

# Sinoptičke i termodinamičke karakteristike linijski organizirane konvekcije nad Hrvatskom

---

Lovrić, Branimir

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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:217:502515>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-22**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Branimir Lovrić

SINOPTIČKE I TERMODINAMIČKE  
KARAKTERISTIKE LINIJSKI  
ORGANIZIRANE KONVEKCIJE NAD  
HRVATSKOM

Diplomski rad

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOLOGRAFIJA

**Branimir Lovrić**

Diplomski rad

**Sinoptičke i termodinamičke  
karakteristike linijski organizirane  
konvekcije nad Hrvatskom**

Voditeljica: doc. dr. sc. Nataša Strelec Mahović

Zagreb, 2018.

*Zahvaljujem svojoj mentorici, doc. dr. sc. Nataši Strelec Mahović, na velikom uloženom trudu, vremenu i savjetima pri istraživanju i pisanju ovog rada.*

*Zahvaljujem dr. sc. Petri Mikuš Jurković na velikoj pomoći i dragocjenim savjetima koji su me vodili od početka istraživanja do samih rezultata i prve verzije rada.*

*Također zahvaljujem dipl. ing. Vinku Šoljanu na pomoći oko obrade radiosondažnih podataka i izračuna indeksa nestabilnosti.*

*Zahvaljujem i članovima komisije, doc. dr. sc. Željku Večenaju i mr. sc. Ines Ivančić, na sugestijama i ispravkama, te djelatnicima Državnog hidrometeorološkog zavoda na ustupljenim računalnim meteorološkim sučeljima.*

## Sadržaj

|   |    |
|---|----|
| 1. Uvod .....   | 1  |
| 1.1. Konvekcija .....   | 1  |
| 1.2. Organizirana konvekcija .....  | 2  |
| 1.3. Linijski organizirana konvekcija .....   | 3  |
| 1.3.1. Radarske karakteristike .....  | 6  |
| 1.3.2. Termodinamičke karakteristike .....  | 8  |
| 1.4. Osobitosti grmljavinske aktivnosti u Hrvatskoj .....                                   | 10 |
| 2. Podaci i metode .....  | 12 |
| 2.1. Radari .....   | 12 |
| 2.2. LINET – podaci o munjama .....   | 13 |
| 2.3. Tipovi vremena .....   | 14 |
| 2.4. Indeksi nestabilnosti .....  | 15 |
| 3. Rezultati .....  | 17 |
| 3.1. Vrste i karakteristike linijski organiziranih konvektivnih sustava nad Hrvatskom ..... | 17 |
| 3.2. Tipovi vremena i režim strujanja .....   | 22 |
| 3.3. Termodinamička svojstva .....  | 32 |
| 3.3.1. Konvektivna raspoloživa potencijalna energija (CAPE) .....                           | 32 |
| 3.3.2. Vertikalno smicanje vjetra .....   | 36 |
| 3.3.3. Bulk Richardsonov broj .....   | 39 |
| 4. Prikaz slučajeva linijski organiziranih konvektivnih sustava .....                       | 43 |
| 4.1. Prvi slučaj (28. lipnja 2017.) .....   | 43 |
| 4.2. Drugi slučaj (10. kolovoza 2017.) .....  | 47 |
| 5. Zaključak .....  | 52 |
| 6. Sažetak .....  | 54 |
| 7. Literatura .....   | 55 |
| Dodatak A (prizemna sinoptička situacija) .....   | 59 |
| Dodatak B (visinska sinoptička situacija) .....   | 61 |

## 1. Uvod

Izvantropska linijski organizirana konvekcija za posljedicu ima obilnu kišu, jak vjetar, grmljavinu i čestu tuču, a sporopokretni sustavi mogu prouzročiti poplave (Hane, 1986). Republika Hrvatska smještena je u području umjerenih geografskih širina gdje su vremenske prilike određene utjecajem Jadranskog mora, otvorenosti prema srednjoeuropskom kopnu te prevladavajućim zapadnim strujanjima koja donose vlagu i oborinu. Bitnu ulogu ima lokalni utjecaj Dinarida (Zaninović i sur., 2008). Linijski organizirana konvekcija javlja se češće nad kontinentalnim dijelom Hrvatske (Strelec Mahović i sur., 2007), iako zbog nedostatka radarskih podataka nad Jadranom nije moguće istražiti učestalost takvih sustava na području Jadrana i priobalja.

Cilj ovog rada je istražiti u kojim se sinoptičkim uvjetima linijski organizirana konvekcija formira nad Hrvatskom i koje su njene termodinamičke značajke, postupno prelazeći sa sinoptičke skale na mezoskalu.

### 1.1. Konvekcija

Konvekcija je gibanje fluida u gravitacijskom polju zbog razlike u gustoći fluida. Atmosferska konvekcija je podizanje mase toplijeg (rjeđeg) i nestabilnog zraka duž gravitacijskog vektora u više slojeve atmosfere (Emanuel, 1994). Atmosferska konvekcija postoji na svim skalama – mikroskali, mezoskali i makroskali (i sinoptičkoj podskali), te na njihovim prijelazima, čineći je vrlo složenim atmosferskim procesom. Obuhvaća čitav niz atmosferskih fenomena, od atmosferskog graničnog sloja do dinamike uragana (Emanuel, 1994). Atmosferska konvekcija se dijeli na suhu i mokru, te plitku i duboku (Davidson, NCEP, 1999). Suha konvekcija je ona koja ne dovodi do nastanka oblaka i oborine, za razliku od mokre. U plitkoj konvekciji masa zraka ne diže se iznad 500 hPa, dok se u dubokoj konvekciji zrak diže iz nižih slojeva atmosfere iznad 500 hPa (Davidson, NCEP, 1999).

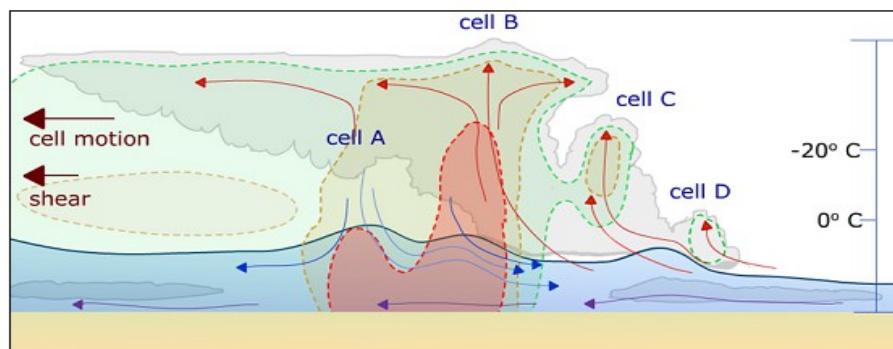
U ovom radu pod pojmom konvekcija podrazumijeva se duboka mokra konvekcija. To je trodimenzionalni turbulentni nehidrostatički proces u kojem ne vrijedi Boussinesqova aproksimacija. Ona rezultira formiranjem olujnih oblaka, kumulonimbusa (slika 1) (Grisogono, Belušić i sur., 2015). Za duboku mokru konvekciju moraju biti zadovoljena tri uvjeta: dizanje zraka, nestabilnost i dovoljno vlažnosti (Davidson, NCEP, 1999). Duboka mokra konvekcija je mezoskalna pojava. Sila gradijenta tlaka uravnotežena je advektivnom i konvektivnom akceleracijom, ali i divergencijom turbulentnih tokova (Grisogono, Belušić i sur., 2015). Mezoskalna dinamika obuhvaća horizontalnu skalu od 10 do 1000 km (Holton, 2004).



Slika 1. Kumulonimbus s prepucavajućim vrhom iznad Hells Canyon-a, 3.lipnja 2014.  
 Izvor: Cameraeye T6S, Cumulonimbus  
<https://www.flickr.com/photos/27434783@N02/14362622023/in/photolist>

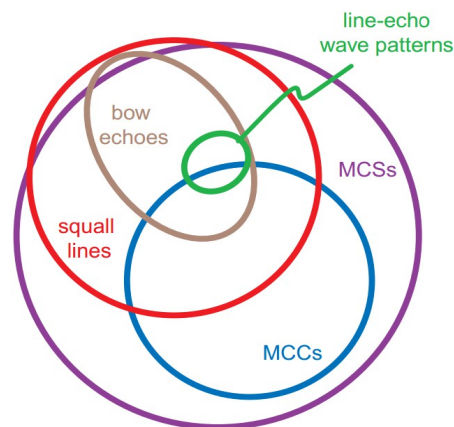
### 1.2. Organizirana konvekcija

Na mezoskali se često susreće pojam "konvektivne ćelije". To su horizontalno smještene jezgre velike radarske reflektivnosti, koje u vertikalnom presjeku izgledaju poput visokih tankih stupova. Povezane su s jakim vertikalnim kretanjima u mladoj, aktivnoj konvekciji (Houze, 1997). Konvektivne ćelije mogu se javiti u tri različita tipa, ovisno o jačini vertikalnog smicanja vjetra u donja četiri kilometra atmosfere: kao *jedinične ćelije*, *multićelije* i *superćelije* (Grisogono, Belušić i sur., 2015). Jedinične ćelije su pojedinačni manji kumulonimbusi i kumululus kongestusi koji nastaju pri slabom vertikalnom smicanju vjetra (manjem od 10 m/s u donja 4 km), manjih su dimenzija i kratkog vijeka trajanja. Druga dva tipa ćelija, multićelije i superćelije, nastaju pri umjereno jakom i vrlo jakom smicanju vjetra. Multićelije (slika 2) se formiraju pri smicanju vjetra od 10 do 20 m/s, a superćelije pri smicanju jednakom ili većem od 20 m/s u donja 4 km atmosfere. (Grisogono, Belušić i sur., 2015). Tada govorimo o *organiziranoj konvekciji* (Weather World 2010 project).



Slika 2. Vertikalni presjek multićelijske oluje. Pojedine ćelije u različitim stadijima razvoja prikazane su različitim bojama. Izvor: NOAA, Internet

Jedan od oblika organizirane duboke mokre konvekcije je mezoskalni konvektivni sustav (engl. mesoscale convective system, skraćeno MCS) (Grisogono, Belušić i sur., 2015). MCS je sustav olujnih oblaka, kumulonimbusa, koji stvara izdvojeno oborinsko područje horizontalnih dimenzija jednakih ili većih od 100 km, u najmanje jednom smjeru (Houze, 2004). MCS-ovi su najveće konvektivne oluje. Formiraju se kada se oblaci zbog konvektivne nestabilnosti spajaju i organiziraju u jedan oblačni sustav. MCS-ovi se javljaju u različitim oblicima. Velikim udjelom pridonose oborini kako u tropima tako i u toplijim područjima umjerenih širina. Takvi sustavi često donose poplave, tuču, jake vjetrove, pa čak i tornada (Houze, 2004). MCS-ove različiti autori različito dijele. Grisogono, Belušić i suradnici (2015.) navode da se u MCS ubrajaju mezoskalni konvektivni kompleks (engl. mesoscale convective complex, skraćeno MCC), "olujne pruge" (engl. squall lines), tropske ciklone i konvektivne oblačne nakupine. Mezoskalni konvektivni kompleksi javljaju se u izvantropskim širinama, "olujne pruge" u izvantropskim širinama i tropima, a tropske ciklone i konvektivne oblačne nakupine isključivo u tropima (Grisogono, Belušić i sur., 2015). Markowski i Richardson (2010.) navode podjelu MCS-ova na kvazilinearne konvektivne sustave (squall lines), "bow echo" sustave, "line-echo wave pattern" sustave (LEWP) i mezoskalne konvektivne komplekse (MCC). "Bow echo" sustavi su podvrsta kvazilinearnih konvektivnih sustava koji na radaru imaju strukturu luka. Više takvih lukova uklopljenih u liniju čini "line-echo wave pattern". Dio kvazilinearnih konvektivnih sustava sustava ubraja se u mezoskalni konvektivni kompleks (slika 3).



Slika 3. Klasifikacija mezoskalnih konvektivnih sustava. Izvor: Markowski i Richardson (2010)

### 1.3. Linijski organizirana konvekcija

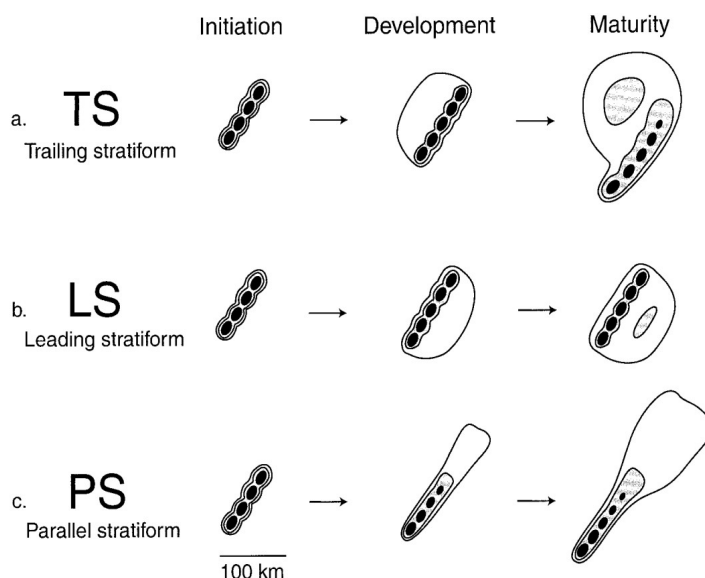
Pod pojmom *linijski organizirane konvekcije* podrazumijevamo *linijski orijentiran mezoskalni konvektivni sustav*. U literaturi i šire često se koristi riječ "squall line". Taj su naziv u početku koristili francuski pomorci za linijski orijentirane olujne vjetrove



(Bluestein i Jain, 1985). Prije razvoja frontalne teorije označavao je hladnu frontu, da bi se kasnije koristio za konvektivne linije koje nisu povezane s atmosferskim frontama. Nakon toga u upotrebu je ušao naziv linije nestabilnosti, a sam naziv "squall lines" koristio se za razvijene linije nestabilnosti. Kasnije se shvatilo da "squall line" može biti povezan sa sinoptičkim frontama. U njega su Houze i Zipser 1977. uključili stratiformnu oborinu i hladni zrak iza udarne fronte (Bluestein i Jain, 1985). U novijim radovima koristi se i naziv kvazilinearni konvektivni sustav (skraćeno QLCS, od engl. quasi-linear convective system). Taj naziv upotrebljavaju npr. Weisman i Davis (1998.), te Wheatley i Trapp (2008.).

Zbog nespretnosti u prijevodu i različitom tumačenju pojma "squall line", u ovom radu za linijski organiziranu konvekciju koristit će se naziv *linijski organizirani konvektivni sustav*, skraćeno *LOKS*. Bluestein i Jain (1985.) u svom članku o LOKS-ovima nad Oklahomom navode kako se jači oblici ovih sustava mogu sastojati i od superćelija, a slabiji od jediničnih ćelija. LOKS-ovi su uglavnom multićelije organizirane u grupe i kao takvi predstavljaju olujnu mezoskalnu frontu (Grisogono, Belušić i sur., 2015).

