 2.4: Shematski prikaz pravila za određivanje reprezentativne sondaže meteorološkog događaja. Sondaže su vršene u točkama A, B, C dok je događaj označen kvadratićem. B i C nalaze se u ulaznom sektoru.

Ako više od jedne sondaže zadovoljava navedene kriterije, bira se ona za koju je izmjeren veći CAPE. Što se vremenskog kriterija tiče, za kišnu oborinu događaj je morao biti zabilježen između 21:00 i 06:00 UTC odnosno 09:00 i 18:00 UTC što je ekvivalentno -3 do +6 sati u odnosu na vrijeme sondaže. Za tuču, zbog manjeg broja slučajeva, taj je kriterij blaži. Vremenski interval bio je -3 do +8 sati u odnosu na vrijeme sondaže. Razlog za dulji vremenski period nakon sondaže u koji događaj može upasti je taj što želimo analizirati stanje atmosfere prije konačnog rezultata konvekcije. Naime, konvekcija je proces kojim atmosfera nastoji postići stabilno energetsko stanje. Manja je težina rezultata dobivenih nakon oluje jer se gubi informacija o nestabilnosti koja je bila uzrokom konvekciji. Modificiranu metodu dotoka koristili su također Rodriguez i Bech (2017) te Renko i sur. (2016). U tablici (2.1) dan je popis mjesta u kojima su vršena radiosondažna mjerenja korištena u ovom radu, a slika (2.5) prikazuje geografske položaje istih.

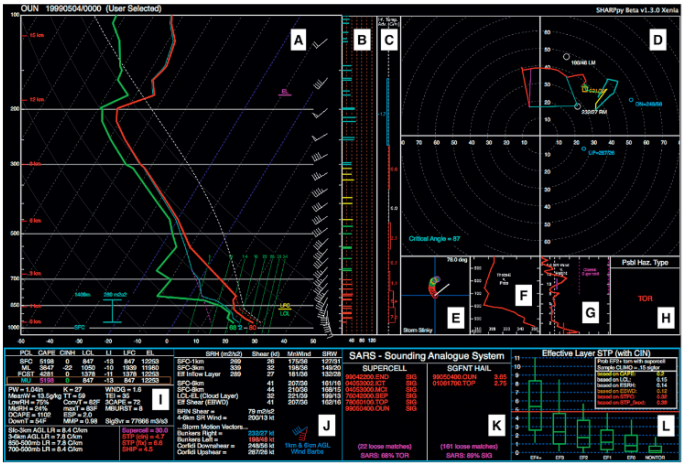
Podaci su obrađeni programskim paketom SHARPpy koji se sastoji od rutina za analizu sondaža i hodografa. Program je razvijen u National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA) Storm Prediction Center (SPC) u Oklahomi (Blumberg i sur., 2017). Slika (2.6) prikazuje grafičko sučelje SHARPpy-ja.

Šifra postaje	Mjesto	Kiša	Tuča
07645	Nimes-Courbessac	0	1
07761	Ajaccio	8	3
14430	Zadar	10	4
16045	Rivolto	0	1
16080	Milano	1	0
16144	S Pietro Capofiume	2	0
16245	Pratica Di Mare	7	3
16320	Brindisi	14	2
16429	Trapani	3	1
16546	Decimomannu	5	0
16560	Cagliari	0	1

Tablica 2.1: Popis mjesta u kojima su vršena radiosondažna mjerenja sa pripadnim brojem reprezentativnih slučajeva za kišu i tuču.



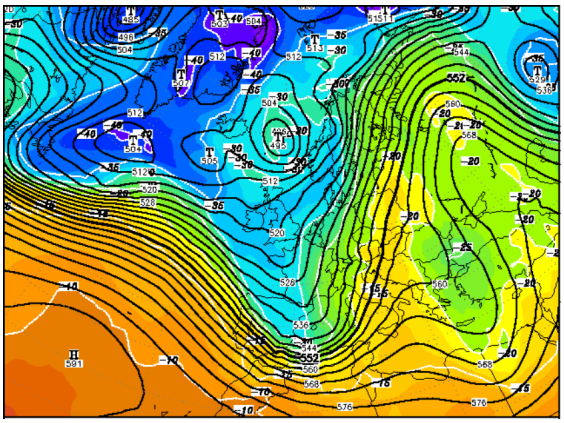
Slika 2.5: Geografski položaji na kojima su vršena radiosondažna mjerenja korištena u ovom radu.



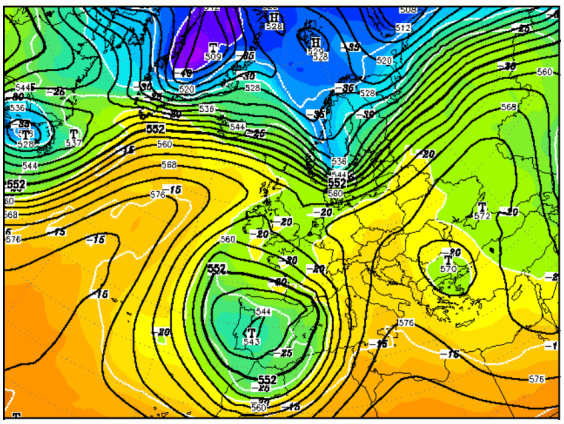
Slika 2.6: Grafičko sučelje programskog paketa SHARPpy.

2.4 Visinske i prizemne sinoptičke karte

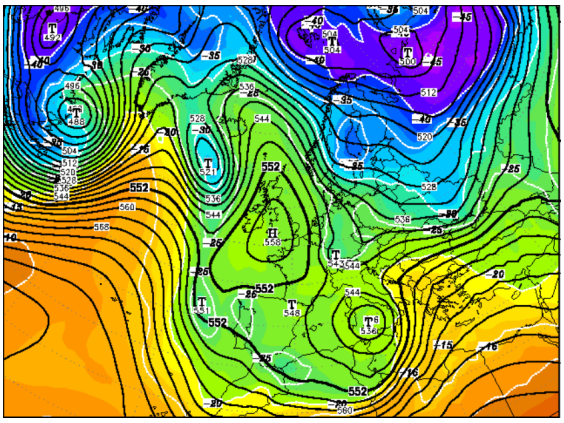
Poznato je da advekcija zraka na višim atmosferskim nivoima modificira konvektivnu aktivnost (Mikuš i sur., 2012). Nadalje, površinski tlak zraka igra važnu ulogu u generiranju i organizaciji konvekcije (Reap, 1994). Zbog toga je u ovom radu napravljena analiza visinske (500 hPa ploha) i prizemne sinoptičke situacije za odabrane slučajeve. Za to su korištene karte dostupne na internet stranici `http://www1.wetter3.de/Archiv/`. Režimi strujanja na 500 hPa i pripadne oznake koje se ovdje koriste preuzeti su od Lovrića (2018). Nakon analize svih slučajeva, režimi strujanja koji su se javljali na izobarnoj plohi 500 hPa bili su sljedeći: prednja strana doline (PSD), prednja strana ciklone (PSC), gornja strana ciklone (GSC), os doline (Dol), donja strana doline (DSD), donja strana ciklone (DSC), visinska ciklona (Cv), bezgradijentno polje (Bez). Slika (2.7) prikazuje navedene režime.