Bluestein i Jain (1985.) u svom istraživanju na temelju radarskih podataka podijelili su LOKS-ove u četiri skupine: "broken line", "back building", "broken areal" i "embedded areal". Novije istraživanje proveli su Parker i Johnson (2000.). Nadovezujući se na Houzea i sur. (1990.) te Schiessera i sur. (1995.) predložili su novu klasifikaciju izvantropskih LOKS-ova. Ta se klasifikacija temelji na rasporedu stratiformne oborine u odnosu na konvektivnu liniju u LOKS-u: TS ("trailing stratiform"), LS ("leading stratiform") i PS ("parallel stratiform") (Parker i Johnson, 2000) (slika 4).



Slika 4. Tipovi LOKS-ova prema Parkeru i Johnsonu (2000.): u početnom, razvojnem i zrelom stadiju. Izvor: Parker i Johnson (2000)

LOKS započinje razvoj kao skupina odvojenih kumulonimbusa poredanih u liniju, koji dalje rastu i spoje se u neprekidnu liniju s pratećom stratiformnom oborinom (Smull i Houze, 1985). U početku formiranja ovih sustava bitan je okidač za podizanje zraka iz nižih slojeva atmosfere do nivoa kondenzacije, nakon čega se taj zrak u nestabilnim uvjetima počinje spontano podizati (Weather World 2010 project). Taj okidač može biti diferencijalno zagrijavanje podloge i pojava termala, orografija ili, češće, konvergencija strujanja (Grisogono, Belušić i sur. 2015). Podizanje se ubrzava zbog oslobođene latentne topline uslijed kondenzacije (Weather World 2010 project). Početna ćelija razvija svoje uzlazno i silazno strujanje. U okolnostima bez smicanja vjetra nakon nekog vremena silazno strujanje nadvlada uzlazno i ćelija se raspada (slučaj izoliranih jediničnih ćelija). Međutim, u organiziranoj konvekciji vertikalno smicanje vjetra razdvaja uzlazno i silazno strujanje čime omogućuje duže trajanje same ćelije, ali i stvaranje novih ćelija tzv. udarnom frontom (engl. gust front). Udarne fronta, sudarajući se s okolnim toplim i nestabilnim zrakom, stvara područje konvergencije na kojem nastaju nove ćelije, što predstavlja mehanizam obnavljanja multićelije (Grisogono, Belušić i sur., 2015). Nove ćelije nastaju niz vektor smicanja zbog međudjelovanja horizontalne vrtložnosti uslijed vertikalnog smicanja vjetra i horizontalne vrtložnosti udarne fronte. Na strani hladnog bazena niz vektor smicanja horizontalna vrtložnost udarne fronte suprotnog je smjera od horizontalne vrtložnosti zbog smicanja vjetra i njihovim međudjelovanjem pojačava se konvergencija (slika 5). Na suprotnoj strani hladnog bazena te dvije vrtložnosti istog su smjera pa se superponiraju, što nepovoljno utječe na razvoj novih ćelija (Rotunno i sur., 1988; The COMET Program, 2018).



Slika 5. Formiranje LOKS-a u prisutnosti vertikalnog smicanja vjetra.  
Izvor: <https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/shear> (The COMET Program)

Pokretački mehanizam za formiranje LOKS-a može biti valne prirode. Uzgonski i uzgonsko-inercijski valovi u nižim slojevima atmosfere stvaraju područja konvergencije čime pojačavaju konvekciju, stvarajući poseban valni konvektivni sustav (Grisogono, Belušić i sur., 2015). Izgled LOKS-a prikazan je na slici 6.



Slika 6. LOKS nad Kansasom, 20. lipnja 2011. Izvor: L Fischer, Kansas Thunderstorm Rain.  
<https://www.flickr.com/photos/syzygyphoto/5858110772/in/photolist>

LOKS-ovi pokazuju vezu s određenim prizemnim sinoptičkim obrascima (Parker i Johnson, 2000). Da bi analizirali tu povezanost, Parker i Johnson (2000.) su definirali aktivna i neaktivna razdoblja. Aktivna razdoblja su bila ona u kojima se dogodio bar jedan LOKS po danu u dva ili više uzastopnih dana, ili ako su se dva ili više LOKS-ova dogodila istog dana. Tijekom aktivnih razdoblja srednji tlak na morskoj razini bio je niži nad istraživanim područjem, a u srednjoj i višoj troposferi geopotencijalne visine bile su snižene, što se pripisuje prizemnim ciklonama i približavajućim kratkovalnim dolinama (Parker i Johnson, 2000), koje utječu na aktivnost MCS-ova (Kane i sur., 1987). LOKS-ovi su se dogodili na desnoj ulaznoj strani visoke mlazne struje. Za vrijeme aktivnih razdoblja prevladavala je topla advekcija u nižoj troposferi (Parker i Johnson, 2000). Od 88 LOKS-ova koje su izdvojili Parker i Johnson (2000.) nad središnjim dijelom SAD-a u svibnju 1996. i 1997., 64 slučaja bila su vezana uz topli sektor ciklone. Od njih najveći broj bio je povezan s toplom ili stacionarnom frontom, prizemnom dolinom i hladnom frontom. Time je naglašena važnost konvergencije u nižoj troposferi za organiziranu konvekciju (Parker i Johnson, 2000). 61% svih slučajeva u istraživanju povezano je s niskom mlaznom strujom (Parker i Johnson, 2000).

### ***1.3.1 Radarske karakteristike***

Definicija linijski organiziranog MCS-a (LOKS-a) počiva na radarskim snimkama. *"Linijski organizirani MCS je onaj koji sadrži konvektivnu liniju, dodirni ili skoro dodirni lanac konvektivnih radarskih odraza koji dijele gotovo zajednički vodeći kraj i koji se zajedno gibaju, bilo da su poredani u približno ravnu liniju ili lagano zakrivljen luk"* (Parker i Johnson, 2000). Na radarskim slikama možemo jasno razlikovati konvektivna i

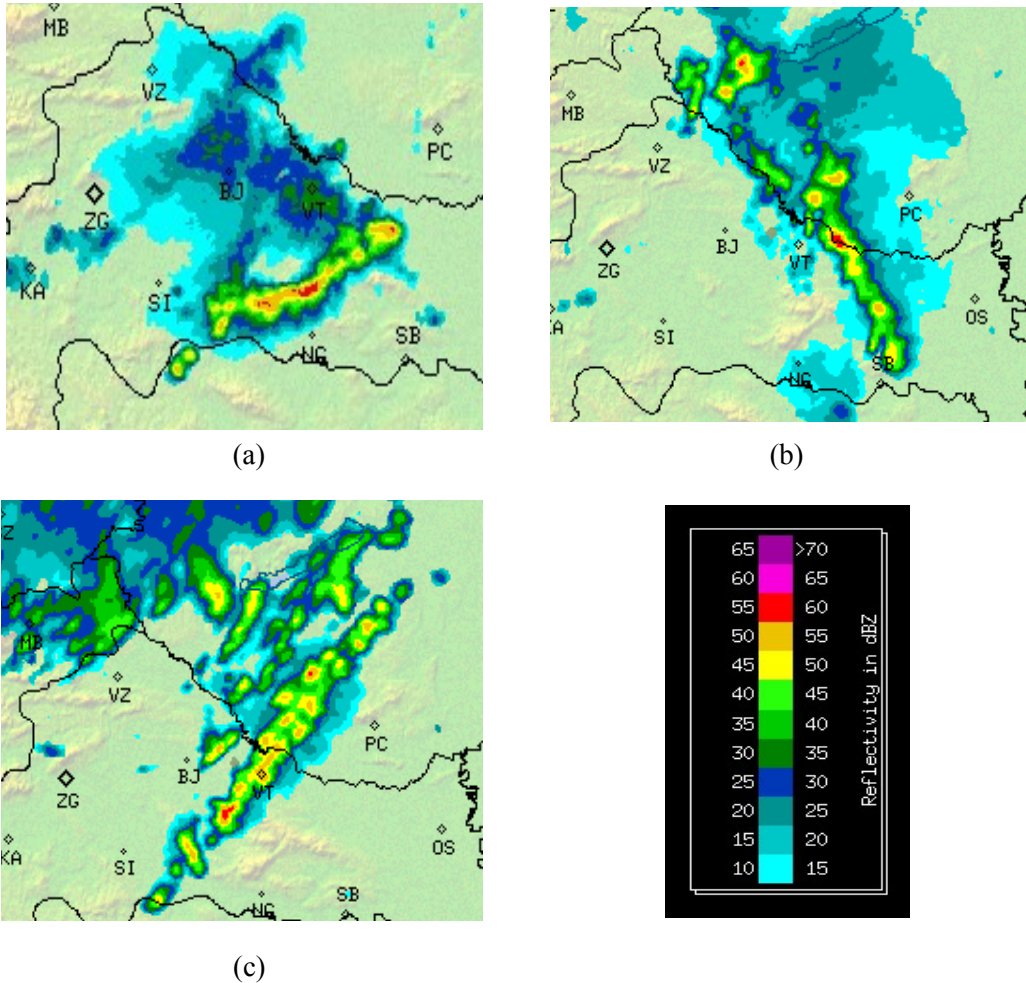
stratiformna područja oborine (Houze, 1977; Houze, 1997). Konvektivni odrazi na radaru imaju reflektivnost veću od 40 dBZ, a stratiformni između 20 i 40 dBZ (Parker i Johnson, 2000). Pod pojmom stratiformna oborina ne smatra se samo oborina iz slojevite nimbostratusne naoblake vezane uz izvantropske ciklone i fronte, nego i stratiformna oborina vezana uz kumulonimbuse, tj. stariju i manje aktivnu konvekciju, sa slabim horizontalnim gradijentima reflektivnosti. Takva slabija oborina česta je upravo u mezoskalnim sustavima gdje pokriva veliki dio zahvaćenog područja (Houze, 1997).

Prema raspodjeli stratiformnog područja u odnosu na konvektivnu liniju, LOKS-ovi su podijeljeni u tri skupine: 1) *tip sa zaostajućom stratiformnom oborinom u odnosu na konvektivnu liniju (tip ZS)*; 2) *tip s vodećom stratiformnom oborinom u odnosu na konvektivnu liniju (tip VS)*; 3) *tip s paralelnom stratiformnom oborinom s obje strane konvektivne linije (tip PS)* (Parker i Johnson, 2000). Ponekad se jedan tip LOKS-a transformira u drugi tip, pa su takvi slučajevi u ovom radu svrstani pod tip (4) koji je nazvan *transformacija (tip T)*.

Tip ZS. Konvektivna linija ima veliki gradijent reflektivnosti na vodećem kraju i veliko područje stratiformne oborine u kojem često možemo naći sekundarni maksimum reflektivnosti odvojen od konvektivne linije uskim područjem niske reflektivnosti (tranzicijska zona) (Houze i sur., 1990). Ovaj tip LOKS-a može imati i vrlo malo vodeće stratiformne oborine (Parker i Johnson, 2000) (slika 7a).

Tip VS. Stratiformna oborina se nalazi ispred konvektivne linije, u području prema kojem se LOKS kreće. Ovaj tip najčešće razvija umjereno velika stratiformna područja bez tranzicijske zone i sekundarnog maksimuma reflektivnosti. Sklonost razvoju vodeće stratiformne oborine je kriterij za svrstavanje LOKS-a u tip VS iako može postojati i zaostajuća stratiformna oborina (Parker i Johnson, 2000) (slika 7b).

Tip PS. Većina stratiformne oborine kreće se paralelno s konvektivnom linijom i u lijevo od vektora kretanja konvektivne linije. Stratiformne oborine oko konvektivne linije ima vrlo malo. Gradijent reflektivnosti je relativno velik na obje strane konvektivne linije. U nekim slučajevima konvektivna linija se povećava u desno od vektora kretanja (Parker i Johnson, 2000) (slika 7c).



Slika 7. Tipovi LOKS-ova: a) tip sa zaostajućom stratiformnom oborinom (ZS), 23.lipnja 2017., 20:15 UTC; b) tip s vodećom stratiformnom oborinom (VS), 28.lipnja 2017, 16:15 UTC; c) tip s paralelnom stratiformnom oborinom (PS), 8.srpnja 2015, 18:30 UTC. Prema Parkeru i Johnsonu (2000.). Arhivske radarske snimke Državnog hidrometeorološkog zavoda Republike Hrvatske, RC Bilogora

### 1.3.3. Termodinamičke karakteristike

Svi LOKS-ovi nastaju u uvjetno nestabilnoj atmosferi, s jakim vertikalnim smicanjem vjetrova i zakretanjem vektora smicanja s visinom u nižim slojevima, te slabijim smicanjem i blagim zakretanjem vektora smicanja u višim slojevima atmosfere (Bluestein i Jain, 1985). Kao mjera nestabilnosti atmosfere najčešće se koristi konvektivna raspoloživa potencijalna energija – CAPE (engl. convective available potential energy). CAPE je raspoloživa potencijalna energija koju čest ima zbog uzgona i koja joj omogućuje podizanje od nivoa slobodne konvekcije do nivoa neutralnog uzgona (Hannesen i sur., 1998). CAPE je dan formulom :

$$CAPE = g \int_{LFC}^{LNB} \frac{T_p - T_e}{T_e} dz, \quad (1)$$

gdje je *LFC* visina nivoa slobodne konvekcije, *LNB* visina nivoa neutralnog uzgona, *g* ubrzanje sile teže, *T<sub>p</sub>* temperatura česti i *T<sub>e</sub>* temperatura okoline. Na termodinamičkom dijagramu CAPE je jednak površini između krivulje koja označava temperaturu česti i krivulje koja označava temperature okoline od nivoa slobodne konvekcije do nivoa neutralnog uzgona. Vrijednosti CAPE-a do 1000 J/kg ukazuju na slabu nestabilnost, između 1000 i 2500 J/kg na umjerenu nestabilnost, 2500 – 4000 J/kg na jaku nestabilnost i vrijednosti veće od 4000 J/kg na ekstremnu nestabilnost (Thompson, 2006).

Ovisno o tome koji se sloj zraka uzima kao početni sloj iz kojeg se podiže čest, CAPE se može računati na tri načina: (1) kao površinski CAPE (engl. surface-based CAPE, *SBCAPE*), (2) kao CAPE izmiješanog sloja (engl. mixed layer CAPE, *MLCAPE*) i (3) kao najnestabilniji CAPE (engl. most unstable CAPE, *MUCAPE*) (Bunkers i sur., 2002). *SBCAPE* bolje prikazuje konvekciju u nižim slojevima, bliže površini, ali noću padne na nulu kad se razvije površinska inverzija. Noću je i *MLCAPE* jako mali, gotovo jednak nuli. Zbog toga se za noćnu konvekciju računa *MUCAPE* koji je dobar pokazatelj konvekcije iznad sloja inverzije, ali i konvekcije na hladnoj strani tople fronte. Ipak se preferira koristiti *MLCAPE*, gdje se uzima u obzir podizanje česti u izmiješanom sloju konstantne potencijalne temperature i omjera miješanja. Za taj sloj najčešće se uzima sloj blizu površine. Bluestein i Jain (1985.) koristili su najnižih 500 m za izračun *MLCAPE*-a. Upravo zbog nedefiniranosti dubine promatranog sloja konzistencija u rezultatima istraživanja temeljena na *MLCAPE*-u je slabija. Vrijednosti *MLCAPE*-a manje su nego *SBCAPE*-a u poslijepodnevnim i ranim večernjim satima, a noću i rano ujutro malo veće. Jednake su kad je granični sloj dobro izmiješan. No, kod niske vlažnosti zraka *SBCAPE* poprima jako velike vrijednosti, a kod plitke inverzije je pak manji od *MLCAPE*-a. Stoga je bolje koristiti *MLCAPE* (Bunkers i sur., 2002).

CAPE i smicanje su dva parametra koji definiraju duboku konvekciju – CAPE određuje intenzitet, a smicanje daje oblik dubokoj konvekciji (Grisogono, Belušić i sur., 2015). Također postoje dva načina računanja smicanja. Prvi je tzv. glavno smicanje (engl. bulk shear). To je vektorska razlika vjetra na dva različita nivoa, često podijeljena s dubinom sloja. Drugi način je ukupno, kumulativno smicanje (engl. total shear). Ono se dobije zbrajanjem smicajućih segmenata preko plitkih podslojeva u sloju između dva različita nivoa. To je zapravo zbroj glavnih smicanja na malim intervalima. Ta dva smicanja ista su za jednosmjerni nepreklapajući hodogram, dok je za zakrivljeni hodogram

ukupno smicanje veće (Bunkers i sur., 2002). Rotunno i suradnici (1988.) u istraživanju jakih i dugotrajnih LOKS-ova koristili su ukupno smicanje.

CAPE i smicanje povezani su bulk Richardsonovim brojem (engl. bulk Richardson number, *BRN*). Bulk Richardsonov broj je omjer ukupne raspoložive energije zbog uzgona (CAPE) i ukupne energije raspoložive zbog vertikalnog smicanja vjetra (Moncrieff i Green, 1972). Dan je izrazom:

$$BRN = \frac{CAPE}{0.5U^2} , \quad (2)$$

gdje je  $U$  razlika brzine vjetra na dva nivoa (Moncrieff i Green, 1972; Weisman i Klemp, 1982). On daje procjenu do kojeg je stupnja duboka mokra konvekcija dinamički i termodinamički dominantna. Visoke vrijednosti  $BRN$  ( $BRN > 40$ ) pogoduju formiranju multićelijskih oluja, dok niske ( $15 < BRN < 35$ ) pogoduju stvaranju superćelija (Weisman i Klemp, 1982).

Vrijednosti  $MLCAPE$ -a u istraživanju Blusteina i Jaina (1985.) kretale su se od 1340 do 2820 J/kg, a vrijednosti bulk Richardsonova broja od 26 do 111. U istraživanju Parkera i Johnsona (2000.) za LOKS-ove vrijednosti  $CAPE$ -a bile su u rasponu od 813 J/kg (tip s paralelnom stratiformnom oborinom) do 1605 J/kg (tip sa zaostajućom stratiformnom oborinom).

#### ***1.4. Osobitosti grmljavinske aktivnosti u Hrvatskoj***

Izvantropski LOKS-ovi povezani su s intenzivnom grmljavinskom aktivnosti (Hane, 1986) pa se, osim iz radarskih odraza, LOKS-ovi mogu prepoznati i po podacima o električnom pražnjenju. Jugoistočna Europa i Sredozemlje, gdje pripada i Hrvatska, regije su s najviše grmljavinske aktivnosti u Europi (Christian i sur., 2003). Istraživanje o konvektivnoj aktivnosti u Hrvatskoj na temelju podataka o munjama proveli su 2011. Mikuš i suradnici. Za razdoblje od travnja do listopada 2006.-2009. izdvojeni su konvektivni dani koji su dalje analizirani, a Hrvatska je podijeljena na šest područja. Kao konvektivni dan uzet je onaj dan u kojem je zabilježeno najmanje deset munja po satu nad promatranim područjem. Utvrđeno je da Hrvatska ima više od sto konvektivnih dana godišnje. Najkonvektivnije područje Hrvatske u toplom dijelu godine je sjeverni Jadran, dok je najslabije konvektivno područje gorska Hrvatska. Prosječni broj konvektivnih dana godišnje za navedeno razdoblje kreće se od 40 u gorskoj Hrvatskoj, 47 na južnom Jadranu, 48 u istočnoj Hrvatskoj i srednjem Jadranu, 52 u središnjoj Hrvatskoj, do 63 na sjevernom

Jadranu. Zanimljiva podjela napravljena je prema 16°E meridijanu: zapadno od njega, što uključuje sjeverni i srednji Jadran te gorsku Hrvatsku, najveći broj konvektivnih dana je u kasno ljeto – u kolovozu, a istočno od njega (središnja i istočna Hrvatska, južni Jadran) maksimum konvektivnih dana je u kasno proljeće i rano ljeto – u lipnju. Zaključeno je da je nad kopnom konvekcija izraženija u kasno proljeće i rano ljeto, a nad morem u jesen. Konvektivna aktivnost obično počinje između 11 i 16 sati, a završava između 17 i 20 sati po srednjoeuropskom vremenu i u pravilu ne traje duže od sedam sati. Noćna grmljavina nad kopnom je rijetka pojava. Grmljavinska aktivnost u Hrvatskoj najčešće je povezana sa ciklonama, bezgradijentnim poljem i dolinama. Najveći utjecaj ima sinoptička situacija u kojoj se nad Hrvatskom kratko zadržava sam centar ciklone (18%), zatim prednji sektor (15%) te stražnji sektor ciklone (12%). Od fronti najveću ulogu ima hladna fronta. Dominantni režimi strujanja su jugozapadni (38%) i sjeveroistočni (23%). Najveće vrijednosti CAPE-a povezane su uz doline, bezgradijentna polja i jugozapadni režim strujanja u središnjoj Hrvatskoj, dok je bulk Richardsonov broj najveći za bezgradijentna polja (Mikuš i sur., 2012).

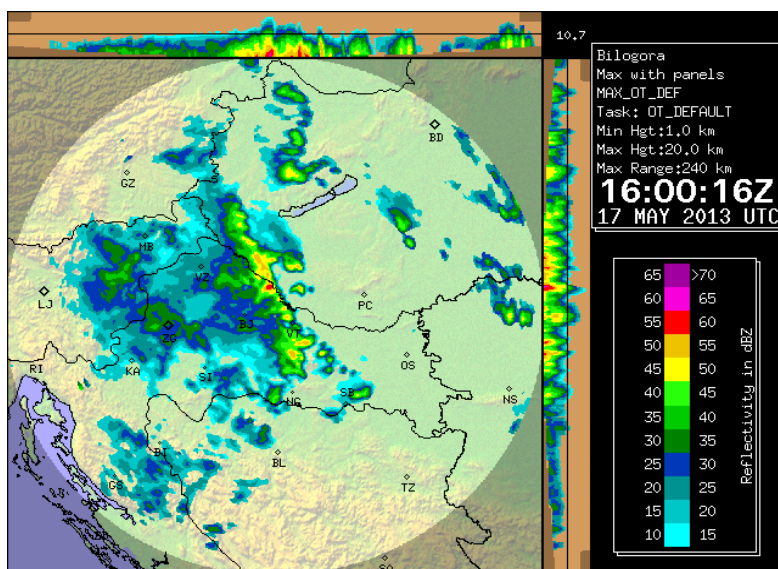


## 2. Podaci i metode

### 2.1. Radari

Linijski organizirani konvektivni sustavi nad Hrvatskom izdvojeni su pretraživanjem arhivskih radarskih slika Državnog hidrometeorološkog zavoda Republike Hrvatske, radarskog centra Bilogora. Radarski centar Bilogora koristi doppler radar tipa DWSR 88 S, valne duljine od 10 cm, s obnovljenom tehnologijom 2005. godine (DHMZ, <http://www.meteo.hr>). Domet radara iznosi 240 km, što daje radarsku sliku promjera 480 km. Pokriva cijelu unutrašnjost Hrvatske, dio sjevernog Jadrana i susjednih zemalja. Na radarskim slikama vrijeme je u UTC terminu, s 15-minutnim intervalima. Skala reflektivnosti kreće se od 10 do 65 dBZ. Za prikaz podataka korišten je produkt maksimalne reflektivnosti s panelima koji daju postranični pogled. Taj se produkt dobije skeniranjem radara s različitim kutovima elevacije (volumni sken). Prikazuje maksimalnu reflektivnost za svaku koordinatu piksela. Postranični pogled na radarskoj slici koristi se da bi se odredilo na kojim su visinama te vrijednosti. Postranični pogled na vrhu slike nalazi se na osi zapad – istok, a na desnoj strani slike nalazi se na osi sjever – jug (slika 8) (Bermuda Weather Service, <http://www.weather.bm/helpDocs/RadarHelp/index.html>).

Izdvojeni slučajevi su analizirani i svrstani u tipove prema Parkeru i Johnsonu (2000.). Zatim je izvršena dodatna provjera koristeći podatke o munjama dobivene pomoću LINET senzora.



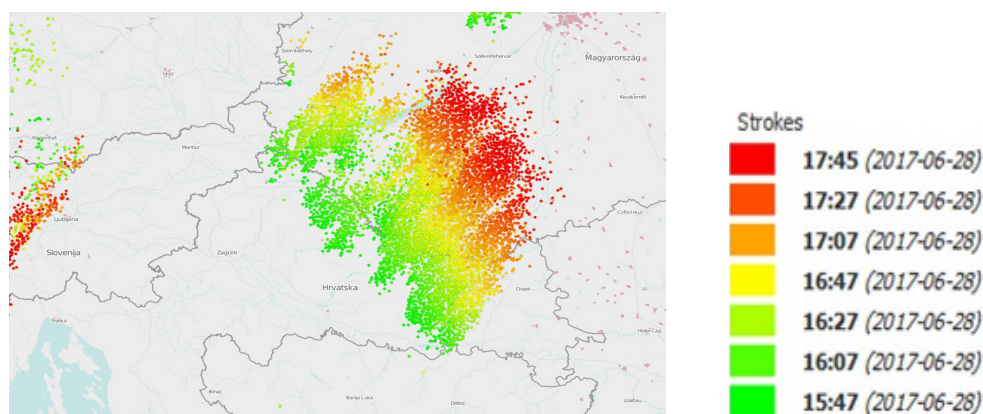
Slika 8. Radarska slika RC Bilogora. LOKS nad Hrvatskom, tip ZS, 17. svibnja 2013., 16:00 UTC. Na slici se vidi domet radara (svjetliji krug).

## **2.2. LINET – podaci o munjama**

LINET je međunarodna mreža za detekciju munja. Sustav, odnosno senzori, razvijeni su na Sveučilištu u Münchenu 1994., a međunarodna europska mreža počela je s radom 2006. godine (Betz i sur., 2009). Mreža trenutno uključuje više od 100 senzora u 24 države. Obuhvaća područje od 10° zapadne do 35° istočne geografske duljine, te od 30° do 65° sjeverne geografske širine. LINET detektira obje vrste munja, munje oblak-zemlja i munje unutar oblaka, koristeći radiovalove vrlo niskih / niskih frekvencija. Prosječna prostorna rezolucija iznosi oko 150 m, a signal se vremenski bilježi pomoću GPS-a, s točnošću većom od 100 ns. Statistička prostorna greška kreće se oko 100 m, a veća odstupanja u stvarnosti kompenzirana su finim ugađanjem mreže. Senzori mogu detektirati vršne struje i niže od 5 kA (Betz i sur., 2009). LINET daje uvid u prostornu i vremensku raspodjelu munja nad promatranim područjem. Prikazuje munje u stvarnom i prošlom vremenu (arhivske slike). Munje u različitim vremenskim trenucima prikazane su točkama različitih boja (slika 9).

Podaci o ukupnom broju munja korisni su ne samo za znanstvena istraživanja, nego i za praćenje opasnih vremenskih prilika u svijetu (Betz i sur., 2009). Značajno povećanje broja munja unutar oblaka u kratkom vremenskom intervalu često je povezano s nadolaskom opasnih vremenskih prilika (Williams i sur., 1999). Osim detekcije opasnih vremenskih prilika, LINET podaci omogućuju prostorno i vremensko praćenje pojedinih olujnih ćelija. Posebnu učinkovitost dobivaju u kombinaciji s drugim meteorološkim podacima, poput radarskih i satelitskih (Betz i sur., 2009).

Na temelju radarskih podataka za izdvojene LOKS-ove nad Hrvatskom određeni su datumi događaja i vrijeme formiranja. Ti su podaci zatim temeljem podataka o munjama iz LINET sustava prihvaćeni ili odbačeni. Kriterij za prihvaćanje bilo je pojavljivanje munja u paralelnim linijama, u vremenskom intervalu od dva sata, od vremena formiranja LOKS-a.



Slika 9. Prostorni i vremenski prikaz munja, LINET. LOKS nad Hrvatskom, 28. lipnja 2017., od 15:47 do 17:45 UTC. Različite boje označavaju različito vrijeme pojavljivanja munja, prema legendi.

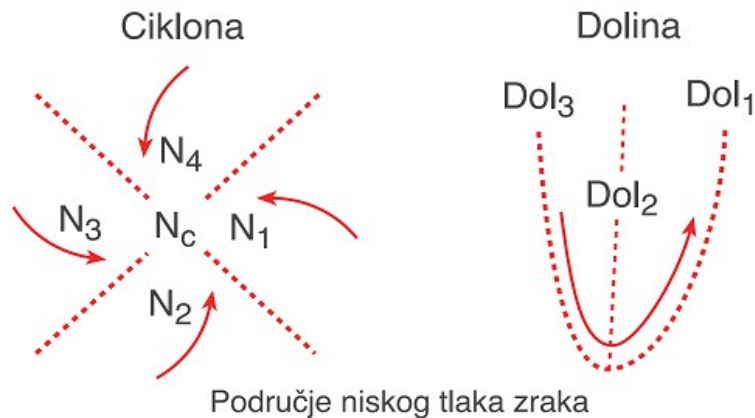
### 2.3. Tipovi vremena

Za analizu prizemne sinoptičke situacije korištena je prizemna analiza njemačke meteorološke službe - DWD (Europäischer Wetterbericht - Deutscher Wetterdienstes, <http://wetter3.de>), najbliža vremenu detekcije LOKS-a, i tipovi vremena prema Poji (1965.). Za analizu tipova vremena i režima strujanja na 500 hPa korištena je analiza GFS modela (Global Forecast System) također najbliže vremenu detekcije (<http://wetter3.de>).