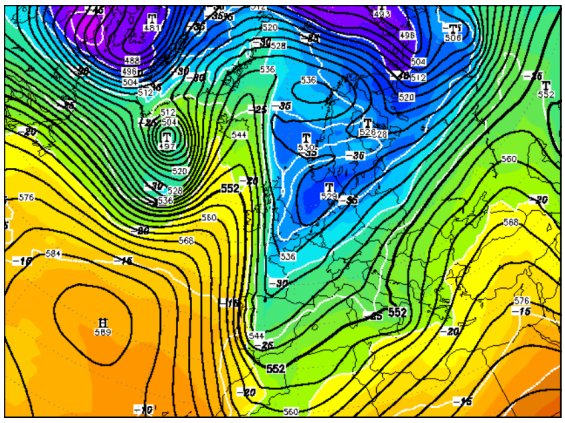
(a) PSD



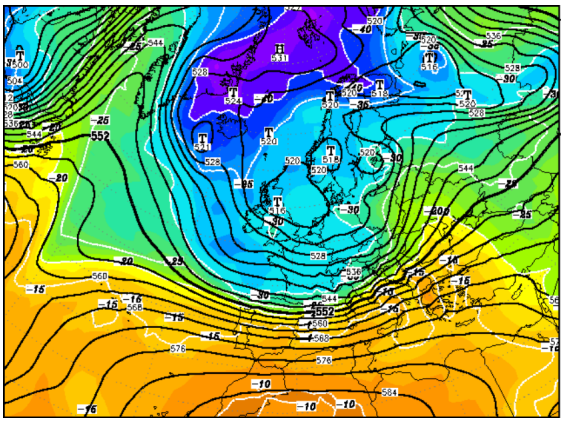
(b) PSC



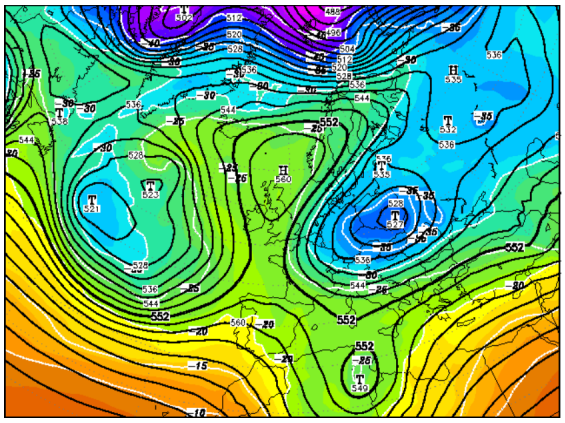
(c) GSC



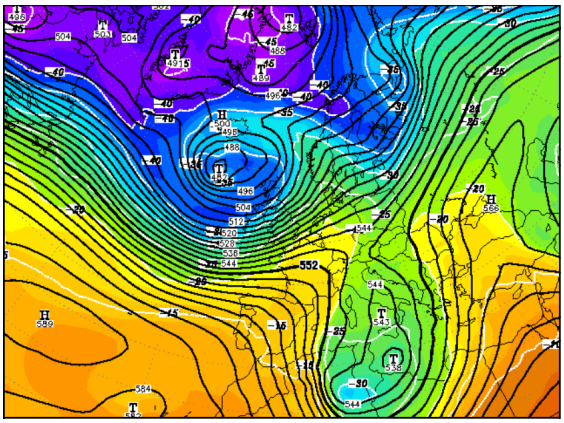
(d) Dol



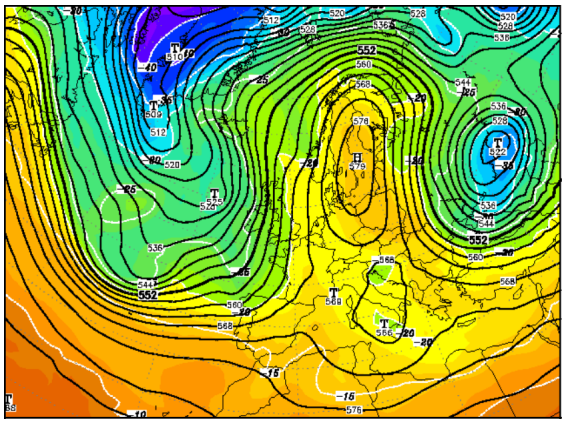
(e) DSD



(f) DSC



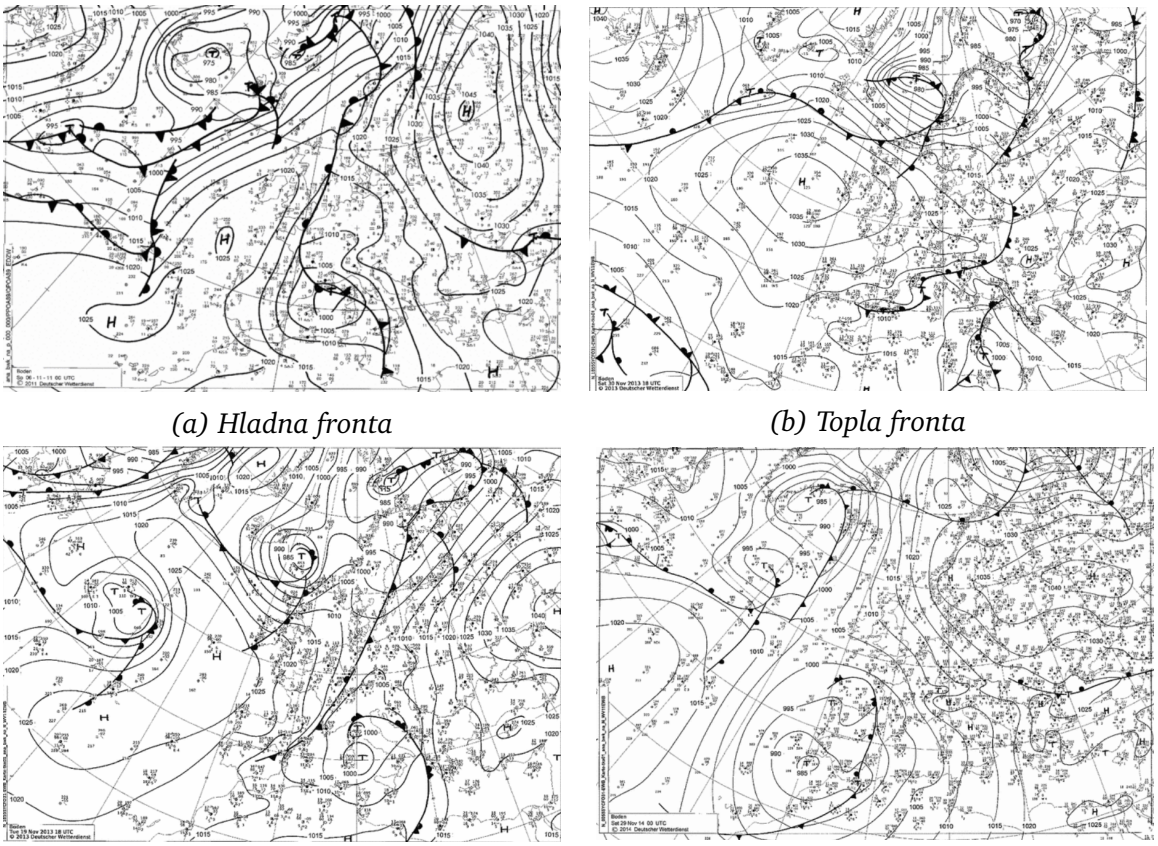
(g) Cv



(h) Bez

Slika 2.7: Primjeri za sve slučajve visinskih strujanja koja su se pojavila u analizi

Na prizemnoj sinoptičkoj karti promatralo se je li prilikom inicijacije oluje preko područja od interesa prošla fronta. Moguće situacije bile su: hladna fronta, topla fronta, fronta okluzije, slučaj bez fronte. Slika (2.8) prikazuje navedene prizemne slučajeve.



(a) Hladna fronta *(b) Topla fronta*

(c) Fronta okluzije *(d) Bez fronti*

Slika 2.8: Primjeri za sve slučajeve prizemnih sinoptičkih situacija koji su se pojavili u analizi

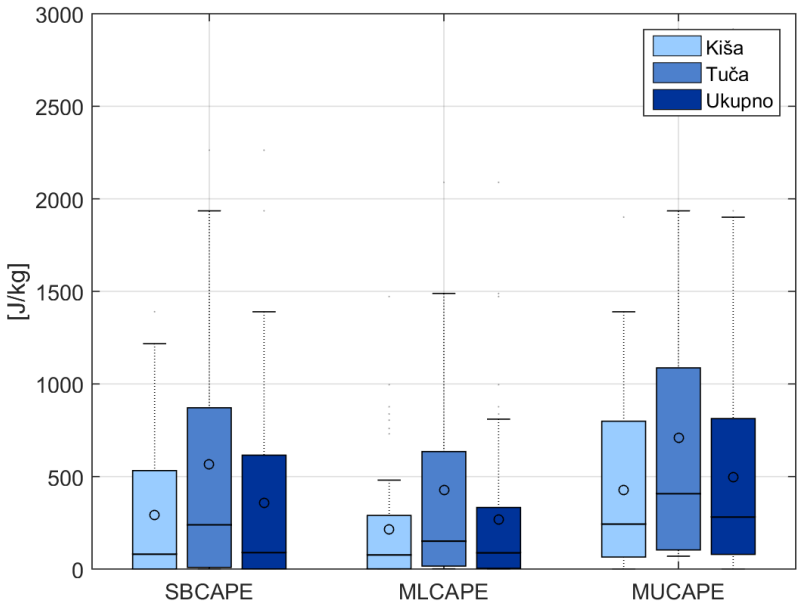
3 Rezultati

Iz ESWD baze izdvojeno je 29 slučajeva olujnog nevremena pračenog tučom (nadalje tuče) i 162 slučajeva intenzivne kišne oborine (nadalje kiše). Mnogi od tih slučajeva nisu bili konvektivni, što je zaključeno na temelju podataka o munjama. 16 sondaža kiše i 3 tuče nisu bile dostupne. 7 sondaža kiše i 5 sondaža tuče nije bilo reprezentativno jer je MUCAPE iznosio nula. To je vjerojatno bila posljedica prolaska fronte koja je bitno promijenila stanje atmosfere u odnosu na ono u kojem se nalazila prilikom konvekcije. Nakon izbacivanja tih slučajeva te slučajeva za koje je bila reprezentativna ista sondaža (5 slučajeva tuče), preostalo je 50 slučajeva konvektivne kiše i 16 tuče. Nad tim podacima provedena je statistička analiza koja je prikazana u sljedećim potpoglavljima.

3.1 Termodinamički parametri

Za razumijevanje fizikalnih procesa duboke mokre konvekcije u hladnom dijelu godine potrebno je analizirati određene termodinamičke parametre. U ovom poglavlju prikazana je analiza parametara opisanih u (1.2) za odabrane slučajeve. Gdje je bilo moguće, dana je usporedba s toplim dijelom godine odnosno drugim geografskim područjima. Rezultati su prikazani standardnim dijagramom pravokutnika. Donja i gornja stranica pravokutnika označavaju 25-ti percentil (prvi kvartil) q_1 i 75-ti percentil (treći kvartil) q_3. Crta u sredini podudara se s medijanom niza m. Interkvartilni raspon iznosi $q_3 - q_1$. Linije koje se nastavljaju na donju i gornju stranicu pravokutnika završavaju oznakama najmanjeg podatka koji je veći od $q_1 - 1.5 \cdot (q_3 - q_1)$ odnosno najvećeg podatka koji je manji od $q_3 + 1.5 \cdot (q_3 - q_1)$. Sve vrijednosti koje su izvan raspona $[q_1 - 1.5 \cdot (q_3 - q_1),\ q_3 + 1.5 \cdot (q_3 - q_1)]$ označene su križićem.

Razdioba SBCAPE-a, MLCAPE-a i MUCAPE-a prikazana je na slici (3.1). Vrijednosti SBCAPE-a su u većini promatranih slučajeva manje od 500 J/kg što su razmjerno male vrijednosti prema kriteriju navedenom u radu Sherburna i Parkera (2014). Medijan MLCAPE-a za kišu iznosi 76 J/kg, a za tuču 151 J/kg. Radi se o relativno malim vrijednostima u usporedbi sa ljetnim slučajevima. Kolendowicz i sur. (2017) dobili su vrijednosti medijana MLCAPE-a za središnju Europu u slučaju olujnog nevremena 50 J/kg za hladni dio godine i 125 J/kg za topli dio.



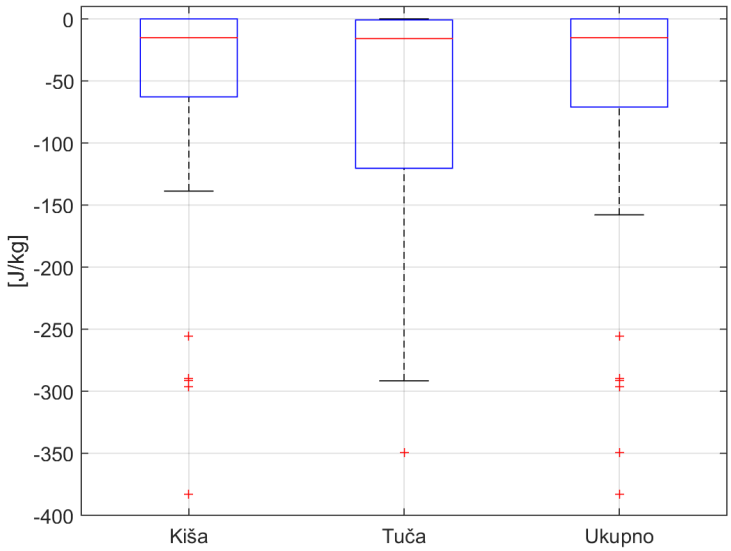
Slika 3.1: Vrijednosti SBCAPE-a, MLCAPE-a i MUCAPE-a. „Kiša" označava rezultate za izdvojene podatke koji su bili povezani s kišnom oborinom. „Tuča" se odnosi na nevrijeme praćeno tučom. „Ukupno" su rezultati dobiveni kombinacijom dviju prethodnih pojava. Kružić označava srednju vrijednost niza. Ova notacija korištena je za sve slike u radu.

To je prilično dobro slaganje s rezultatima u ovom radu jer je područje pručavanja bila južna Europa gdje su vrijednosti CAPE-a zbog intenzivnijeg zagrijavanja i maritimnog učinka Sredozemlja veće. Naime, temperature u južnoj Europi u prosjeku su veće u odnosu na centralnu, a dodatan efekt na temperaturu ima utjecaj mora koje skladišti energiju te preko zime može uzrokovati povišeni CAPE. Ono što je bitno drukčije u odnosu na središnju Europu jest interkvartilni raspon. Za kišu on iznosi 289 J/kg, a za tuču 619. To upućuje na bitno veću varijabilnost parametra u južnoj Europi. Fizikalno, to je vjerojatno posljedica intenzivnije termodinamike na promatranom području. Craven i Brooks (2004) navode vrijednosti koje otprilike 4 puta premašuju vrijednosti u ovom radu. Razlog je u tome što oni u svom radu promatraju cjelogodišnje razdoblje, a u ljetnom periodu zbog viših su temperatura vrijednosti znatno više i konvekcija je znatno intenzivnija.

Medijani MUCAPE-a iznose (za kišu i tuču; nadalje vrijedi isti poredak, osim ako nije navedeno drugačije) 243 J/kg i 407 J/kg. q_1 jednak je 65 J/kg, odnosno 103 J/kg, a q_3 799 J/kg i 1087 J/kg. Pučik i sur. (2015) navode medijan MUCAPE-a za oluju praćenu tučom u iznosu od 750 J/kg, a kišom 600 J/kg. Međutim, njihova analiza

odnosila se na središnju Europu i podatke za cijelu godinu. Iz usporedbe s SBCAPE-om i MLCAPE-om možemo zaključiti da se radi o konvektivnim oblacima s relativno niskom bazom. Naime, SBCAPE bolje opisuje konvektivne oblake s niskom bazom. MUCAPE će biti približno jednak SBCAPE-u samo ako se radi o takvom slučaju. To se često javlja tijekom poslijepodneva i ranih večernjih sati kada su česti pri tlu najnestabilnije. MUCAPE pogodniji je pri opisu nestabilnosti za slučajeve s uzdignutom bazom – česti se ne dižu nužno s nivoa pri tlu. Tada SBCAPE može biti mali jer se oluja razvila nad stabilnim slojem pri tlu. MLCAPE opisuje nestabilnost u dobro izmiješanom sloju približno konstantne potencijalne temperature i vlage. Baza tog sloja uobičajeno je smještena pri tlu, a ponekad može biti i uzdignuta (Bunkers i sur., 2002). S obzirom da nema prevelike razlike u razdiobi tri opisana parametra, slijedi da konvektivni oblaci u hladnom dijelu godine imaju nisku bazu. MUCAPE u slučaju tuče bitno je veći te je zabilježen veći broj slučajeva za koje iznos premašuje 1000 J/kg. Taszarek i sur. (2018) dobili su bitno manji iznos MLCAPE-a, ali usporediv MUCAPE za odgovarajuće geografsko područje i sezonu.