Od prizemnih sinoptičkih sustava promatrani su sljedeći tipovi vremena: istočni (prednji) sektor ciklone (N1), južni (donji) sektor ciklone (N2), zapadni (stražnji) sektor ciklone (N3), sjeverni (gornji) sektor ciklone (N4), središte ciklone (Nc); prednja strana doline (Dol1), os doline (Dol2) te stražnja strana doline (Dol3); termička dolina vezana uz Jadran (tDol); te bezgradijentno polje (B) (Poje, 1965; Zaninović i sur., 2008) (slika 10, Dodatak A).

Nadalje, od interesa je bio položaj sinoptičkih fronti. Promatrano je je li područje istraživanja bilo zahvaćeno hladnom frontom (HF), toplom frontom (TF), je li se nalazilo ispred hladne fronte, a da nije bilo u toplom sektoru ciklone (IsHF), u toplom sektoru ciklone (TS) ili iza hladne fronte (IzHF), te ako je bila prisutna fronta okluzije (OF). Odsutnost atmosferskih fronti nad promatranim područjem bilježila se sa (X), a prisutnost linije nestabilnosti sa (LN).

Visinska situacija definirana je na temelju izobarne plohe 500 hPa: prednja strana doline (PSD), stražnja strana doline (SSD), donja strana doline (DSD); zonalno strujanje (W); visinska ciklona (Cv); visinska dolina čija os prolazi Hrvatskom (Dol); te bezgradijentno polje (Bp) (Dodatak B).



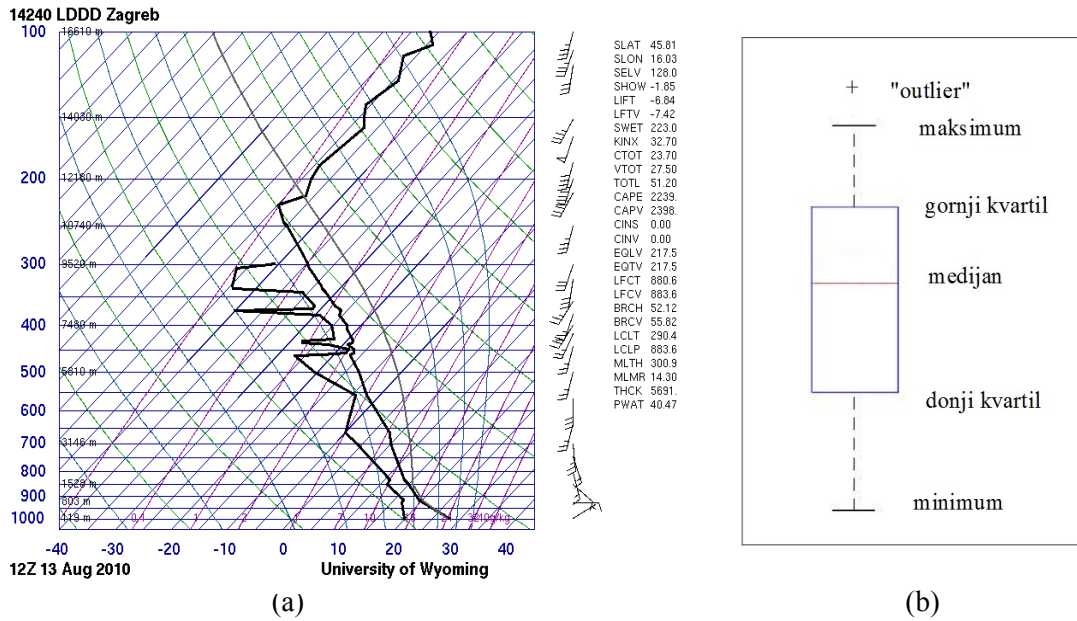
Slika 10. Shematski prikaz područja niskog tlaka zraka, ciklone i doline. Prema Poji (1965.) i Zaninović i sur., (2008.). Izvor: Klimatski atlas Hrvatske, Zaninović i sur., 2008., DHMZ (www.meteo.hr), preuređeno

#### 2.4. Indeksi nestabilnosti

Za računanje indeksa nestabilnosti korištena su radiosondažna mjerenja koja su provedena unutar šest sati prije početka formiranja LOKS-a (Renko i sur., 2016). Izabrana je radiosondažna postaja Zagreb-Maksimir (14240) jer je u granicama do 400 km od mjesta događaja (Rasmussen i Blanchard, 1998; Renko i sur., 2016) za sve LOKS-ove u kontinentalnom dijelu Hrvatske. Podaci za analizu preuzeti su s internetske stranice Sveučilišta u Wyomingu (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Indeksi nestabilnosti izračunati su pomoću otvorenog ("open-source") programa za analizu sondaža i hodograma - SHARPPy ("The Sounding and Hodograph Analysis and Research Program in Python") (Blumberg i sur., 2017).

Indeksi izračunati iz radiosondažnih podataka su: MLCAPE u najdonjih 100 hPa, SBCAPE, i MUCAPE u najdonjih 300 hPa; glavno smicanje 0-1 km (engl. bulk shear 0-1 km, *BS01*), glavno smicanje 0-3 km (bulk shear 0-3 km, *BS03*) i glavno smicanje 0-6 km (bulk shear 0-6 km, *BS06*); te bulk Richardsonov broj za izmiješanu čest u najdonjih 100 hPa (Bunkers i sur., 2002; Renko i sur., 2016). Za sve tri vrste CAPE-a napravljena je korekcija virtualne temperature (Doswell i Rasmussen, 1994).

Slika 11a prikazuje termodinamički dijagram ("Skew-T log-P") jedne radiosondaže, dana kada je zabilježen LOKS. Indeksi nestabilnosti prikazani su u obliku "boxplot" grafikona (slika 11b).



Slika 11. a) Primjer "Skew-T log-P" dijagrama radiosondaže 13. kolovoza 2010. u 12 UTC. Izvor: internetske stranice Sveučilišta u Wyomingu, <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>, b) objašnjenje "boxplot" prikaza indeksa nestabilnosti (Renko i sur., 2016)

### 3 . Rezultati

#### 3.1. Vrste i karakteristike linijski organiziranih konvektivnih sustava nad Hrvatskom

Detaljnim pregledom arhivskih radarskih slika radarskog centra Bilogora izdvojeno je 59 slučajeva za koje se smatralo da se radi o LOKS-ovima. Analiziran je period od 2010. do 2017. godine, po konvektivnim sezonama. U konvektivnu sezonu uključena su četiri mjeseca toplijeg dijela godine: svibanj, lipanj, srpanj i kolovoz. Daljnjom provjerom prostorne i vremenske raspodjele munja u LINET sustavu, za 50 konvektivnih događaja potvrđeno je da se radi o LOKS-ovima, dok ih je devet eliminirano. Broj dana s LOKS-ovima nešto je manji od broja slučajeva, jer su u jednom danu (25. lipnja 2017.) zabilježena tri slučaja, tako da ukupan broj dana s LOKS-ovima iznosi 48. Dan s LOKS-om je onaj u kojemu je zabilježen barem jedan LOKS. Zbog približne podudarnosti broja dana i broja slučajeva, u daljnjem tekstu analizirat će se podaci prema broju slučajeva, osim u analizi termodinamičkih svojstava LOKS-ova gdje će se analizirati podaci prema broju dana. Tijekom termodinamičke analize, od 48 konvektivnih dana odbačeno je ukupno 15 dana. 12 dana je odbačeno jer su radiosondažna mjerenja (00 UTC i 12 UTC) bila izvan intervala od 6 sati prije formiranja LOKS-a. 6 od 12 odbačenih dana bila su povezana sa sinoptičkim frontama (4 IsHF, 2 HF) gdje dolazi do miješanja zračnih masa pa ti radiosondažni podaci više ne bi bili reprezentativni kada bi se analizirali izvan intervala od 6 sati. Daljnjom analizom izbačena su još tri datuma: 17.5.2013., 10.8.2016. i 10.7.2014. Prva dva datuma nisu imala dovoljno podataka za izračun indeksa nestabilnosti, a treći je imao CAPE gotovo jednak nuli, jer se LOKS toga dana počeo formirati u 12:00 UTC, u isto vrijeme kada je i puštena radiosonda. Zračna masa je tada već bila izmiješana, a radiosondaža nereprezentativna. Od 48 konvektivnih dana za izračun indeksa nestabilnosti ostala su 33 konvektivna dana. Za analizu po tipovima, sezonama i mjesecima te sinoptičku analizu korišteno je 50 slučajeva.

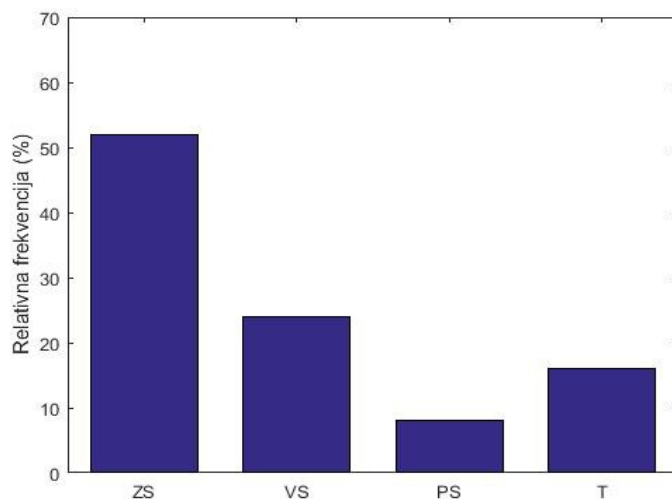
Tip LOKS-a koji se najčešće pojavljivao je *tip sa zaostajućom stratiformnom oborinom*, i to u čak 52% slučajeva. Nešto rjeđe pojavljuju se tip s vodećom stratiformnom oborinom (24%) i transformacija tipova (16%), a najrjeđe tip s paralelnom stratiformnom oborinom (8%) (slika 12).

Najviše je slučajeva zabilježeno 2017. godine, čak 11, dok je najmanji broj slučajeva, samo jedan, zabilježen 2012. godine (slika 13).

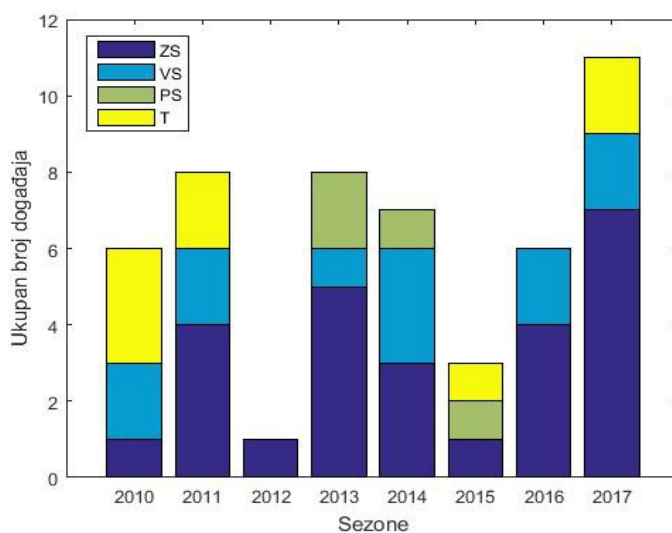
Mjesec s prosječno najviše slučajeva bio je *lipanj* (prosječno 2,25), slijede ga srpanj i kolovoz te svibanj (prosječno 1) (slika 14).

U pet od osam sezona najčešći tip LOKS-ova bio je onaj sa zaostajućom stratiformnom oborinom, kao i u najaktivnijoj 2017. godini. Taj je tip prisutan u svakoj sezoni i u svakom mjesecu (slika 13 i 14). U sezoni 2010. dominiraju transformacije među

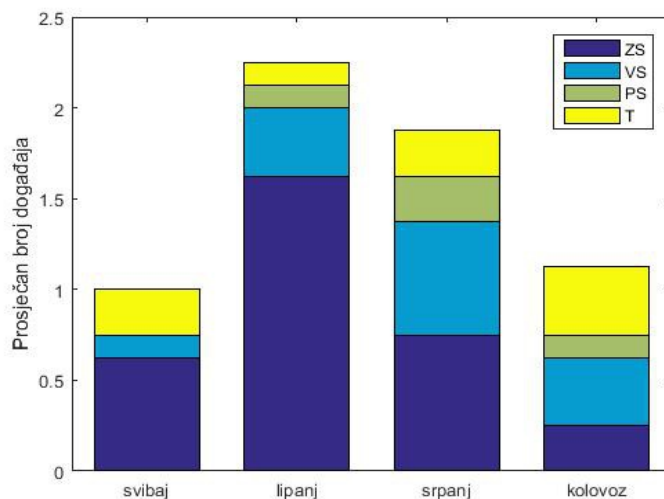
tipovima. Transformacije su prisutne u samo četiri od osam sezona. Tip s paralelnom stratiformnom oborinom javlja se tek u tri od osam sezona, a u 2017. ga nema (slika 13). Tip sa zaostajućom stratiformnom oborinom u prosjeku dominira u svibnju i lipnju, dok njegova dominacija opada prema srpnju i kolovozu, gdje su relativne frekvencije među tipovima ujednačenije. U kolovozu ga nadmašuju tipovi s vodećom stratiformnom oborinom i transformacije. Tip s paralelnom stratiformnom oborinom ne pojavljuje se u svibnju (slika 14).