Idući parametar koji je vrlo bitan prediktor intenziteta konvekcije jest SBCIN. Dobivene vrijednosti prikazane su na slici (3.2). Medijani su jednaki -15 J/kg i -16 J/kg.

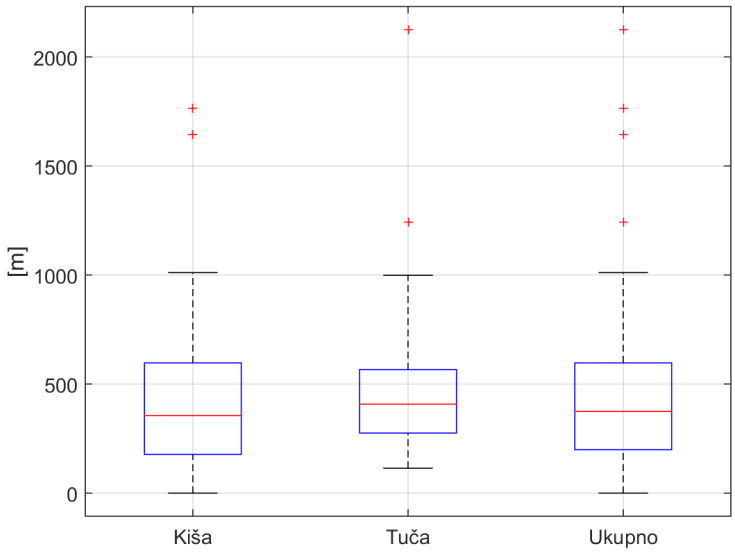


Slika 3.2: Vrijednosti SBCIN-a.

q_1 iznosi -63 J/kg, odnosno -120 J/kg. q_3 u oba slučaja iznosi 0. Iako su medijani gotovo jednaki, varijabilnost u slučaju tuče gotovo je dvostruko veća. Relativno je velik broj slučajeva kada apsolutna vrijednost SBCIN-a premašuje 100 J/kg. Tako velike

vrijednosti impliciraju prilično opiranje atmosfere konvektivnim procesima u nižim slojevima. Takvi konvektivni slučajevi su vjerojatno bili forsirani zbog orografije ili frontalnim sustavima. Visoke vrijednosti CIN-a koje koincidiraju s visokim vrijednostima MUCAPE-a vjerojatno su posljedica izdignutih konvektivnih baza (Sherburn i Parker, 2014). Ipak, u ovom slučaju CIN u većini slučajeva upućuje na oblake s niskom bazom. Apsolutne vrijednosti bile su male što govori da je stanje atmosfere u nižim slojevima bilo pogodno za razvoj konvekcije (Sherburn i Parker, 2014).

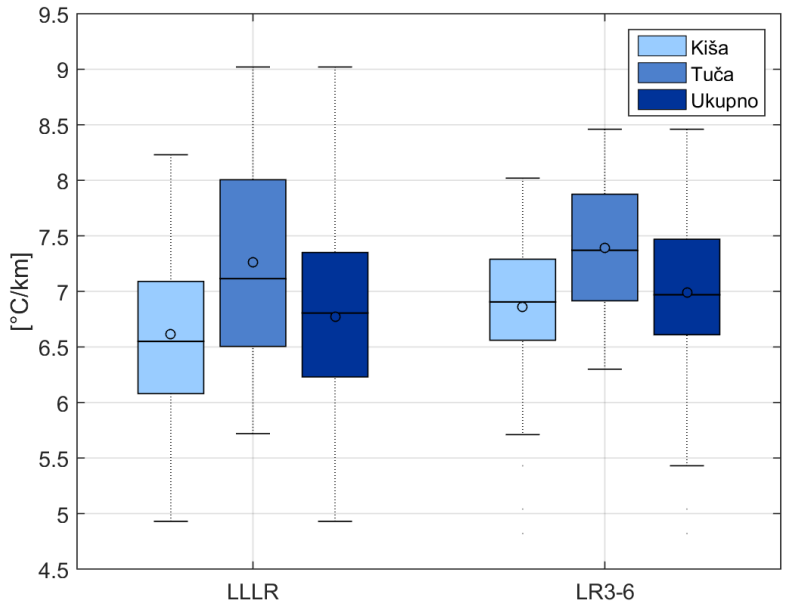
Iznosi SBLCL-a prikazani su na slici (3.3).



Slika 3.3: Vrijednosti SBLCL-a.

Prema Sherburnu i Parkeru (2014) ove vrijednosti SBLCL-a prilično su niske. To znači da kondenzacija započinje na niskim atmosferskim nivoima. Iako je područje njihova proučavanja bio SAD, rezultati su donekle usporedivi jer su proučavali oluje s niskim CAPE-om. Vrijednosti SBLCL-a koje su dobili Taszarek i sur. (2018) za južnu Europu bile su višestruko veće od ovdje prikazanih. Razlog bi mogao biti u tome što oni nisu izdvajali olujne dane već su izradili klimatologiju svih dostupnih sondaža u promatranom periodu. Radi se o tome da je tijekom oluja atmosfera vlažnija u odnosu na prosjek zimske sezone. Uzimajući u obzir prethodno opisane parametre, možemo zaključiti da su zimske konvektivne oluje karakterizirane niskim bazama i relativno visokom vlagom u nižim slojevima.

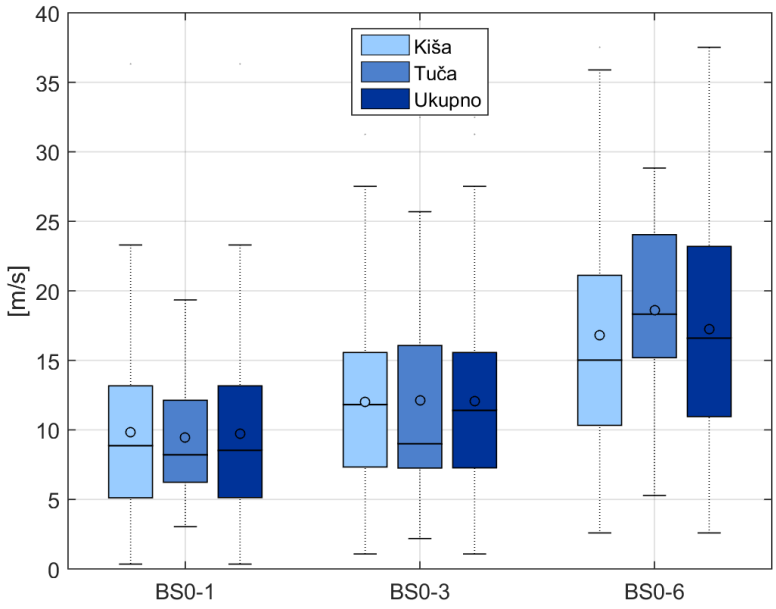
Razdioba temperaturnih gradijenata za različite visine dana je na slici (3.4). Medijani oba parametra (LLLR i LR3–6) u slučaju tuče veći su za oko 8 %.



Slika 3.4: Vrijednosti temperaturnih gradijenata u slojevima atmosfere 0–3 km i 3–6 km.

Varijabilnost LLLR-a veća je od varijabilnosti parametra LR3–6 za 43 % u slučaju kiše te 50 % (u odnosu na LR3–6) u slučaju tuče. Dakle, na ovom uzorku moguće je odrediti LR3–6 s bitno većom pouzdanošću. Informacija o varijabilnosti je važna jer o tome ovisi hoće li neki parametar postati faktorom u nekom složenijem parametru (Sherburn i Parker, 2014). Medijani temperaturnog gradijenta 800–500 hPa zimskih oluja za središnju Europu koje su dobili Kolendowicz i sur. (2017) kretali su se od 6.1 do 6.5 °C/km. Za ljetne oluje vrijednosti su iznosile od 6.1 do 6.3 °C/km. Taszarek i sur. (2018) navode medijane istog parametra za južnu Europu s vrijednostima za zimski period od 6.1 do 6.3 °C/km te ljetni od 6.6 do 6.8 °C/km, ali bez izdvajanja konvektivnih slučajeva. U ovom radu medijan svih događaja bitno je veći u odnosu na spomenuti zimski period. Pučik i sur. (2015) navode medijane za središnju Europu između 6.6 i 6.8 °C/km za oluje praćene tučom te 6.3 za kišu. McCaul i Weisman (2000) u simulacijama okruženja s malom nestabilnošću dolaze do rezultata da su intenzivnije oluje s izraženijim LLLR-om. Zbog toga se on koristi kao jedan od faktora u formulaciji složenijih parametara kao npr. SHERB. Srednja vrijednost omjera LR3–6 i LLLR-a za sve događaje iznosi 1.0 što znači da su slojevi u prosjeku jednako nestabilni.

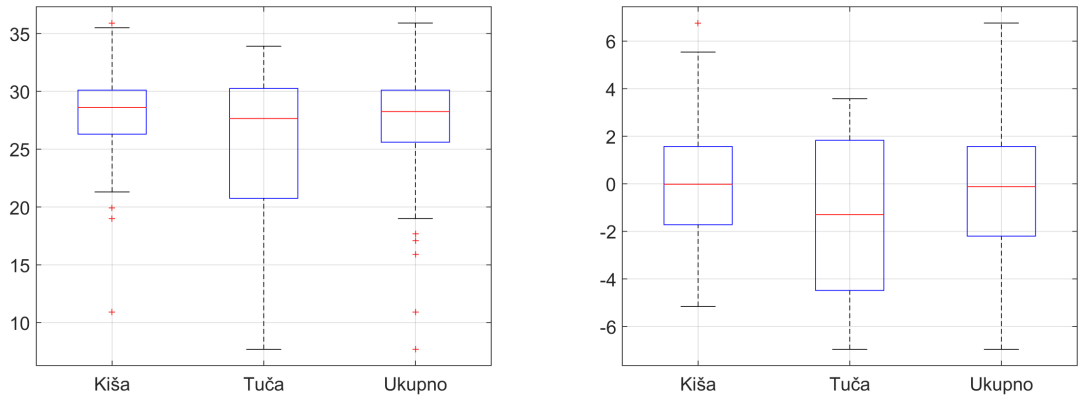
Slika (3.5) prikazuje vrijednosti smicanja vjetra između površine i tri različita nivoa: 1, 3 i 6 km.



Slika 3.5: Smicanje vjetra u slojevima različitih visina.

Smicanje vjetra na visini od 1 km u odnosu na vjetar pri površini i varijabilnost vrijednosti nešto su veći u slučaju kiše. Medijan smicanja u slučaju 0–3 km postaje bitno veći za kišu, a varijabilnost za tuču izraženija. U višim slojevima situacija se mijenja. U slučajevima s tučom smicanje je veće, a varijabilnost ponovno manja. Craven i Brooks (2004) iznose rezlutate iz kojih je vidljivo da smicanje 0–1 km u prosjeku raste s porastom intenziteta oluje. To je u kontradikciji s rezultatima ovog rada jer je smicanje u slučaju tuče manje, a intenzitet oluje smatra se većim. Vrijednost istog parametra koju dobivaju Pilorz i sur. (2016) za tuču u Poljskoj je 4.5 m/s. U istom radu navedene su i vrijednosti smicanja 0–3 km te 0–6 km. Medijani su redom jednaki između 10 i 13 m/s odnosno 13–15 m/s. Kolendowicz i sur. (2017) dobivaju medijane smicanja 0–6 km od 19 do 23 m/s za zimsku konvekciju. U toploj sezoni vrijednosti su niže te iznose oko 11 m/s. Dakle, u konvektivnim sustavima smicanje vjetra u prosjeku raste s visinom atmosferskog sloja te je izraženije u hladnijem dijelu godine.