Slika 12. Relativna frekvencija pojavljivanja tipova LOKS-ova nad Hrvatskom (tip ZS, tip VS, tip PS, tip T)

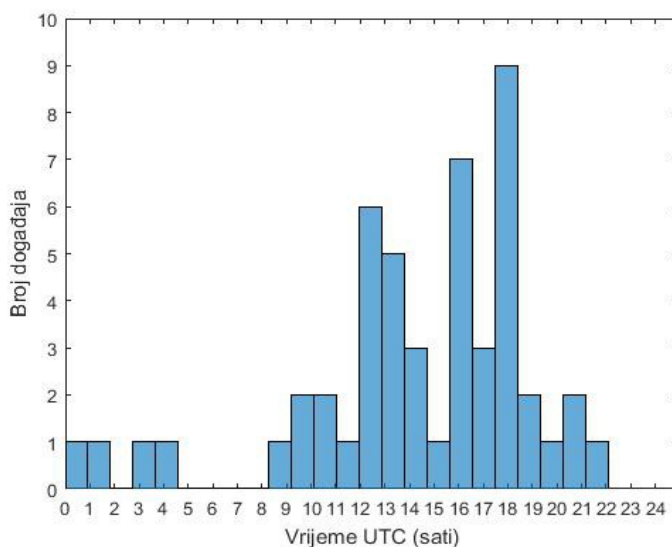


Slika 13. Ukupan broj LOKS-ova po konvektivnim sezonama (2010. – 2017.) i zastupljenost po tipovima



Slika 14. Prosječan broj LOKS-ova po mjesecima (svibanj, lipanj, srpanj, kolovoz) i zastupljenost po tipovima

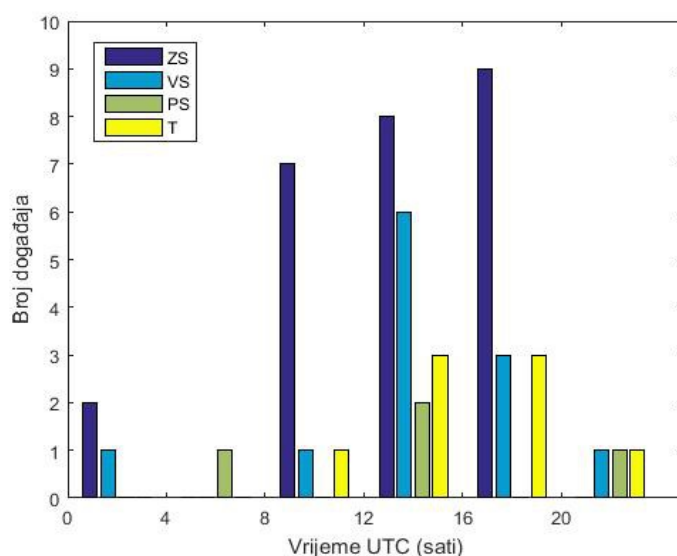
Najveći broj LOKS-ova razvije se poslijepodne i navečer, između 12 i 19 sati po UTC-u, odnosno između 14 i 21 sat po lokalnom vremenu, s maksimumom pojavljivanja od 17:30 do 18:30 UTC (između 19:30 i 20:30 po lokalnom vremenu). Nakon 18:30 UTC broj naglo opada, a najmanje ih je tijekom jutra (slika 15).



Slika 15. Histogram vremena pojavljivanja LOKS-ova nad Hrvatskom

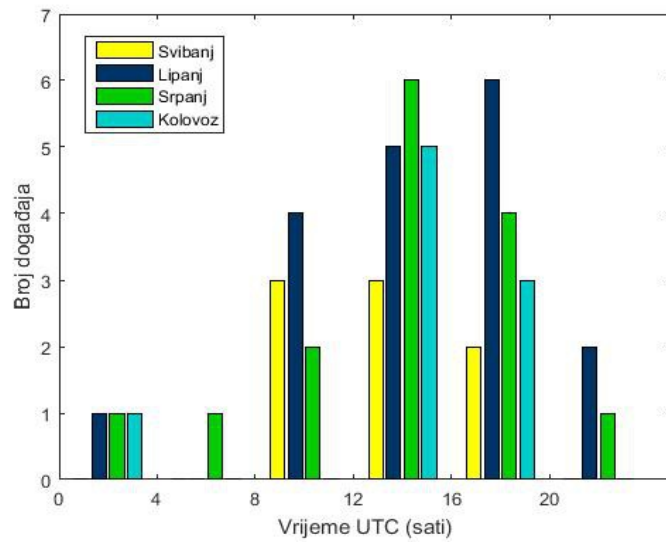


Najčešći tip, tip sa zaostajućom stratiformnom oborinom, pojavljuje se gotovo cijelog dana i večeri, od 8 UTC (10 sati po lokalnom vremenu) do 20 UTC (22 sata po lokalnom vremenu), s maksimumom pojavljivanja od 16 do 20 UTC (18-22 sata po lokalnom vremenu). Minimum je noćni i ranojutarnji, a od 20 do 00 UTC i od 4 do 8 UTC izostaje. Tip s vodećom stratiformnom oborinom pojavljuje se također u poslijepodnevnom i večernjim satima, a najčešći je između 12 i 16 UTC. Tipova s paralelnom stratiformnom oborinom i transformacija među tipova bilo je relativno malo, pa svaki zaključak na temelju takvih podataka nije reprezentativan. Ono što se može uočiti na temelju analiziranih slučajeva je pojavljivanje transformiranih tipova većinom između 12 i 20 UTC (14-22 sata po lokalnom vremenu) (slika 16).



Slika 16. Histogram vremena pojavljivanja LOKS-ova po tipovima (tip ZS, tip VS, tip PS, tip T)

Analizom mjesečne raspodjele uočava se da se LOKS-ovi u svibnju javljaju gotovo cijelog dana i večeri, od 8 do 20 UTC (10-22 sata po lokalnom vremenu), nešto češće od 8 do 16 UTC, a nema ih tijekom noći i jutra. U lipnju se bilježi porast učestalosti pojavljivanja LOKS-ova prema kasnim poslijepodnevnom i večernjim satima, gdje ona ima maksimum (16-20 UTC, 18-22 sata po lokalnom vremenu). U srpnju broj LOKS-ova ima maksimum nešto ranije nego u lipnju (12-16 UTC) i opada prema večeri. U kolovozu se LOKS-ovi formiraju uglavnom između 12 i 20 UTC, s maksimumom od 12 do 16 UTC (kao srpanj) i broj slučajeva opada prema večeri (slika 17).



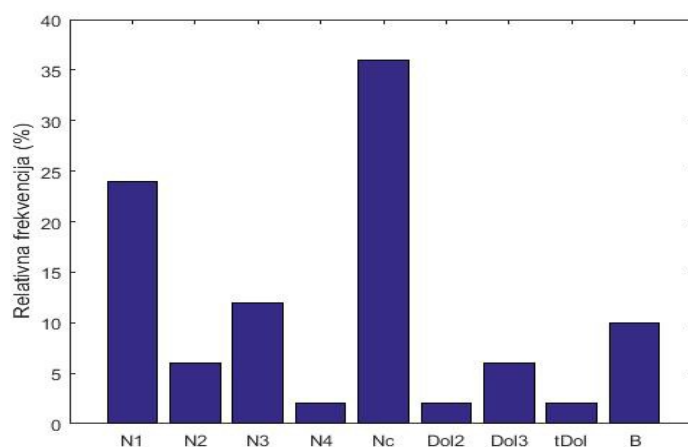
Slika 17. Histogram vremena pojavljivanja LOKS-ova po mjesecima (svibanj, lipanj, srpanj, kolovoz)

### 3.2. Tipovi vremena i režim strujanja

Najčešća sinoptička situacija povezana s LOKS-ovima nad Hrvatskom je prisutnost *centra ciklone* nad područjem Hrvatske. Takav se centar ne zadržava dugo nad Hrvatskom, a najčešće se nalazi nad Jadranom. Horvath i suradnici (2008.) navode kako je ciklonalna aktivnost u Jadranu povezana s nizom ekstremnih vremenskih pojava poput jakog vjetrova, obilne oborine, grmljavinskih oluja, superćelija i mezoskalnih konvektivnih sustava. Ovo istraživanje potvrđuje tu tezu. Od 50 LOKS-ova, 18 ih je bilo vezano uz centar ciklone (36%). Sljedeća po učestalosti sinoptička situacija bio je prednji sektor ciklone, u 12 slučajeva (24%). Slijedi ga stražnji sektor ciklone (6 slučajeva, što odgovara relativnoj učestalosti od 12%) i bezgradijentno polje (5 slučajeva, 10%). Donji sektor ciklone i stražnja strana doline zastupljeni su s po 3 slučaja, odnosno po 6%. Najmanje se LOKS-ova dogodilo u gornjem sektoru ciklone, na osi doline i u prisutnosti termičke doline vezane uz Jadran (po jedan slučaj) (tablica 1, slika 18).

| N1                     | N2                   | N3                      | N4                    | Nc               | Dol1                  | Dol2      | Dol3                   | tDol                          | B                    | Oznaka      |
|------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------|------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------|
| Prednji sektor ciklone | Donji sektor ciklone | Stražnji sektor ciklone | Gornji sektor ciklone | Središte ciklone | Prednja strana doline | Os doline | Stražnja strana doline | Term. dolina vezana uz Jadran | Bezgradijentno polje | Objašnjenje |
| 12                     | 3                    | 6                       | 1                     | 18               | 0                     | 1         | 3                      | 1                             | 5                    | Broj        |
| 24                     | 6                    | 12                      | 2                     | 36               | 0                     | 2         | 6                      | 2                             | 10                   | %           |

Tablica 1. Oznake prizemnih sinoptičkih sustava i njihova objašnjenja. Za svaki sinoptički sustav naveden je broj LOKS-ova i njihova relativna učestalost (%).



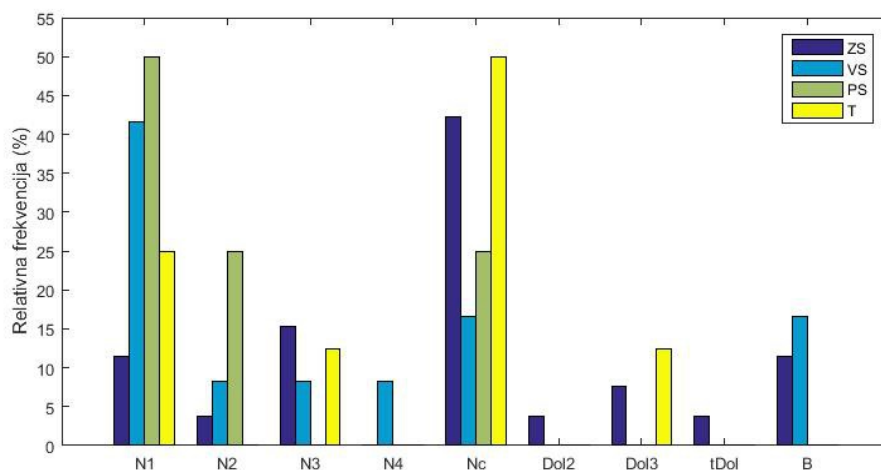
Slika 18. Zastupljenost LOKS-ova po prizemnim sinoptičkim sustavima. Objašnjenja kratica navedena su u tablici 1.

2013. i 2017. godina ističu se po velikom broju LOKS-ova povezanih s centrom ciklone (5 i 6 slučajeva). LOKS pod utjecajem termičke doline pojavio se u 2017. godini (tablica 2).

|               | N1 | N2 | N3 | N4 | Nc | Dol1 | Dol2 | Dol3 | tDol | B |
|---------------|----|----|----|----|----|------|------|------|------|---|
| 2010          | 2  | 0  | 0  | 0  | 2  | 0    | 0    | 2    | 0    | 0 |
| 2011          | 3  | 0  | 2  | 0  | 2  | 0    | 0    | 0    | 0    | 1 |
| 2012          | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0    | 0    | 1    | 0    | 0 |
| 2013          | 2  | 1  | 0  | 0  | 5  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 2014          | 3  | 0  | 2  | 0  | 1  | 0    | 0    | 0    | 0    | 1 |
| 2015          | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0    | 1    | 0    | 0    | 0 |
| 2016          | 0  | 1  | 0  | 1  | 2  | 0    | 0    | 0    | 0    | 2 |
| 2017          | 1  | 0  | 2  | 0  | 6  | 0    | 0    | 0    | 1    | 1 |
| <i>Ukupno</i> | 12 | 3  | 6  | 1  | 18 | 0    | 1    | 3    | 1    | 5 |

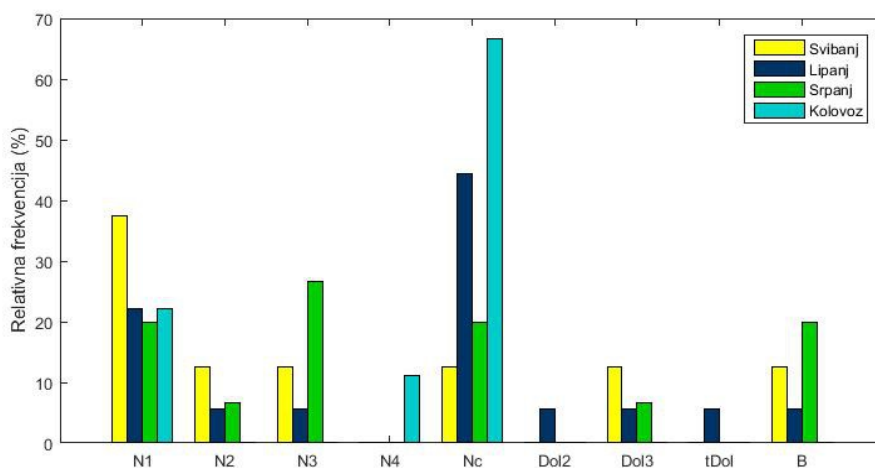
Tablica 2. Raspodjela LOKS-ova povezanih sa prizemnim sinoptičkim sustavima po konvektivnim sezonama (2010. - 2017.)

Slika 19 prikazuje zastupljenost prizemnih sinoptičkih sustava po tipovima LOKS-ova. Najveći broj LOKS-ova sa zaostajućom stratiformnom oborinom i transformacija među tipovima dogodio se u prisutnosti centra ciklone. Kod tipa s vodećom i paralelnom stratiformnom oborinom dominira prednji sektor ciklone, a potpuno izostaju doline. Kod tipa s vodećom stratiformnom oborinom drugi po redu zastupljeni prizemni sinoptički sustavi su središte ciklone i bezgradijentno polje. Kod tipa s paralelnom stratiformnom oborinom drugi po učestalosti su centar ciklone i donji sektor ciklone, a kod transformacije među tipovima to je prednji sektor ciklone.



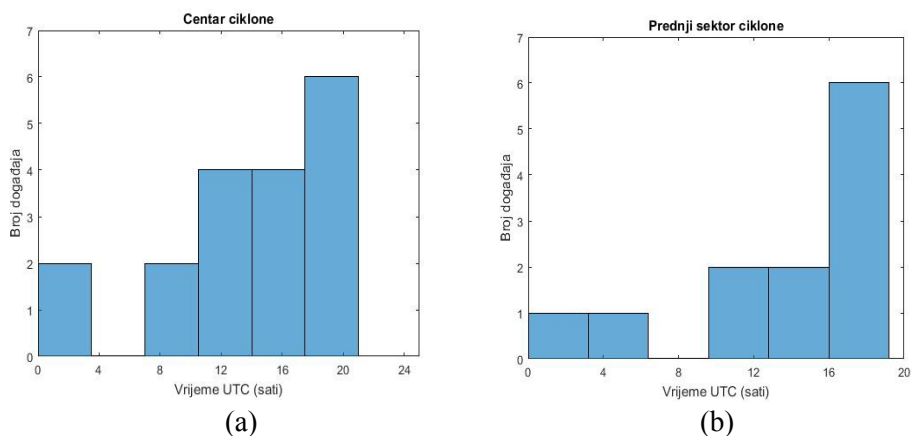
Slika 19. Relativna frekvencija prizemnih sinoptičkih sustava po tipovima LOKS-ova (tip ZS, tip VS, tip PS, tip T)

LOKS-ovima u prisutnosti centra ciklone odlikuju se mjeseci lipanj i posebno kolovoz, gdje gotovo 67% slučajeva nastaje pod utjecajem ciklonalne aktivnosti. U kolovozu potpuno izostaje utjecaj dolina i bezgradijentnog polja. Svibanjski LOKS-ovi događaju se većinom u prednjem sektoru ciklone, ali i pod utjecajem drugih tipova vremena. U srpnju niti jedan sustav ne dominira (slika 20).