Statističke vrijednosti K-indeksa i LI-indeksa prikazane su na slici (3.6).



(a) K-indeks *(b) LI-indeks*

Slika 3.6: Distribucija klasičnih parametara za opisivanje stanja atmosfere prilikom konvekcije

Iako treba biti oprezan prilikom korištenja ovih indeksa, iz dobivenih rezultata općenito vrijedi da je vjerojatnost pojave konvekcije u hladnom dijelu godine 75 % ako je K-indeks veći od 30. To je koristan podatak ako ne postoje druge informacije o stanju atmosfere. Interkvartilni raspon za tuču je 2.5 puta veći. Za središnji dio Sjedinjenih Američkih Država tijekom ljeta vrijednost K-indeksa 31–35 odgovara vjerojatnosti pojave nevremena 60–80 % (navedeno u američkom meteorološkom priručniku „The Use of the Skew t, log p Diagram in Analysis and Forecasting") što je dosta slično ranije spomenutoj vrijednosti. LI-indeks nije se pokazao kao parametar koji bi mogao ukazivati na vjerojatnost razvoja oluja s jakom kišom jer je za gotovo jednak broj slučajeva vrijednost veća odnosno manja od nule. S obzirom da LI-indeks opisuje stanje atmosfere, a u slučajevima nevremena vrijednost bi mu trebala biti manja od nule, nije se pokazao uspješnim u opisivanju sklonosti atmosfere razvoju konvekcije. Naime, u gotovo 50 % slučajeva bio je veći od nule. Nešto se uspješnijim pokazao za opis nestabilnosti u slučaju tuče jer je medijan podosta manji od nule, ali i dalje je prisutna relativno velika pogreška. Interkvartilni raspon za tuču gotovo je dvostruko veći, no unatoč većem rasapu stanje je bolje opisano u slučajevima tuče.

U tablici (3.1) dane su vrijednosti spomenutih statističkih varijabli za sve proučavane termodinamičke parametre za kišu i tuču.

	Kiša			Tuča			Ukupno		
	q_1	m	q_3	q_1	m	q_3	q_1	m	q_3
SBCAPE [J/kg]	0	81	532	9	239	871	1	89	615
MLCAPE [J/kg]	1	76	290	16	151	635	4	87	333
MUCAPE [J/kg]	65	243	799	103	407	1087	80	281	813
SBCIN [J/kg]	-63	-15	0	-120	-16	-1	-71	-15	0
SBLCL [m]	177	356	597	275	408	567	199	374	597
LLLR [°C/km]	6.1	6.6	7.1	6.5	7.1	8.0	6.2	6.8	7.4
LR3–6 [°C/km]	6.6	6.9	7.3	6.9	7.4	7.9	6.6	7.0	7.5
BS0–1 [m/s]	5.1	8.9	13.2	6.2	8.2	12.1	5.1	8.5	13.2
BS0–3 [m/s]	7.3	11.8	15.6	7.3	9.0	16.1	7.3	11.4	15.6
BS0–6 [m/s]	10.3	15.0	21.1	15.2	18.3	24.0	11.0	16.6	23.2
K-indeks	26.3	28.6	30.1	20.8	27.7	30.3	25.6	28.3	30.1
LI-indeks	-1.72	-0.02	1.57	-4.49	-1.30	1.83	-2.20	-0.12	1.57

Tablica 3.1: Popis prvog kvartila, medijana i trećeg kvartila za izračunate parametre. Rezultati su grupirani prema vrsti oborine. Stupac „Ukupno" sadrži rezultate za sve podatke zajedno.

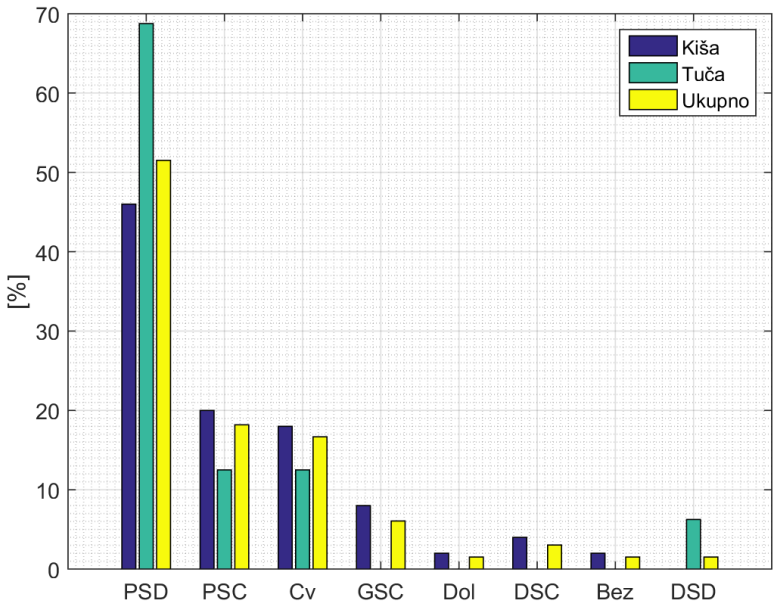
3.2 Analiza visinske i prizemne sinoptičke situacije

Analiza sinoptičke situacije omogućava djelomično razumijevanje mehanizma nastanka duboke konvekcije. Pretpostavka je da forsiranje gibanja na sinoptičkoj skali ima ključnu ulogu u nastanku duboke konvekcije zimi (Sherburn i sur., 2016). U tablici (3.2) mogu se na jednom mjestu vidjeti svi numerički rezultati ove analize.

	Kiša				Ukupno	Tuča				Ukupno
	Hl.	To.	Ok.	Ne.		Hl.	To.	Ok	Ne.	
PSD	8	5	4	6	23	5	3	0	3	11
PSC	4	3	2	1	10	0	1	1	0	2
Cv	4	0	4	1	9	0	0	1	1	2
GSC	1	2	1	0	4	0	0	0	0	0
Dol	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
DSC	1	1	0	0	2	0	0	0	0	0
Bez	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
DSD	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Ukupno	18	12	11	9	50	5	4	2	5	16

Tablica 3.2: Rezultati analiza visinskih i prizemnih sinoptičkih situacija. Prvi stupac sadrži popis režima visinskog strujanja, prvi redak oborine, a drugi redak fronte. Hl=hladna fronta, To=topla fronta, Ok=fronta okluzije, Ne=nije bilo frontalnih sustava.

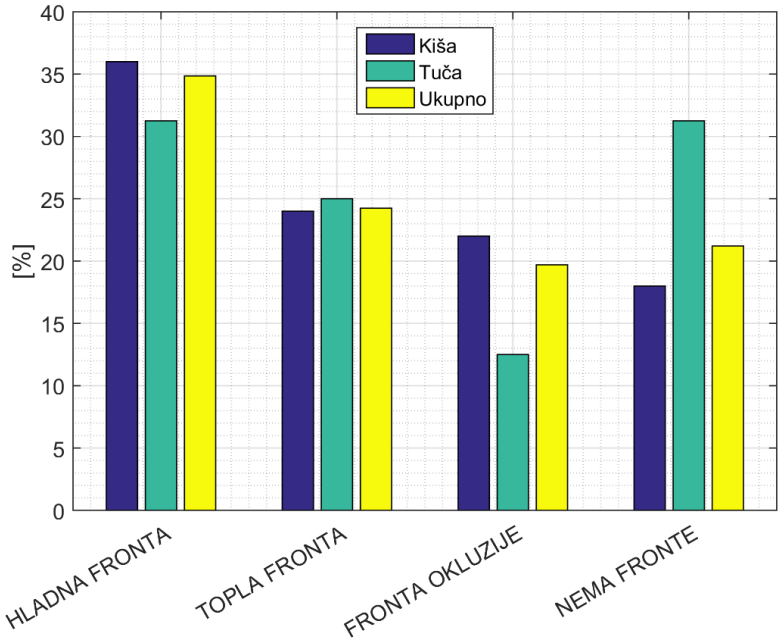
Slika (3.7) prikazuje zastupljenost režima strujanja za dvije vrste konvektivnih oluja, onih s tučom i intenzivnom kišom.



Slika 3.7: Zastupljenost režima strujanja u ukupnom broju događaja za svaku oborinu posebno.

PSD (51 %) je najčešći oblik visinskog strujanja u vrijeme zimske konvekcije za obje vrste oborine. PSC (18 %) i Cv (17 %) su gotovo jednako zastupljeni. Iako je PSD bitno zastupljeniji, nema velike razlike u svojstvima zračnih masa koju prenose ta tri strujanja. Radi se, naime, o vlažnoj zračnoj masi sa Sredozemlja koja dolazi s juga ili jugozapada nad promatrana područja. Sljedeći po zastupljenosti za kišu su GSC (6 %) i DSC (3 %), a za tuču DSD (1 %). Iako je broj režima Dol (1 %) i Bez (1 %) i DSD zanemariv, nije isključena mogućnost da se i u tim okruženjima javi konvekcija. U zagradama su navedene postotne vrijednosti za grupu „Ukupno". Mikuš i sur. (2011) navode rezultate za režime strujanja u konvektivnim situacijama u toplom dijelu godine nad Hrvatskom. Najčešće je bilo opaženo jugozapadno visinsko strujanje (38 %). Sjeveroistočno strujanje je sljedeće po zastupljenosti (23 %), a nakon njega sjeverozapadno (18 %). Očito je da se rezultati za hladni i topli dio godine bitno razlikuju. Zimska konvekcija je pod puno dominantnijim utjecajem jugozapadnog strujanja. Razlog za veliki udio oluja nastalih u južnom odnosno jugozapadnom visinskom strujanju vjerojatno je povezan sa genovskom ciklonom. Ona je, naime, vrlo česta zimi, a njen utjecaj je značajan u promatranom geografskom području ovog rada. Nadalje, genovska ciklona u prosjeku je otprilike dvostruko češća u hladnom dijelu godine nego u toplom (Horvath i sur., 2008).

Na slici (3.8) dan je udio prizemnih sinoptičkih sustava koji su se pojavili u promatranim situacijama s konvekcijom.



Slika 3.8: Zastupljenost frontalnih sustava u ukupnom broju događaja za svaku vrstu konvektivnih oluja posebno.

Jaka kiša se najčešće javila uz prisutstvo hladne fronte i to u 36 %. Topla fronta bila je prisutna u 24 % slučajeva, okluzija u 22 %, a fronta nije bila zabilježena u 18 %. Tuča je u 31 % slučajeva opažena prilikom prolaska hladne fronte, a u istom postotku javila se i u odsutstvu frontalnih sustava. To su ujedno i najpreferiranija okruženja za tu oborinu. Topla fronta javila se u 25 %, a okluzija u 13 % slučajeva. U dosta slučajeva fronta nije bila povezana s razvojem konvektivne oluje. To znači da je mehanizam nastanka morao biti jedan od navedenih u (1.1), a koji nije vezan uz prizemnu frontu. Za potpunije razumijevanje potrebna je opsežnija analiza koja uključuje visinske karte nekoliko nivoa. Nadalje, promatrano područje trebalo bi podijeliti na smislene cjeline temeljene na orografiji (Sherburn i Parker, 2014; Mikuš i sur., 2012). Drugi kriterij podjele može biti primjerice vrsta podloge. Tok topline, koji može biti povezan s konvekcijom, ovisi o vrsti podloge (Stull, 1988).