Slika 20. Relativna frekvencija pojedinih prizemnih sinoptičkih sustava po mjesecima (svibanj, lipanj, srpanj, kolovoz)

LOKS-ovi uz dva najčešća tipa vremena, centar ciklone i prednji sektor ciklone, pokazuje pravilnost u dnevnom hodu postupnim povećanjem prema kraju dana i večeri (slika 21).

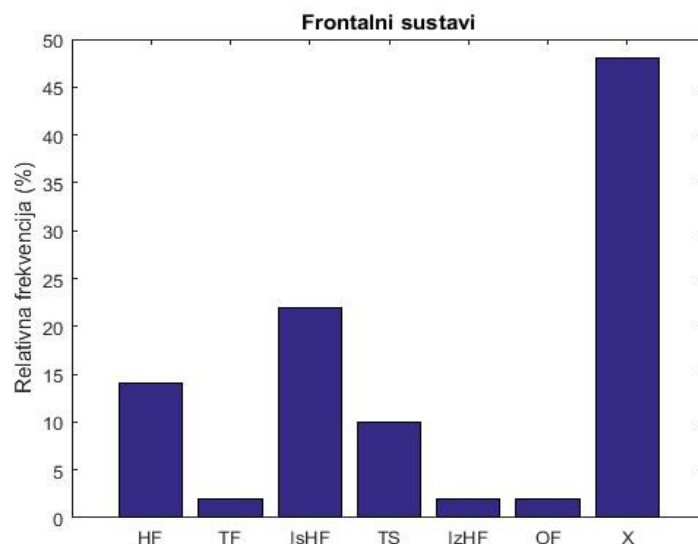


Slika 21. Histogrami vremena pojavljivanja LOKS-ova povezanih s: a) centrom ciklone, b) prednjim sektorom ciklone

Gotovo se polovina LOKS-ova dogodila *bez bliže prisutnosti frontalnih sustava* (slika 22). U pet slučajeva u blizini promatranog područja nalazila se linija nestabilnosti. Linija nestabilnosti susreće se uglavnom kod prednjeg i stražnjeg sektora ciklone. Nešto manji broj slučajeva dogodio se ispred nadolazeće hladne fronte, s tim da promatrano područje nije bilo u toplom sektoru ciklone. Ostali frontalni sustavi bili su rjeđi. Tako je samom hladnom frontom područje od interesa bilo zahvaćeno u 14% slučajeva, a u toplom sektoru ciklone dogodilo se 10% LOKS-ova. Najmanje slučajeva se dogodilo na toploj fronti, pod utjecajem fronte okluzije i iza hladne fronte (tablica 3, slika 22).

| HF            | TF           | IsHF                 | TS                   | IzHF              | OF              | X          | Oznaka      |
|---------------|--------------|----------------------|----------------------|-------------------|-----------------|------------|-------------|
| Hladna fronta | Topla fronta | Ispred hladne fronte | Topli sektor ciklone | Iza hladne fronte | Fronta okluzije | Bez fronti | Objašnjenje |
| 7             | 1            | 11                   | 5                    | 1                 | 1               | 24         | Broj        |
| 14            | 2            | 22                   | 10                   | 2                 | 2               | 48         | %           |

Tablica 3. Oznake atmosferskih frontalnih sustava i njihova objašnjenja. Za svaki frontalni sustav naveden je broj LOKS-ova i njihova relativna učestalost (%).



Slika 22. Relativna frekvencija LOKS-ova povezanih pojedinim frontalnim sustavima. Objašnjenja kratica navedena su u tablici 3.

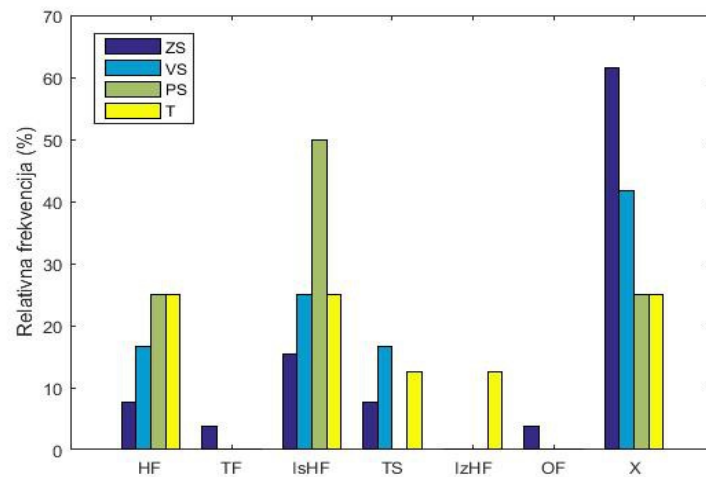
Od LOKS-ova koji su se dogodili bez prisutnosti fronti, najveći broj bio je povezan s centrom ciklone i bezgradijentnim poljem, a oni koji su se dogodili ispred nadolazeće hladne fronte najčešće su bili povezani s prednjim sektorom ciklone.

U konvektivnoj sezoni 2017. ističe se veliki broj LOKS-ova koji se dogodio u odsutnosti atmosferskih fronti, preko 80%. U istoj sezoni zabilježen je i LOKS na toploj fronti, dok se uz frontu okluzije dogodio u konvektivnoj sezoni 2013. (tablica 4).

|               | HF | TF | IsHF | TS | IzHF | OF | X  |
|---------------|----|----|------|----|------|----|----|
| 2010          | 0  | 0  | 1    | 3  | 1    | 0  | 1  |
| 2011          | 2  | 0  | 3    | 0  | 0    | 0  | 3  |
| 2012          | 0  | 0  | 0    | 0  | 0    | 0  | 1  |
| 2013          | 3  | 0  | 0    | 2  | 0    | 1  | 2  |
| 2014          | 0  | 0  | 3    | 0  | 0    | 0  | 4  |
| 2015          | 1  | 0  | 1    | 0  | 0    | 0  | 1  |
| 2016          | 1  | 0  | 2    | 0  | 0    | 0  | 3  |
| 2017          | 0  | 1  | 1    | 0  | 0    | 0  | 9  |
| <i>Ukupno</i> | 7  | 1  | 11   | 5  | 1    | 1  | 24 |

Tablica 4. Broj LOKS-ova povezanih s pojedinim frontalnim sustavima po konvektivnim sezonama (2010. - 2017.)

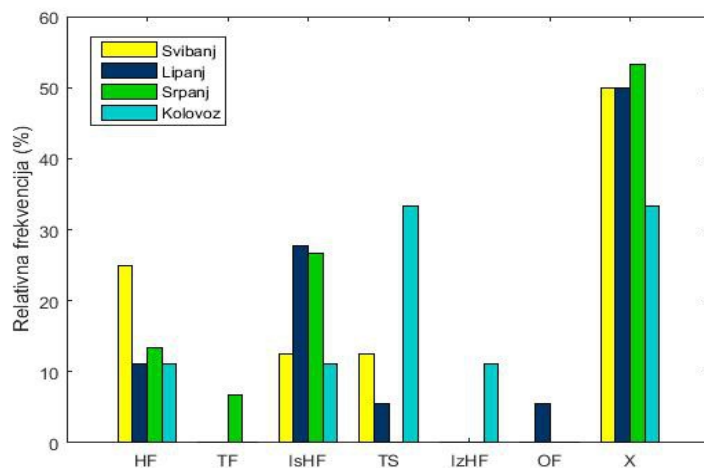
Analizirajući učestalost frontalnih sustava po tipovima LOKS-ova, kod tipa sa zaostajućom stratiformnom oborinom vidi se izrazita dominacija odsutnosti fronti. Odsutnost fronti prevladava i u LOKS-ovima s vodećom stratiformnom oborinom, ali ne u tolikoj mjeri kao kod onih sa zaostajućom stratiformnom oborinom. Najviše LOKS-ova s paralelnom stratiformnom oborinom dogodilo se ispred nadolazeće hladne fronte, a da nisu bili u toplom sektoru ciklone. LOKS-ovi koji su se transformirali ne pokazuju velika odstupanja, kako za pojedine frontalne sustave, tako ni za bezfrontalne situacije. Kod njih je otprilike udio u svakom frontalnom / nefrontalnom sustavu podjednak (slika 23).



Slika 23. Relativna frekvencija frontalnih sustava po tipovima LOKS-ova (tip ZS, tip VS, tip PS, tip T)

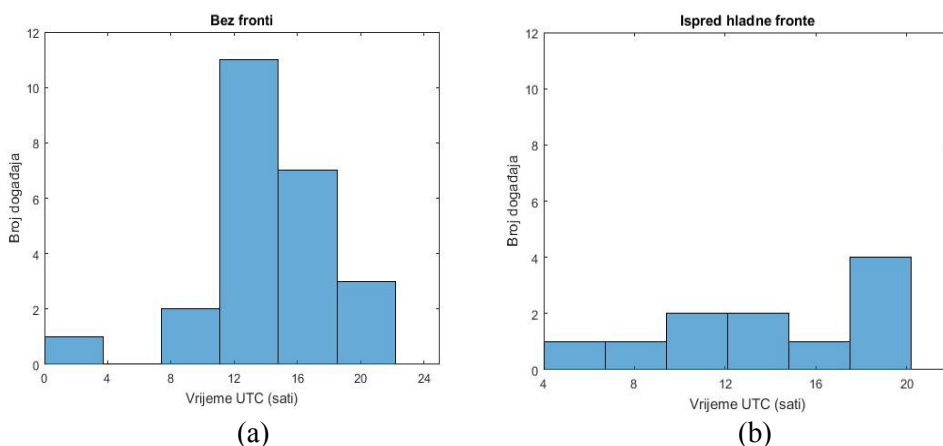
U svibnju, lipnju i srpnju dominiraju LOKS-ovi bez bliže prisutnosti sinoptičkih fronti. U kolovozu su uz bezfrontalne LOKS-ove jednako učestali oni koji su se dogodili u toplom sektoru ciklone (33%). Za svibanj je značajna nešto veća učestalost formiranja LOKS-ova na području zahvaćenom hladnom frontom (25%). U lipnju i srpnju, nakon najčešćih bezfrontalnih LOKS-ova, drugi po učestalosti su oni ispred hladne fronte, a da nisu bili u toplom sektoru ciklone (slika 24).





Slika 24. Relativna frekvencija frontalnih sustava po mjesecima (svibanj, lipanj, srpanj, kolovoz)

Nadalje, analizirana su vremena pojavljivanja LOKS-ova u dvije najčešće sinoptičke situacije: bez prisutnosti sinoptičkih fronti, te ispred hladne fronte bez toplog sektora ciklone. U prvom slučaju postoji nagli skok u broju događaja između 11 i 15 UTC (13-17 sati po lokalnom vremenu), s postupnim padom prema večernjim i noćnim satima (slika 25a). Tu bi važnu ulogu u razvoju nestabilnosti osim konvergencije strujanja moglo imati dnevno zagrijavanje, dok bi u drugom slučaju, kod predfrontalnih LOKS-ova, dominantna bila predfrontalna konvergencija. Naime, kod te skupine LOKS-ova maksimum pojavljivanja između 17 i 20 UTC nije toliko izražen i oni se u pravilu pojavljuju tijekom cijelog dana i tek nešto češće prema večeri (slika 25b).



Slika 25. Histogram vremena pojavljivanja LOKS-ova: a) bez prisutnosti sinoptičkih fronti, b) ispred hladne fronte, bez toplog sektora

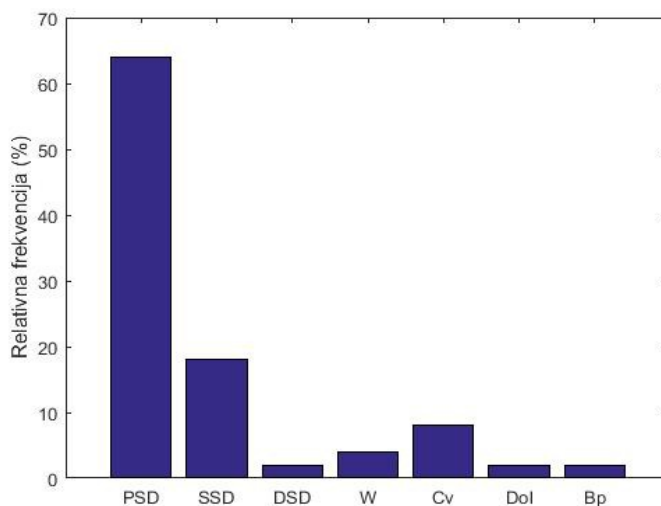
Analizirani su visinski sinoptički sustavi na izobarnoj plohi 500 hPa. Najveći broj LOKS-ova nad Hrvatskom povezan je s *prednjom stranom doline po visini*, dok je manji broj povezan sa *stražnjom stranom doline po visini*. Ostali visinski sinoptički sustavi bili su malobrojni, od kojih treba spomenuti visinsku ciklonu, u 8% slučajeva (tablica 5, slika 26).

U gotovo 97% slučajeva povezanih s prednjom stranom doline postoji *jugozapadni režim strujanja*, a u većini slučajeva povezanih sa stražnjom stranom doline podjednako su zastupljeni sjeverozapadni i sjeveroistočni režim strujanja.

Prednja strana doline po visini u oko 45% slučajeva povezana je s prizemnim centrom ciklone, a u oko 30% slučajeva s prednjom stranom ciklone (prizemno). Stražnju stranu visinske doline karakteriziraju LOKS-ovi podjednako vezani za prizemno bezgradijentno polje, stražnji sektor ciklone i stražnju stranu doline (prizemno).

| PSD                             | SSD                              | DSD                           | W                 | Cv               | Dol                  | Bp                    | Oznaka             |
|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------|------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
| Prednja strana doline / ciklone | Stražnja strana doline / ciklone | Donja strana doline / ciklone | Zonalno strujanje | Visinska ciklona | Visinska dolina – os | Bez-gradijentno polje | <i>Objašnjenje</i> |
| 32                              | 9                                | 1                             | 2                 | 4                | 1                    | 1                     | <i>Broj</i>        |
| 64                              | 18                               | 2                             | 4                 | 8                | 2                    | 2                     | <i>%</i>           |

Tablica 5. LOKS-ovi povezani s pripadnim visinskim sinoptičkim sustavima i objašnjenje kratica



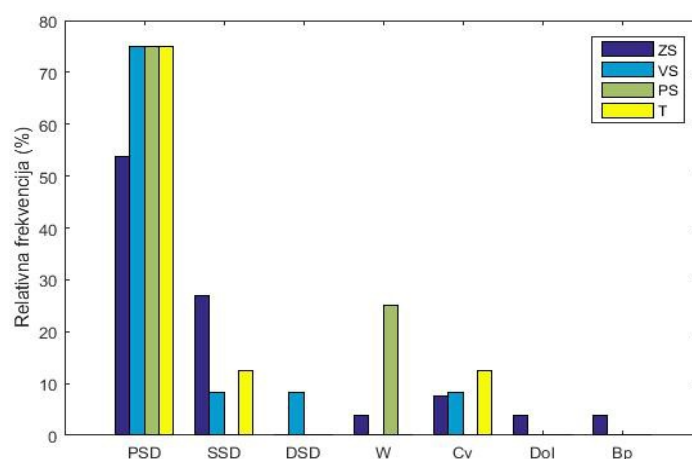
Slika 26. Relativna frekvencija LOKS-ova povezanih s pripadnim visinskim sinoptičkim sustavima. Objašnjenja kratica navedena su u tablici 5.