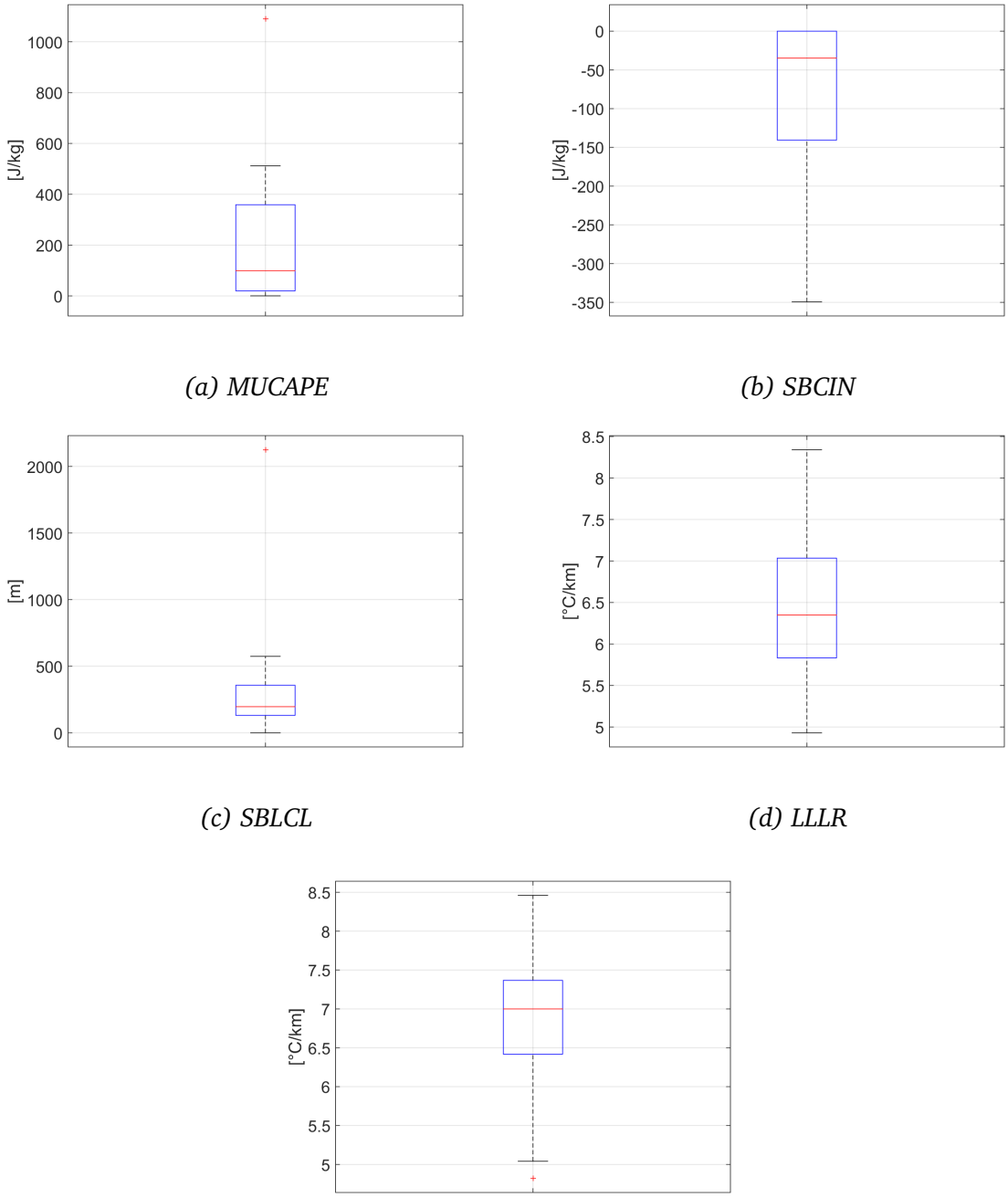
PSD se najčešće javlja u kombinaciji s hladnom frontom, a udio je 16 %-tni. Taj režim često se javlja i u odsutstvu fronti, u 12 % slučajeva. PSC je najčešći s hladnom i toplom frontom u postotnom iznosu od 8 % i 6 %. Cv uz hladnu frontu i frontu okluzije javio se u 8 % konvekcija. Ovi statistički podaci govore o tome kakve sinoptičke

okolnosti pogoduju razvoju konvekcije. Najčešće je zabilježen PSD s hladnom frontom – u 31 % analiziranih događaja. Slijede PSD s toplom frontom te događaji bez fronti sa zastupljenošću od 19 %. Ostale kombinacije javile su se u 6 % slučajeva. Navedeni rezultati mogli bi biti korisni u prognozi, no ne mogu poslužiti za razlikovanje situacija s tučom od kiše zbog drugih faktora koji imaju puno veći utjecaj na tip oborine.

3.3 Oluje tipa HSLC

Osnovne informacije i dosadašnja saznanja o HSLC olujama dana su u (1.4). Gotovo sve analize spomenutih oluja napravljene su za područje SAD-a. U ovom potpoglavlju dana je prva takva analiza za područje južne Europe. Izdvojene su oluje koje zadovoljavaju uvjet da imaju jako smicanje i mali CAPE prema Sherburnu i Parkeru (2014). Dobiveno je 14 takvih događaja s kišom i 5 s tučom. S obzirom na relativno mali broj oluja u HSLC okruženju, analizirani podaci nisu klasificirani prema oborini. Slika (3.9) prikazuje distribuciju parametara od interesa za proučavanje.

Iz razdiobe MUCAPE-a je očito da se uglavnom ne radi o uzdignutim konvekcijama jer su njegove vrijednosti bliske vrijednostima SBCAPE-a koji je manji od 500 J/kg. Tek u jednom slučaju MUCAPE prelazi vrijednost 1000 J/kg, no ni tada se ne radi o uzdignutoj konvekciji jer odgovarajući SBCIN iznosi -63 J/kg, a nivo kondenzacije relativno je nisko (SBLCL iznosi 161 m). Interkvartilni raspon SBCIN-a dvostruko je veći u odnosu na općenitu zimsku konvekciju. Razdioba SBLCL-a ukazuje na vlažne granične slojeve u HSLC okruženjima. Jedan slučaj tuče, kada je SBLCL bio jednak 2125 m, odstupa od tog pravila. Međutim ne radi se o uzdignutoj konvekciji. MUCAPE iznosio je 108 J/kg, a SBCIN -292 J/kg. Ovakvi slučajevi sasvim sigurno su rijetki, a fizikalni mehanizam nastanka vjerojatno je drugačiji od uobičajenog. Prema kriteriju za LLLR opisanom u (1.2), većina događaja spada u uvjetno nestabilne, manji dio u stabilne, a apsolutno nestabilnih nema. Razdioba LR3–6 slična je razdiobi LLLR-a uz nešto manji interkvartilni raspon. Srednja vrijednost omjera LR3–6 i LLLR-a iznosi 1.1 što opet znači da su slojevi u prosjeku gotovo jednako nestabilni.



(a) MUCAPE

(b) SBCIN

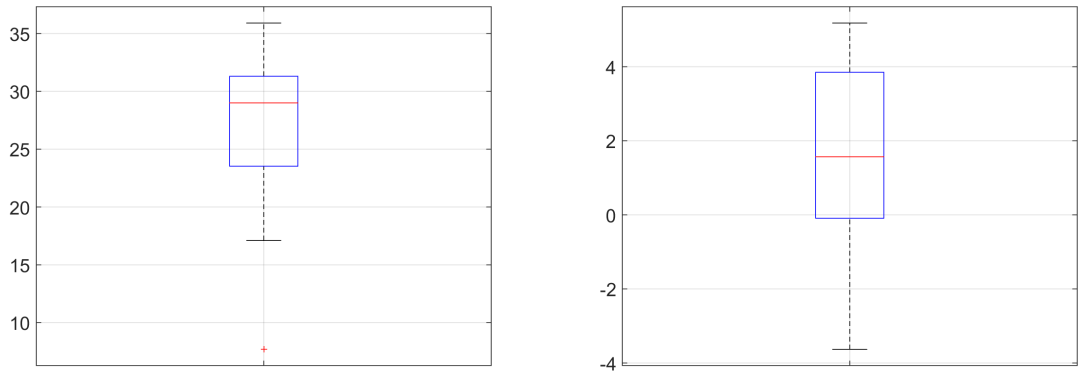
(c) SBLCL

(d) LLLR

(e) LR3–6

Slika 3.9: Termodinamički parametri za HSLC okruženja.

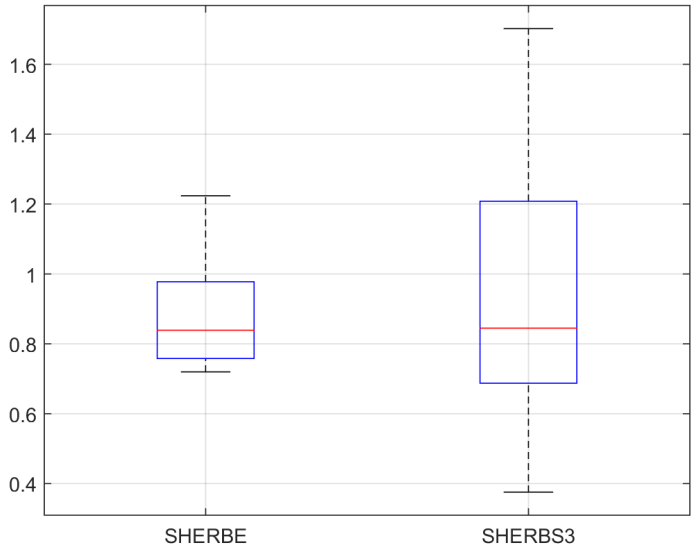
Razdioba indeksa nestabilnosti K i LI dana je na slici (3.10). K indeks ukazuje na nestabilnu atmosferu u kojoj je moguć razvoj konvektivnih sustava u većini analiziranih situacija. Varijabilnost mu je veća u odnosu na sve događaje zajedno. S obzirom 75 % slučajeva ima LI veći od 0, prema kriteriju iz tablice (1.2) ne možemo reći da je taj indeks pouzdan indikator nestabilnosti u promatranim slučajevima.



(a) K-indeks *(b) LI-indeks*

Slika 3.10: Distribucija klasičnih parametara za prognoziranje konvekcije primijenjenih na HSLC slučajeve.

Na slici (3.11) prikazana je distribucija parametara SHERB.



Slika 3.11: Distribucija SHERB parametara.

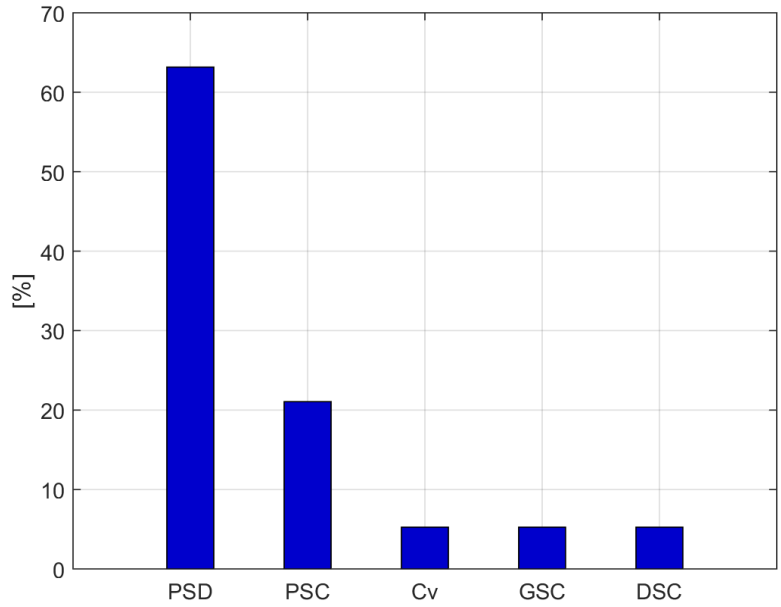
SHERBE je izračunat samo za 6 slučajeva jer u ostalima efektivna baza dotoka nije bila definirana. Iako se SHERBE nije pokazao uspješnim u ovoj analizi jer je u 75 % slučajeva rezultirao krivim opisom nestabilnosti atmosfere, nikako ga ne bi trebalo isključiti iz budućih sličnih analiza. 6 događaja sasvim sigurno nije dovoljno za donošenje zaključaka veće težine. Taj se parametar, naime, pokazao vrlo uspješnim u cijelom SAD-u što znači da se vjerojatno može primijeniti i u Europi. Na području SAD-a postoje vrlo različiti klimatski tipovi, orografska obilježja i sinoptičke okolnosti. Argument koji mu ide u prilog je da srednjak ovdje iznosi 0.89. Dakle, vjero-

jatno je problem samo u malom uzorku. SHERBS3 ima gotovo jednak medijan kao SHERBE. Iako je on dosta manji od 1, u 9 slučajeva, odnosno gotovo polovici uzorka, SHERBS3 bio je veći od 1. Prema tome, ovaj bi parametar dao dobru indikaciju za mogući razvoj konvekcije u 50 % slučajeva. Ekvivalentni su rezultat dobili Sherburn i Parker (2014) za područje SAD-a analizirajući prijavljene oluje. Manja varijabilnost SHERBE-a nije posebno korisna jer je previše vrijednosti manjih od granične. Tablica (3.3) sadrži podatke analize termodinamičkih parametara.