U svim konvektivnim sezonama, osim 2012., dominira prednja strana doline po visini i pripadno jugozapadno strujanje (tablica 6).

|               | PSD | SSD | DSD | W | Cv | Dol | Bp |
|---------------|-----|-----|-----|---|----|-----|----|
| 2010          | 3   | 2   | 0   | 0 | 1  | 0   | 0  |
| 2011          | 6   | 2   | 0   | 0 | 0  | 0   | 0  |
| 2012          | 0   | 1   | 0   | 0 | 0  | 0   | 0  |
| 2013          | 5   | 0   | 0   | 1 | 1  | 1   | 0  |
| 2014          | 3   | 2   | 1   | 0 | 1  | 0   | 0  |
| 2015          | 3   | 0   | 0   | 0 | 0  | 0   | 0  |
| 2016          | 4   | 2   | 0   | 0 | 0  | 0   | 0  |
| 2017          | 8   | 0   | 0   | 1 | 1  | 0   | 1  |
| <i>Ukupno</i> | 32  | 9   | 1   | 2 | 4  | 1   | 1  |

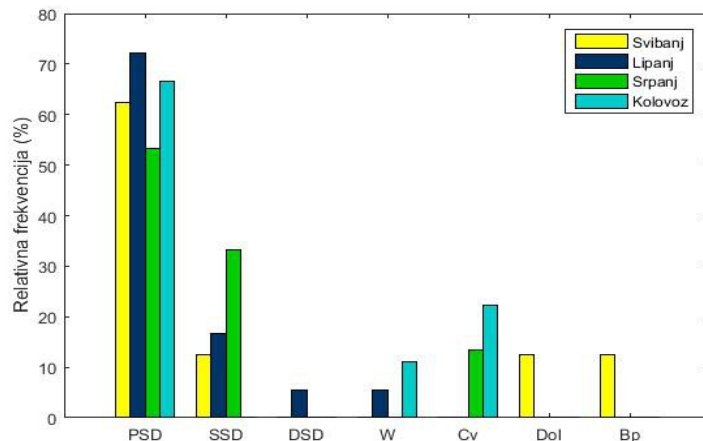
Tablica 6. LOKS-ovi povezani s pripadnim visinskim sinoptičkim sustavima i njihova raspodjela po konvektivnim sezonama (2010. - 2017.)

Analizom raspodjela pojedinih visinskih sustava po tipovima uočava se izrazita dominacija prednje strane visinske doline i jugozapadnog režima strujanja kod tipa s vodećom i paralelnom stratiformnom oborinom, i kod transformacije među tipovima. Taj tip vremena nešto malo manje dominira u najčešćem LOKS-u, onome sa zaostajućom stratiformnom oborinom, gdje bitnu ulogu ima i stražnja strana doline. Tip s paralelnom stratiformnom oborinom u više od 20% slučajeva javlja se kod zonalnog strujanja (slika 27).



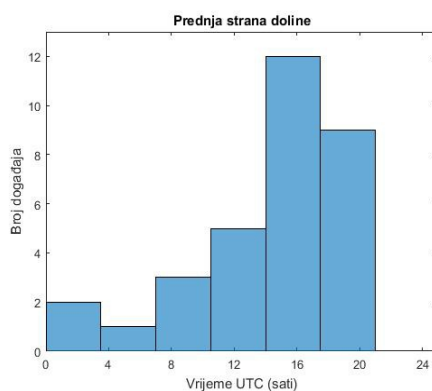
Slika 27. Relativna frekvencija visinskih sinoptičkih sustava po tipovima LOKS-ova (tip ZS, tip VS, tip PS, tip T)

U svim mjesecima većina LOKS-ova dogodila se pod utjecajem prednje strane visinske doline uz jugozapadni režim strujanja, s tim da se srpanj ističe po nešto većem broju LOKS-ova koji su se dogodili na stražnjoj strani visinske doline (slika 28).



Slika 28. Relativna frekvencija LOKS-ova vezanih uz pojedine visinske sustave, po mjesecima (svibanj, lipanj, srpanj, kolovoz)

LOKS-ovi na prednjoj strani visinske doline najčešće se pojavljuju između 14 i 21 UTC (16-23 sata po lokalnom vremenu) (slika 29), dok se na stražnjoj strani visinske doline obično javljaju ranije tijekom dana, između 10 i 16 UTC (12-18 sati po lokalnom vremenu).



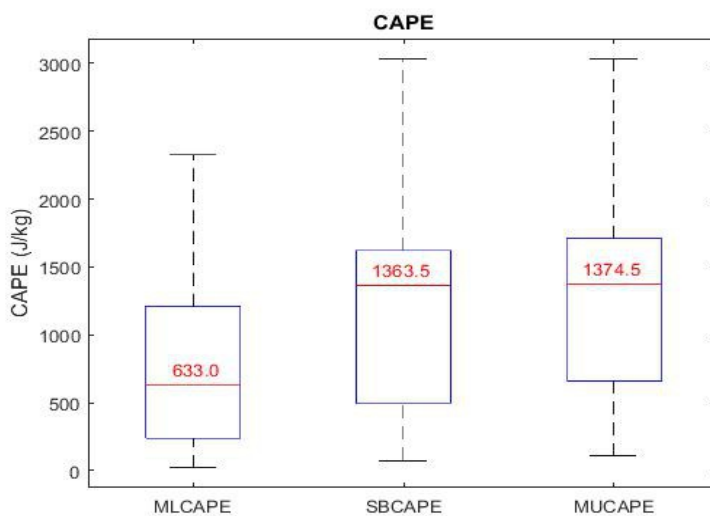
Slika 29. Histogram vremena pojavljivanja LOKS-ova na prednjoj strani visinske doline

### 3.3. Termodinamička svojstva

#### 3.3.1. Konvektivna raspoloživa potencijalna energija (CAPE)

Vrijednosti MLCAPE-a, izračunate iz radiosondažnih mjerenja na postaji Zagreb-Maksimir u slučajevima linijski organizirane konvekcije javljale su se u rasponu od 24 do 2331 J/KG, s medijanom od 633 J/kg. Donji kvartil iznosi 239, a gornji 1211 J/kg. Vrijednosti SBCAPE-a i MUCAPE-a su veće. SBCAPE ima vrijednosti od 72 do 3031 J/kg, s medijanom od 1363 J/kg, donjim kvartilom od 500 J/kg i gornjim kvartilom od 1620 J/kg. MUCAPE ima slične vrijednosti kao SBCAPE. Vrijednosti mu iznose od 110 do 3031 J/kg. Medijan iznosi 1374 J/kg, donji kvartil 660, a gornji kvartil 1712 J/kg (slika 30). Vrijednosti MLCAPE-a su niže od SBCAPE-a jer se većina LOKS-ova razvila u poslijepodnevnim i večernjim satima.

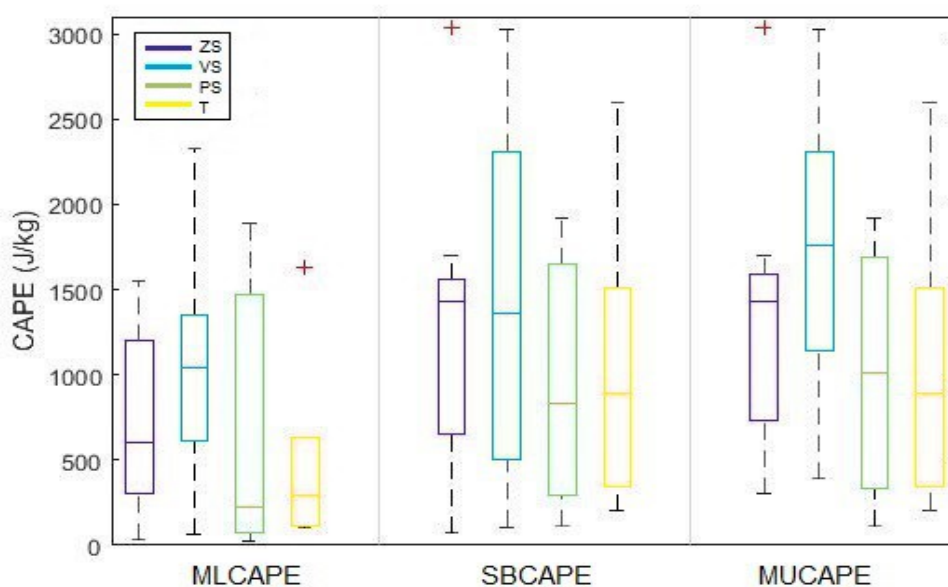
Vrijednosti MLCAPE-a (Bunkers i sur., 2002) u istraživanju Blusteina i Jaina (1985.) iznosile su od 1340 do 2820 J/kg. U istraživanju Parkera i Johnsona (2000.) navodi se "srednjak" (engl. mean) CAPE-a čije su vrijednosti bile od 813 J/kg (tip s paralelnom stratiformnom oborinom) do 1605 J/kg (tip sa zaostajućom stratiformnom oborinom).



Slika 30. Statističke vrijednosti konvektivne raspoložive potencijalne energije: MLCAPE, SBCAPE i MUCAPE

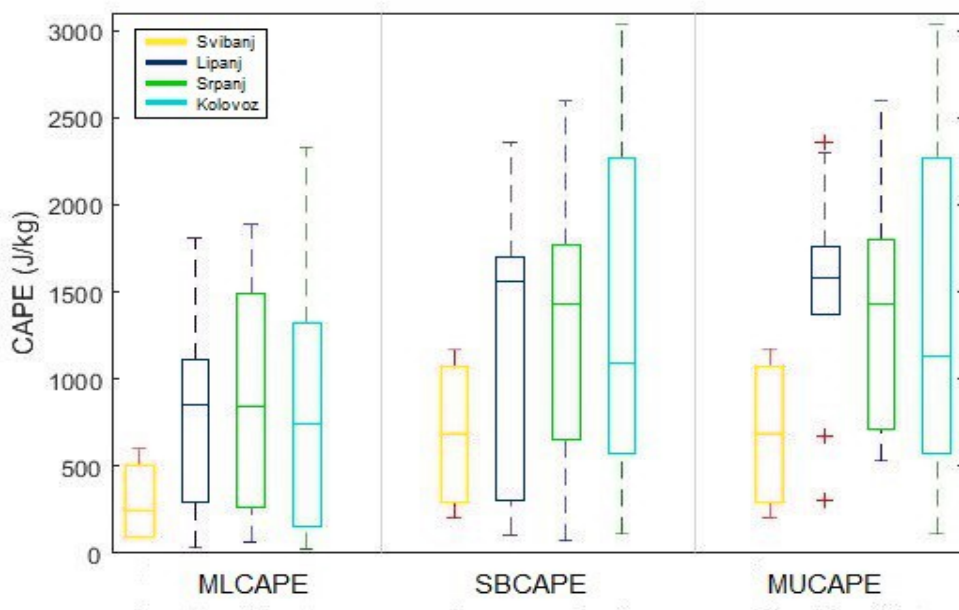
Za sve tipove LOKS-ova MLCAPE je niži od ostale dvije vrste CAPE-a. Razlog tome je što je SBCAPE veći od MLCAPE-a u poslijepodnevnim i ranim večernjim satima, kada se dogodila većina LOKS-ova u ovom istraživanju. MUCAPE je veći od MLCAPE-a jer uzima u obzir najveći CAPE podižući čest iz donjih 300 hPa. MLCAPE je najveći kod tipa s vodećom stratiformnom oborinom (medijan iznosi 1042 J/kg), a najmanji kod tipa s

paralelnom stratiformnom oborinom (222 J/kg) i kod transformacije tipova (295 J/kg). Vrijednosti SBCAPE-a veće su kod tipova s vodećom i zaostajućom stratiformnom oborinom (medijan iznosi oko 1400 J/kg), a niže kod tipa s paralelnom stratiformnom oborinom i transformacija (oko 850 J/kg). Najveća vrijednost SBCAPE-a zabilježena je kod tipa s vodećom stratiformnom oborinom (3031 J/kg). Gledajući medijane, MUCAPE je najveći kod tipa s vodećom stratiformnom oborinom (1756 J/kg), niži kod tipa sa zaostajućom (1427 J/kg) i paralelnom stratiformnom oborinom (1015 J/kg), a najniži kod transformacije tipova (893 J/kg). Maksimalnu vrijednost postiže kod tipa s vodećom stratiformnom oborinom (3031 J/kg). Kod tog tipa LOKS-a bilježe se najveće vrijednosti sva tri CAPE-a (slika 31).



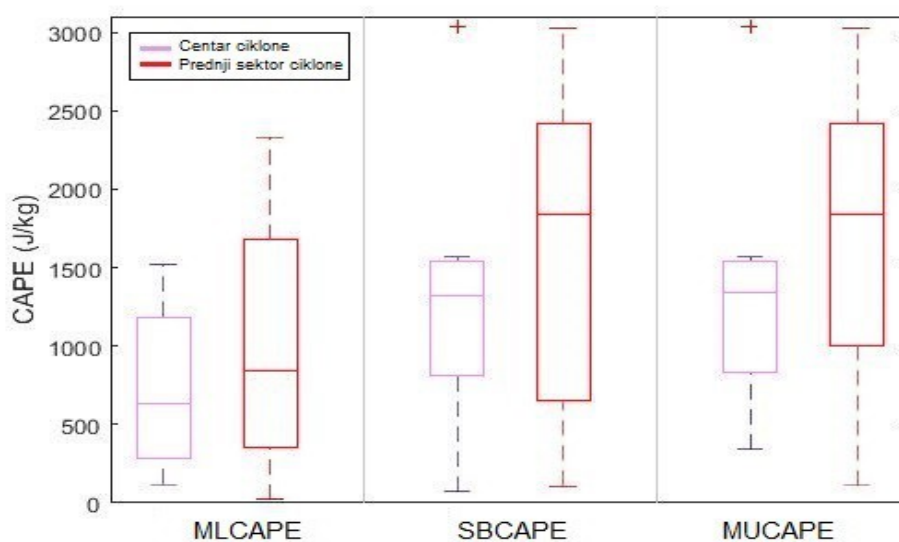
Slika 31. Statističke vrijednosti konvektivne raspoložive potencijalne energije (MLCAPE, SBCAPE, MUCAPE) po tipovima (tip ZS, tip VS, tip PS, tip T)

Analizirajući medijane po mjesecima, najveće vrijednosti sva tri CAPE-a zabilježene su u lipnju, a najniže u svibnju. MLCAPE u lipnju je iznosio 853 J/kg, slično kao u srpnju i kolovozu (844 i 747 J/kg), a najniži je bio u svibnju (247 J/kg) (slika 32).