	q_1	m	q_3
MUCAPE [J/kg]	20	99	359
SBCIN [J/kg]	-141	-35	0
SBLCL [m]	131	196	357
LLLR [°C/km]	5.8	6.4	7.0
LR3-6 [°C/km]	6.4	7.0	7.4
K-indeks	23.5	29.0	31.3
LI-indeks	-0.09	1.57	3.85
SHERBE	0.76	0.84	0.98
SHERBS3	0.69	0.85	1.21

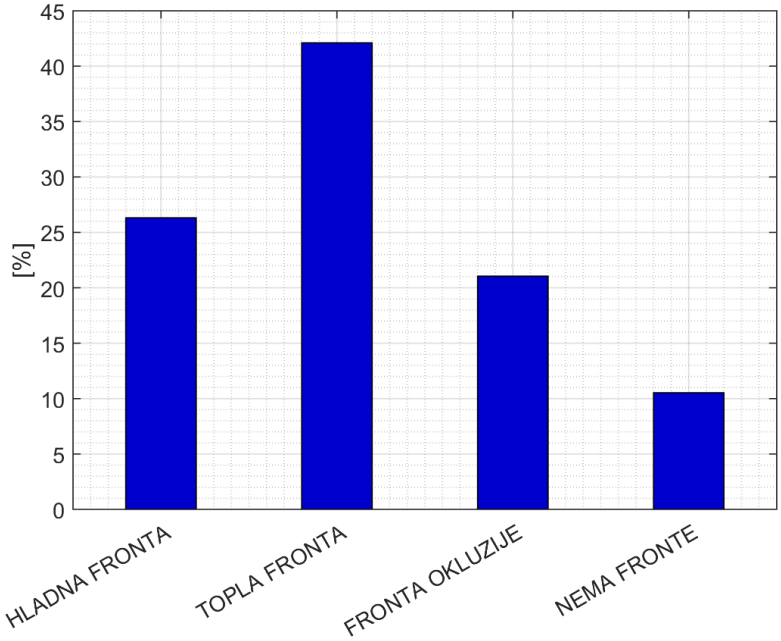
Tablica 3.3: Popis prvog kvartila, medijana i trećeg kvartila za izračunate parametre.

Na slici (3.12) dan je udio režima strujanja u ukupnom broju HSLC okruženja.



Slika 3.12: Zastupljenost visinskih režima strujanja u ukupnom broju HSLC slučajeva.

Najzastupljeniji je ponovno PSD koji se javio tri puta češće u odnosu na sljedeći režim po zastupljenosti, PSC. Nakon toga slijede Cv, GSC i DSC o čijoj eventualnoj važnosti u ovim sustavima ne možemo saznati mnogo zbog premalog uzorka. Slika (3.13) prikazuje udio frontalnih sustava.



Slika 3.13: Zastupljenost frontalnih sustava u ukupnom broju HSLC slučajeva.

Zanimljiv je rezultat da se topla fronta javila u 16 % slučajeva više. Ovo je bitno odstupanje u odnosu na prethodnu analizu. Kao najpreferiranije kombinacije pokazale su se topla fronta s PSD-om i PSC-om (21 % slučajeva) nakon čega slijedi PSD s hladnom frontom i okluzijom (16 % slučajeva).

Tablica (3.4) sadrže podatke režima strujanja na 500 hPa.

	Hl.	To.	Ok.	Ne.	Ukupno
PSD	3	4	3	2	12
PSC	0	4	0	0	4
Cv	0	0	1	0	1
GSC	1	0	0	0	1
DSC	1	0	0	0	1
Ukupno	5	8	4	2	19

Tablica 3.4: Rezultati analiza visinskih i prizemnih sinoptičkih situacija za HSLC slučajeve. Kratice su jednake onima u tablici (3.2).

4 Primjeri analize

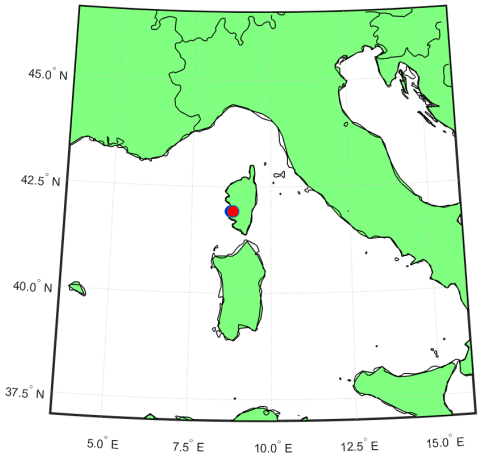
U ovom poglavlju analizirana su dva HSLC slučaja. Prvi od njih je oluja s velikom količinom kiše zabilježena 17.11.2014., a drugi oluja praćena tučom 7.3.2018. To je napravljeno da bi se pobliže objasnile metode za analizu svih događaja. Popis termodinamičkih parametara i indeksa analiziranih oluja nalazi se u tablici (4.1).

	17.11.2014.	7.3.2018.
SBCAPE [J/kg]	63	365
MLCAPE [J/kg]	760	326
MUCAPE [J/kg]	1091	431
SBCIN [J/kg]	-63	-35
SBLCL [m]	161	444
LLLR [°C/km]	6.2	7.6
LR3–6 [°C/km]	7.0	7.8
BS0–1 [m/s]	10.3	8.4
BS0–3 [m/s]	18.9	10.2
BS0–6 [m/s]	19.5	20.0
K-indeks	33.8	29.0
LI-indeks	-0.10	-3.63
SHERBE	1.22	0.98
SHERBS3	1.09	0.80

Tablica 4.1: Termodinamički parametri i indeksi za analizirane oluje.

4.1 Prvi slučaj: 17.11.2014.

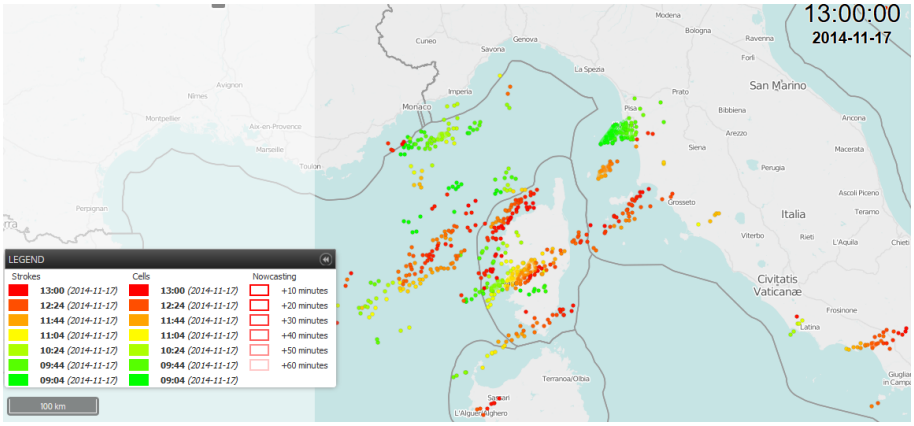
HSLC oluja s intenzivnom kišnom oborinom zabilježena je u Ajacciu u 11:30 UTC. Korištena reprezentativna sondaža vršila se u Ajacciu u 12:00 UTC. Geografski položaji oluje i sondaže prikazani su na slici (4.1). SBCAPE je iznosio 63 J/kg, a BS0–6 19.5 m/s što znači da se radilo o oluji tipa HSLC. U višim slojevima atmosfere postojale su česti s izraženijom nestabilnosšću na što upućuje MUCAPE od 1091 J/kg. SBLCL nalazio se na visini od 161 m što je dosta nisko. Dakle, granični sloj bio je poprilično vlažan. K-indeks s vrijednošću 33.8 ukazuje na nestabilnu atmosferu s mogućnošću razvoja lokalnih olujnih sustava. To se dobro slaže sa slikom (4.2) na kojoj se vidi nekoliko konvektivnih sustava razmaknutih prostorno i vremenski. Vrijednost LI-indeksa je -0.1 što ne ukazuje na značajnu nestabilnost. To je u skladu s rečenim o LI-indeksu u slučajevima kiše u (3.1).



Slika 4.1: Geografski položaj analizirane oluje (označen plavim kružićem) i reprezentativne sondaže (označen crvenim kružićem).

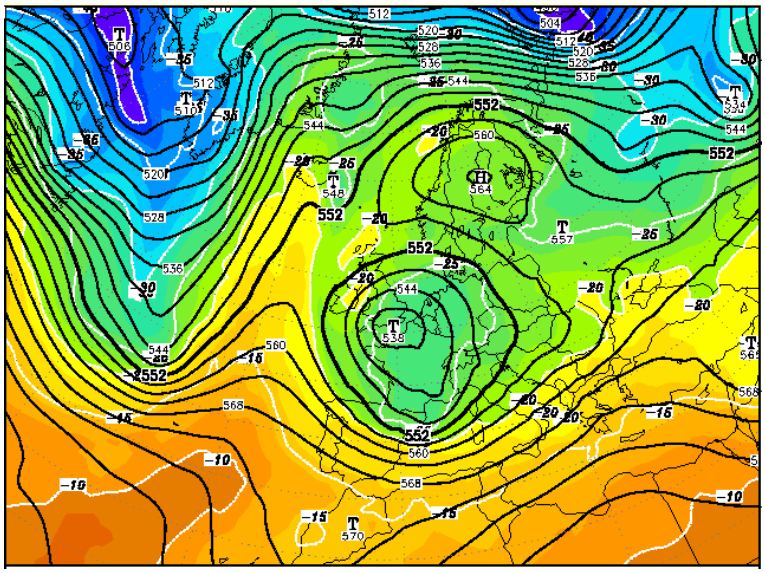
SHERBE i SHERBS3 s iznosima 1.22 i 1.09 u ovom su se slučaju pokazali izvrsnim parametrima za procjenu olujnog karaktera konvekcije.

Slika (4.2) prikazuje prostorni i vremenski raspored munja. U trenutku kada je događaj zabilježen i kada je vršeno radiosondažno mjerenje, u užem području oko Ajaccia detektiran je relativno velik broj munja. Prema tome, sasvim sigurno se radi o konvektivnim procesima. Sa slike (4.2) nije moguće odrediti putanju konvektivnog sustava na temelju prostorno-vremenske razdiobe jer nije uočljiva pravilnost u javljanju električnih izboja.



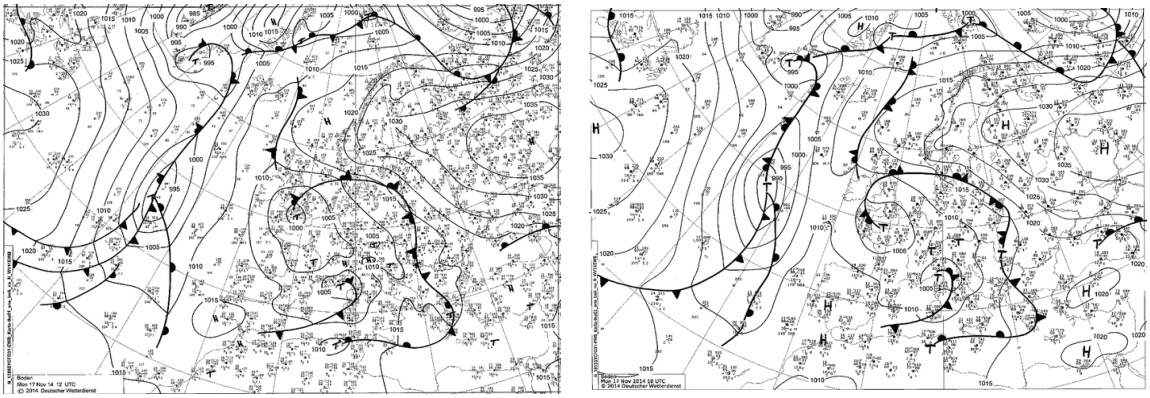
Slika 4.2: Prostorna i vremenska razdioba munja 17.11.2014.

S visinske sinoptičke karte na slici (4.3) vidimo da se radi o prednjoj strani ciklone. Centar visinske ciklone smješten je na području između Francuske i Velike Britanije. Topao, vlažan i nestabilan zrak pritječe s jugozapada prema Korzici nad kojom se generira konvekcija.



Slika 4.3: Visinska sinoptička karta 17.11.2014. u 12:00 UTC.

Na slici (4.4) dana je prizemna sinoptička karta u 12:00 UTC (4.4a) i 18:00 UTC (4.4b). U 12:00 UTC hladna fronta proteže se duž cijele Korzike, a završava jugozapadno od otoka. U sjevernom sektoru fronte stvara se okluzija. U 18:00 UTC hladna fronta više nije nad otokom, što znači da je između dva termina prošla preko njega pa samim time i Ajaccia. Okluzija je izraženija, a fronta se premješta na sjeveroistok.

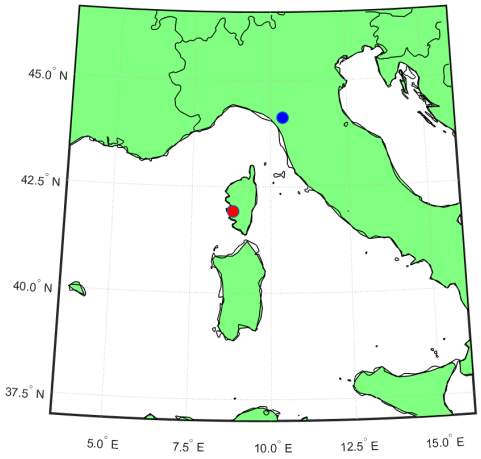


(a) 12:00 UTC *(b) 18:00 UTC*

Slika 4.4: Prizemne sinoptičke karte 17.11.2014. u dva uzastopna termina.

4.2 Drugi slučaj: 7.3.2018.

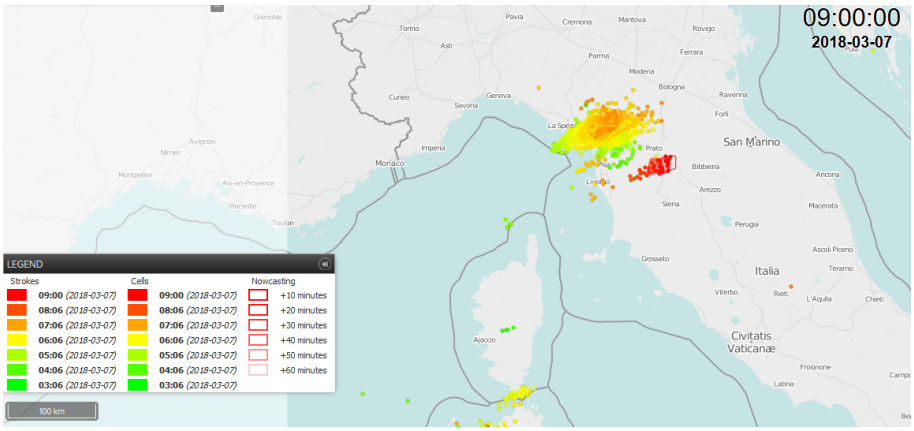
HSLC oluja praćena tučom zabilježena je u mjestu Castelnuovo di Garfagnana u 06:30 UTC. Korištena reprezentativna sondaža vršila se u Ajacciu u 00:00 UTC. Geografski položaj oluje i sondaže prikazan je na slici (4.5).



Slika 4.5: Geografski položaj analizirane oluje (označen plavim kružićem) i reprezentativne sondaže (označen crvenim kružićem).

SBCAPE je iznosio 365 J/kg, a BS0–6 20.0 m/s što potvrđuje da je oluja bila tipa HSLC. MUCAPE je 2.5 puta manji od onoga u prethodnom slučaju. CIN je također gotovo upola manji. Treba biti oprezan s interpretacijom CAPE-a u olujama tipa HSLC. Naime, iz definicije spomenute u (1.2) slijedi da je CAPE proporcionalan vertikalnoj brzini česti zraka. Međutim, očekivana vertikalna brzina u slučaju tuče je veća nego u slučaju kiše jer samo intenzivna vertikalna gibanja mogu uzrokovati stvaranje ledene oborine (Ilotoviz i sur., 2018). Prema tome i CAPE bi trebao biti veći u slučaju tuče, no to nije tako. Razlog je vjerojatno u tome što je CAPE mjera za potencijalnu energiju, a ne kinetičku. Da bi došlo do transformacije potencijalne energije u kinetičku moraju biti ispunjeni određeni fizikalni uvjeti što nije uvijek slučaj. SBLCL iznosi 444 m što znači da je granični sloj bitno manje vlažan u odnosu na prethodni slučaj, ali je nestabilnost veća. K-indeks i LI-indeks pokazali su se dobrima u opisu nestabilnosti atmosfere. Ovdje je potvrđena teza iz 3.1 o tome da LI-indeks bolje opisuje stanje u slučaju tuče. SHERBE se i ovdje pokazao uspješnim što je dobra motivacija za daljnja proučavanja oluja ovog tipa i razvoj novih parametara.

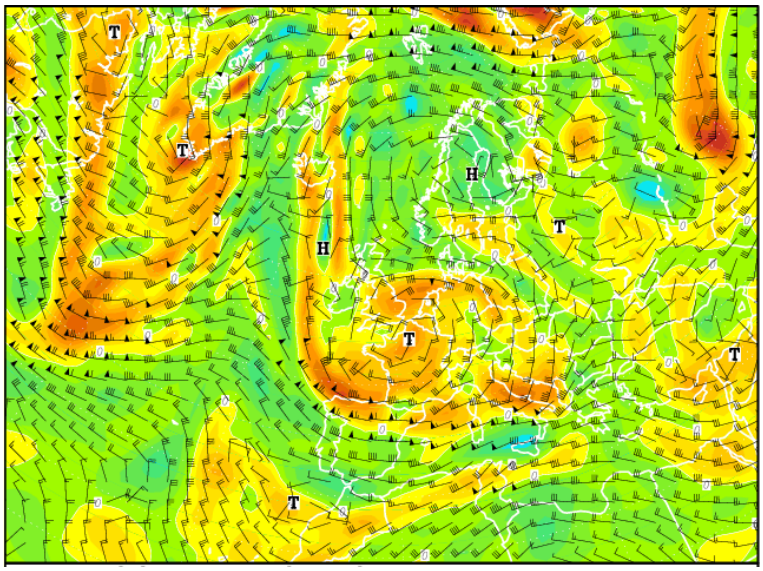
Slika (4.6) prikazuje prostorni i vremenski raspored munja nad područjem oko mjesta gdje je zabilježena oluja. Za razliku od prethodnog primjera, munje su puno lokaliziranije. Nad Apeninskim poluotokom mogu se uočiti dva konvektivna sustava. Veći sustav egzistirao je više od tri sata. Manji sustav, južno od njega, zadržao se kraće, a većina munja bila je zabilježena oko 9 sati.



Slika 4.6: Prostorna i vremenska razdioba munja 7.3.2018.

Nad Ajacciom su zabilježene tek tri munje što nije dovoljan broj za dijagnosticiranje konvektivnog sustava prema Rasmussenu (1998).

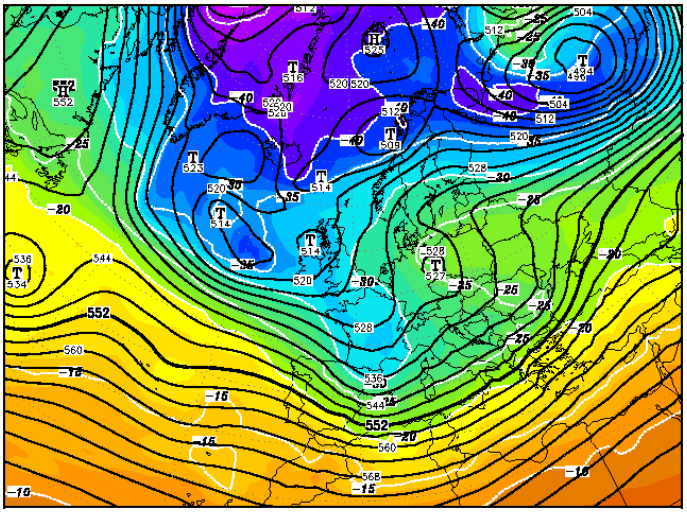
Na slici (4.7) prikazan je vjetar na 500 hPa.



Slika 4.7: Visinska sinoptička karta vjetra na 500 hPa 17.11.2014. u 00:00 UTC.

Vjetar nad mjestom gdje je vršeno radiosondažno mjerenje (Ajaccio) bio je pretežno zapadni s vrlo blagom južnom komponentom. Analizom kutova može se zaključiti da je mjesto gdje je zabilježena oluja (Castelnuovo di Garfagnana) dio kuta $\pm 75°$ u odnosu na smjeru vjetra u Ajacciu. Nadalje, uvažavajući sva mjesta u kojima se vrše radiosondažna mjerenja sa slike (2.5) očito je da je Ajaccio jedino mjesto koje zadovoljava kriterij.

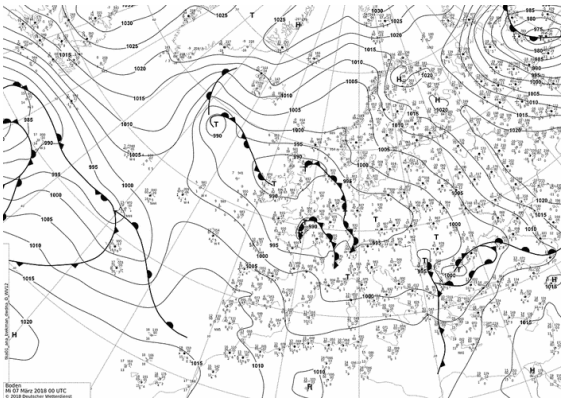
Na visinskoj sinoptičkoj karti, na slici (4.8), nalazi se dolina u polju tlaka čija os prolazi Sredozemljem. Sjevernije os doline zakreće prema Apeninskom poluotoku.



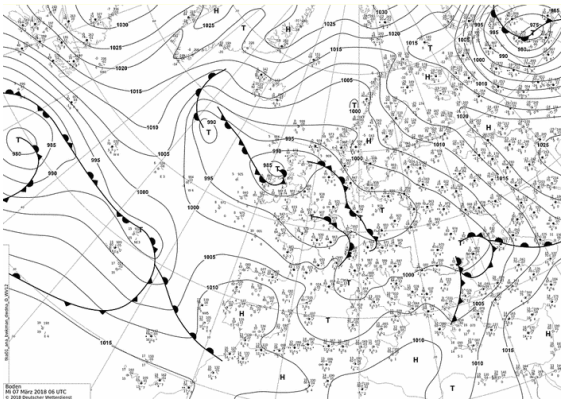
Slika 4.8: Visinska sinoptička karta 17.11.2014. u 06:00 UTC.

Mjesto u kojem je zabilježena oluja i u kojem je vršeno radiosondažno mjerenje nalaze se pod utjecajem prednje strane doline odnosno jugozapadnog strujanja. Relativno topliji, vlažniji i uvjetno nestabilan zrak sa Sredozemlja prilazi Apeninskom poluotoku gdje vjerojatno zbog orografske prepreke dolazi do razvoja konvekcije.

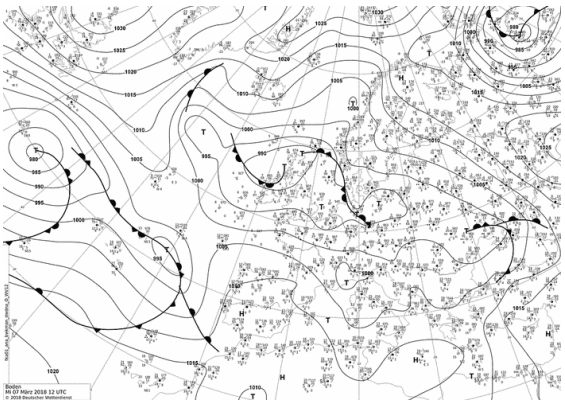
Slika (4.9) prikazuje prizemne sinoptičke karte u tri uzastopna termina.



(a) 00:00 UTC



(b) 06:00 UTC



(c) 12:00 UTC

Slika 4.9: Prizemne sinoptičke karte 17.11.2014. u tri uzastopna termina.

U 00:00 UTC vidljiva su tri frontalna sustava nad širim područjem Apenina. Istočno od Hrvatske nalazi se složeni frontalni sustav sastavljen od hladne i tople fronte te okluzije. U sljedećim terminima, taj sustav odmiče na istok, a cikolgeneza jača. Nadalje, u 00:00 UTC dvije fronte okluzije nalaze se sjeverno od Alpa i odmiču se na sjeveroistok. Iz toga slijedi da nijedan frontalni sustav nije povezan s generiranjem konvekcije u ovom slučaju.

5 Zaključak

Cilj ovog rada bio je proučiti karakteristike konvektivnih oluja nad južnom Europom u hladnom dijelu godine. Obrađeno je 50 slučajeva intenzivne kišne oborine i 16 oluja praćenih tučom. U usporedbi s početnim 191 slučajem odabranim iz ESWD baze, može se zaključiti da u hladnom dijelu godine konvektivne oluje s intenzivnom kišom ili tučom nisu česte, već je češći oblik stratiformna kišna oborina. Rezultati analize termodinamičkih uvjeta govore da su vrijednosti CAPE-a relativno male, no veće u odnosu na središnju Europu u istoj sezoni. Baze oluja prilično su niske, a granični slojevi vlažni. Nijedan obrađeni konvektivni sustav nije se razvio u apsolutno nestabilnom okruženju. Otprilike polovica slučajeva karakterizirana je visokim smicanjem u sloju do visine 6 km. K-indeks pokazao se dosta uspješnim parametrom u opisu nestabilnosti atmosfere prilikom zimske konvekcije, a pogotovo situacija s intenzivnom kišom. LI-indeks je lošiji.

Analiza visinskog sinoptičkog stanja pokazuje da se konvektivni sustavi zimi najčešće javljaju u sklopu jugozapadnog strujanja. Iako je takvo strujanje najčešće bilo zabilježeno i ljeti nad Hrvatskom, postotni odnosi bitno su drugačiji. Nadalje, ostali režimi koji su u velikoj mjeri zastupljeni ljeti, zimi se uopće ne javljaju kao dio konvektivnog okruženja. Prizemna analiza ukazuje na najveću zastupljenost hladne fronte u slučaju kiše. Tuča se najčešće javila prilikom prolaska hladne fronte ili kada fronte nije bilo. Iako su navedeni frontalni sustavi bili najzastupljeniji, rezultati prizemne analize nisu pouzdani zbog relativno bliskih postotnih vrijednosti što može biti posljedica malog uzorka. Najčešća kombinacija bila je prednja strana doline s hladnom frontom pri tlu.

Sljedeći glavni cilj ovog rada bio je po prvi puta proučiti HSLC oluje nad južnom Europom. Od svih obrađenih događaja, njih 19 (29 %) zadovoljava kriterij visokog smicanja i niskog CAPE-a. I ove oluje imaju niske baze s vlažnim graničnim slojevima. K-indeks pokazao se dosta uspješnim u opisu stanja atmosfere tijekom HSLC konvekcije, dok bi LI-indeks trebalo izbjegavati u njegovoj originalnoj formi. SHERBE i SHERBS3 su relativno novi parametri. Za oluje nad južnom Europom prvi puta su testirani u ovom radu. Neki od dobivenih rezultata idu u prilog korištenju ovih dvaju parametara. Procjenu za konačnu odluku o njihovoj široj uporabi trebala bi dati istraživanja s većim uzorcima.

Prednja strana doline najčešći je režim u HSLC okruženjima. Topla fronta najčešći je prizemni sustav što je bitno drugačiji rezultat od onoga za općenitu zimsku konvekciju. PSD s toplom frontom pri tlu najpreferiranija je kombinacija.

Literatura

[1] H. D. Betz, K. Schmidt, P. Laroche, P. Blanchet, W. P. Oettinger, E. Defer, Z. Dziewit, J. Konarski: LINET-—An international lightning detection network in Europe // Atmospheric Research, 2009. god., vol. 91, 564–573.

[2] W. G. Blumberg, K. T. Halbert, T. A. Supinie, P. T. Marshsh, R. L. Thohompsoson, J. A. Hart: SHARPpy An Open-Source Sounding Analysis Toolkit for the Atmospheric Sciences // Bulletin of the American Meteorological Society, 2017. god., 1625–1636.

[3] G. H. Bryan, J. M. Fritsch: Moist Absolute Instability: The Sixth Static Stability State // Bulletin of the American Meteorological Society, 2000. god., vol. 81, 1207–1230.

[4] M. J. Bunkers, B. A. Klimowski, J. W. Zeitler: The Importance of Parcel Choice and the Measure of Vertical Wind Shear in Evaluating the Convective Environment // 21st Conf. on Severe Local Storms, At San Antonio, TX, 2002. god.

[5] J. P. Craven, H. E. Brooks, J. A. Hart1: Baseline Climatology of Sounding Derived Parameters Associated with Deep, Moist Convection // National Weather Digest, 2004. god., vol. 28, 13–24.

[6] A. R. Dean, R. S. Schneider: Forecast challenges at the NWS Storm Prediction Center relating to the frequency of favorable severe storm environments. // 24th Conf. on Severe Local Storms, Savannah, GA, 2008. god.

[7] P. Devuyst, 1972: La meteorologie. Albert De Visscher, Bruxelles., 164. str.

[8] C. A. Doswell III, H. E. Brooks, Robert A. Maddox: Flash Flood Forecasting: An Ingredients-Based Methodology // Weather and Forecasting, 1996. god., vol.11, 560–581.

[9] C. A. Doswell III, D. M. Schultz: On the use of indices and parameters in forecasting severe storms // Electronic J. Severe Storms Meteor., , 2006. god., 1(3), 1-–22.

[10] B. Grisogono, D. Belušić: Uvod u mezoskalnu meteorologiju i atmosfersku turbulenciju // interna skripta Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, 2015. god., 66–75.

[11] J. R. Holton: An Introduction to Dynamic Meteorology // Elsevier Academic Press, 2004. god., 51–53., 295–299.

[12] H. Höller, H.-D. Betz, K. Schmidt, R.V. Calheiros, P. May, et al.: Lightning characteristics observed by a VLF/LF lightning detection network (LINET) in Brazil, Australia, Africa and Germany // Atmospheric Chemistry and Physics, European Geosciences Union, 2009. god., vol. 9, 7795–7824.

[13] K Horvath, Y. Lin, Branka Ivančan-Picek: Classification of Cyclone Tracks over the Apennines and the Adriatic Sea // Monthly Weather Review, 2008. god., vol. 136, 2210–2227.

[14] E. Ilotoviz, A. Khain, A. V. Ryzhkov, J. C. Snyder: Relationship between Aerosols, Hail Microphysics, and Z_{DR} Columns // Journal of the Atmospheric Sciences, 2018. god., vol. 75, 1755–1781.

[15] L. Kolendowicz, M. Taszarek, B. Czernecki: Atmospheric circulation and sounding-derived parameters associated with thunderstorm occurrence in Central Europe // Atmospheric Research, 2017. god., vol. 191, 101–114.

[16] B. Lovrić: Sinoptičke i termodinamičke karakteristike linijski organizirane konvekcije nad Hrvatskom // Diplomski rad, Zagreb, 2018. god., 14. str.

[17] P. Markowski, Y. Richardson: Mesoscale Meteorology in Midlatitudes // Wiley-Blackwell, 2010. god., 32–35., 183–198.

[18] E. W. McCaul jr., M. L. Weisman: The Sensitivity of Simulated Supercell Structure and Intensity to Variations in the Shapes of Environmental Buoyancy and Shear Profiles // Monthly Weather Review, 2001. god., vol. 129, 664–687.

[19] P. Mikuš, N. S. Mahović: Characteristics of Lightning Activity in Deep Convective Clouds with the Overshooting Tops // Hrvatski meteorološki časopis – Croatian Meteorological Journal, 2012. god., vol. 47, 45–55

[20] P. Mikuš, M. T. Prtenjak, N. S. Mahović: Analysis of the convective activity and its synoptic background over Croatia // Atmospheric Research, 2012. god., vol. 104–105, 139–153.

[21] K. Pandžić: Analiza meteoroloških polja i sustava // Hinus, Zagreb, 2002. god., 199–202.; 217–229.

[22] W. Pilorz, I. Laskowski, E. Łupikasza, M. Taszarek: Wind Shear and the Strength of Severe Convective Phenomena—Preliminary Results from Poland in 2011–2015 // Climate, vol. 51, 2016. god.

[23] G. Poljak, M. T. Prtenjak, M. Kvakić, N. Strelec Mahović, and K. Babić: Wind patterns associated with the development of daytime thunderstorms over Istria // Ann. Geophys., 2014. god., vol. 32, 401-–420.

[24] T. Pučik, P. Groenemeijer, D. Rýva, M. Kolář: Proximity Soundings of Severe and Nonsevere Thunderstorms in Central Europe // Monthly Weather Review, 2015. god., vol. 143, 4805–4821.

[25] E. N. Rasmussen, David O. Blanchard: A Baseline Climatology of Sounding-Derived Supercell and Tornado Forecast Parameters // Weather and Forecasting, 1998. god., vol. 13, 1148–1164.

[26] R. M. Reap: Analysis and prediction of lightning strike distributions associated with synoptic map types over Florida // Monthly Weather Review, 1994. god., vol. 122, 1698–1715.

[27] T. Renko, J. Kuzmić, V. Šoljan, N. S. Mahović: Waterspouts in the Eastern Adriatic from 2001 to 2013 // Natural Hazards, 2016. god., vol. 82, 441–470.

[28] O. Rodríguez, J. Bech: Sounding-derived parameters associated with tornadic storms in Catalonia // International Journal of Climatology, 2018. god., vol. 38, 2400–2414.

[29] D. M. Schultz, P. N. Schumacher, C. A. Doswell III: The Intricacies of Instabilities // Monthly Weather Review, 2000. god., vol. 128, 4143–4148.

[30] K. D. Sherburn, M. D. Parker: Climatology and Ingredients of Significant Severe Convection in High-Shear, Low-CAPE Environments // Weather and Forecasting, 2014. god., vol. 29, 854–877.

[31] K. D. Sherburn, M. D. Parker, J. R. King, G. M. Lackmann: Composite Environments of Severe and Nonsevere High-Shear, Low-CAPE Convective Events // Weather and Forecasting, 2016. god., vol. 31, 1899–1927.

[32] R. B. Stull: An Introduction to Boundary Layer Meteorology // Kluwer Academic Publishers, 2003. god., 272–275.

[33] M. Taszarek, H. E. Brooks, B. Czernecki, P. Szuster, K. Fortuniak: Climatological Aspects of Convective Parameters over Europe: A Comparison of ERA-Interim and Sounding Data // Journal of Climate, vol. 31, 2018. god., 4281–4308.