Slika 32. Statističke vrijednosti konvektivne raspoložive potencijalne energije po mjesecima (svibanj, lipanj, srpanj, kolovoz)

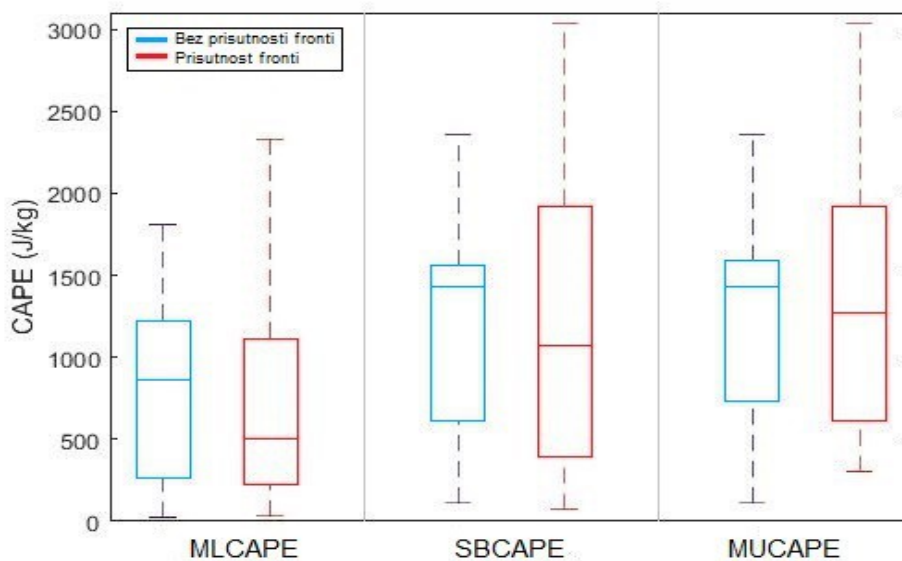
Sva tri CAPE-a veća su kod LOKS-ova povezanih s *prednjim sektorom ciklone* nego kod onih povezanih s centrom ciklone. U nestabilnoj atmosferi CAPE se povećava povećanjem temperature i vlažnosti zraka u graničnom sloju (Murugavel i sur., 2012), a u prednjem sektoru ciklone prevladava advekcija toplog i vlažnog zraka nad promatrano područje. Odstupanja SBCAPE-a i MUCAPE-a između dvije sinoptičke situacije veća su nego odstupanja MLCAPE-a. Medijan MLCAPE-a kod LOKS-ova povezanih s centrom ciklone iznosi 633 J/kg, a kod onih povezanih s prednjim sektorom ciklone 844 J/kg. Medijani SBCAPE-a i MUCAPE-a povezani s centrom ciklone iznose 1318 i 1340 J/kg, u odnosu na one povezane s prednjim sektorom ciklone od 1838 J/kg. Gornji kvartil MLCAPE-a za oko 500 J/kg veći je kod prednjeg sektora ciklone, a SBCAPE-a i MUCAPE-a za oko 900 J/kg u odnosu na LOKS-ove u prisutnosti centra ciklone. Maksimalne vrijednosti MLCAPE-a između ta dva sinoptička sustava razlikuju se za oko 800 J/kg, a SBCAPE-a i MUCAPE-a za oko 1500 J/kg (kod prednjeg sektora ciklone vrijednosti SBCAPE-a i MUCAPE-a dostižu i više od 3000 J/kg) (slika 33).



Slika 33. Statističke vrijednosti konvektivne raspoložive potencijalne energije za dvije najčešće prizemne sinoptičke situacije: centar ciklone i prednji sektor ciklone

Analizirajući medijane, sva tri CAPE-a veća su kod LOKS-ova formiranih *bez prisutnosti sinoptičkih fronti* nego kod onih koji su formirani uz prisutnost fronti. Moglo bi se zaključiti da su zbog mehanizma dizanja zraka u prisutnosti fronte potrebne manje vrijednosti CAPE-a za formiranje LOKS-ova. Medijani MLCAPE-a, SBCAPE-a i MUCAPE-a redom se razlikuju za oko 350, 350 i 160 J/kg, a gornji kvartili za oko 110, 360 i 330 J/kg. Međutim, maksimalne vrijednosti CAPE-a zabilježene su u slučajevima u kojima su bile prisutne fronte (SBCAPE i MUCAPE imali su vrijednosti i do 3000 J/kg) (slika 34).

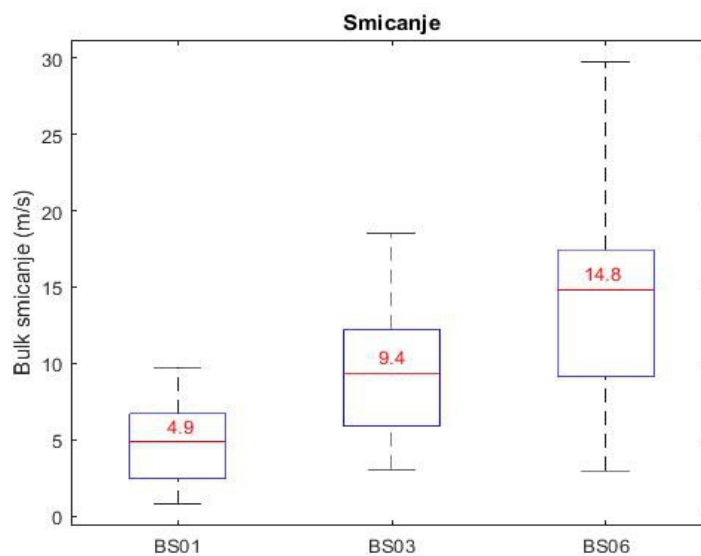




Slika 34. Statističke vrijednosti konvektivne raspoložive potencijalne energije: u odsutnosti sinoptičkih fronti i u slučajevima kad su bile prisutne sinoptičke fronte

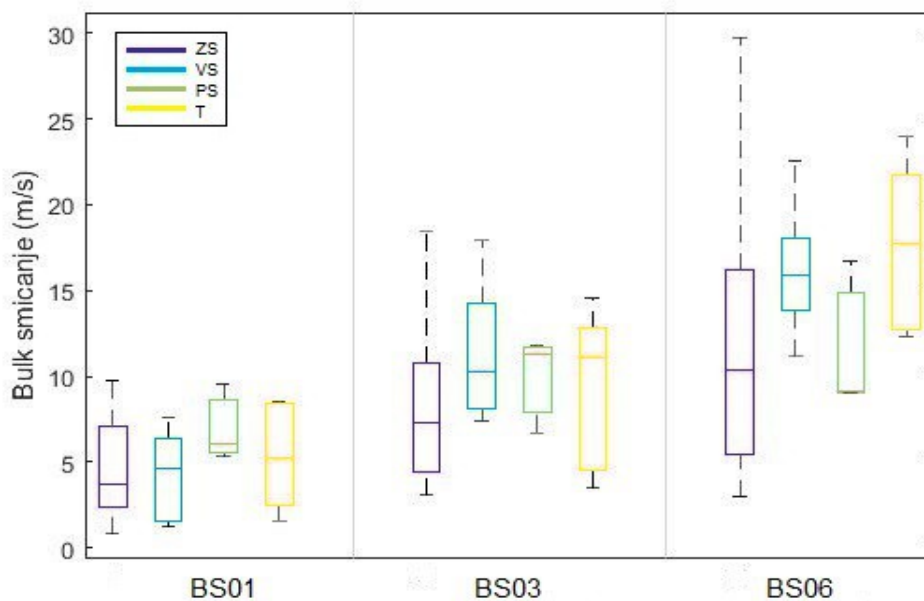
### 3.3.2. Vertikalno smicanje vjetra

Vrijednosti "bulk" smicanja vjetra 0-1 km su u rasponu od 0.8 do 9.7 m/s, s medijanom od 4.9 m/s, donjim kvartilom od 2.4 m/s i gornjim kvartilom od 6.7 m/s. Smicanje vjetra 0-3 km je veće, s vrijednostima od 3.1 do 18.5 m/s i medijanom od 9.4 m/s. Interkvartilni raspon iznosi od 5.9 do 12.2 m/s. Najveće vrijednosti ima smicanje 0-6 km, a iznosi od 3 do 29.7 m/s. Medijan iznosi 14.8 m/s, a interkvartilni raspon 9.1 – 17.4 m/s (slika 35).



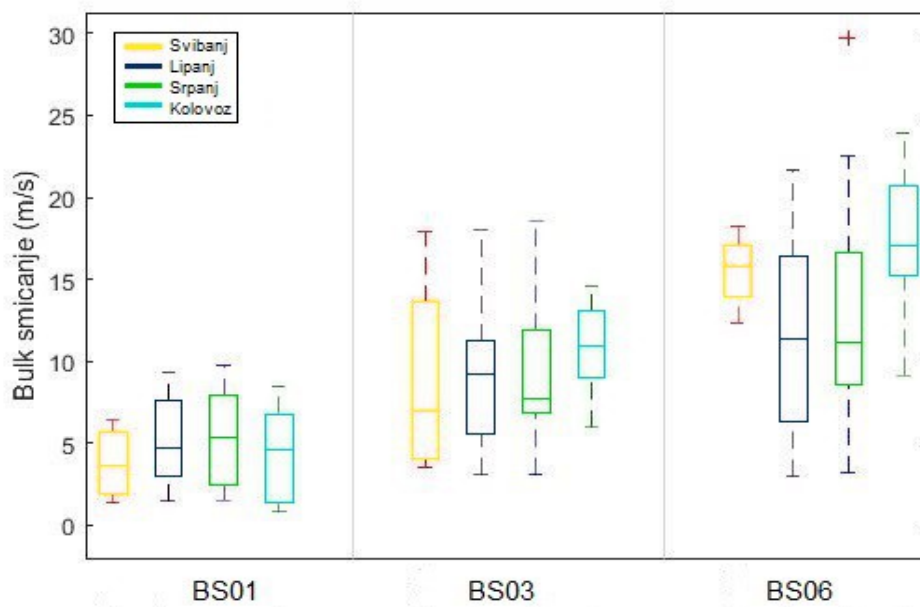
Slika 35. Statističke vrijednosti glavnog smicanja vjetra 0-1 km (BS01), 0-3 km (BS03) i 0-6 km (BS06)

Analizirajući medijane po tipovima LOKS-ova, najmanje vrijednosti smicanja 0-1 km ima tip sa zaostajućom stratiformnom oborinom (3.8 m/s), a najveće tip s paralelnom stratiformnom oborinom (6.1 m/s). Isto vrijedi i za smicanje 0-3 km: najmanje je kod tipa sa zaostajućom stratiformnom oborinom (7.2 m/s), a najveće kod tipa s paralelnom stratiformnom oborinom (11.3 m/s). Smicanje vjetra 0-6 km najmanje je kod tipa s paralelnom stratiformnom oborinom (9.2 m/s), a najveće kod *transformacije tipova* (17.7 m/s) i tipa s vodećom stratiformnom oborinom (15.9 m/s) (slika 36).



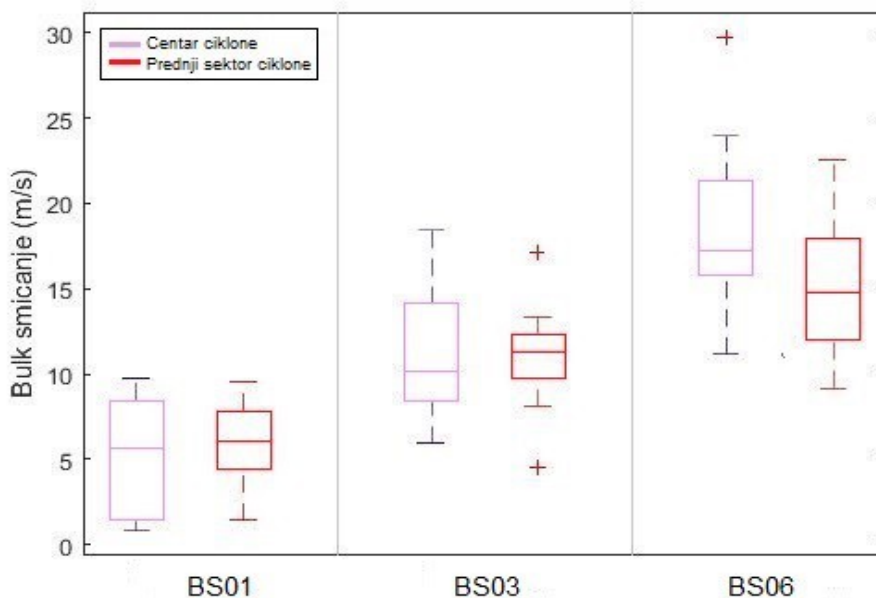
Slika 36. Statističke vrijednosti glavnog smicanja vjetra 0-1 km, 0-3 km i 0-6 km, po tipovima (tip ZS, tip VS, tip PS, tip T)

Vrijednosti vertikalnog smicanja vjetra 0-1 km ne razlikuju se puno među analiziranim mjesecima (medijan iznosi od 3.7 m/s u svibnju do 5.3 m/s u srpnju). Najniža vrijednost medijana smicanja 0-3 km je u svibnju (6.9 m/s), a najviša u kolovozu (10.9 m/s). Smicanje 0-6 km najmanje je u srpnju (11.2 m/s), a najveće u kolovozu (17 m/s) (slika 37). Smicanje 0-6 km (točnije, magnituda vektorske razlike vjetra 0-6 km) između 10 i 20 m/s, kakvo se javilo kod velikog broja ovdje promatranih LOKS-ova, smatra se umjerenim i pogoduje multićelijskom razvoju. Vrijednosti veće od 20 m/s smatraju se jakim smicanjem koje doprinosi razvoju superćelija (koje u tom slučaju mora biti i dublje), iako ono nije jedini čimbenik koji određuje vrstu konvektivnih ćelija (Markowski i Richardson, 2010). Vrijednosti veće od 20 m/s pojavile su se u vrlo malom broju slučajeva.



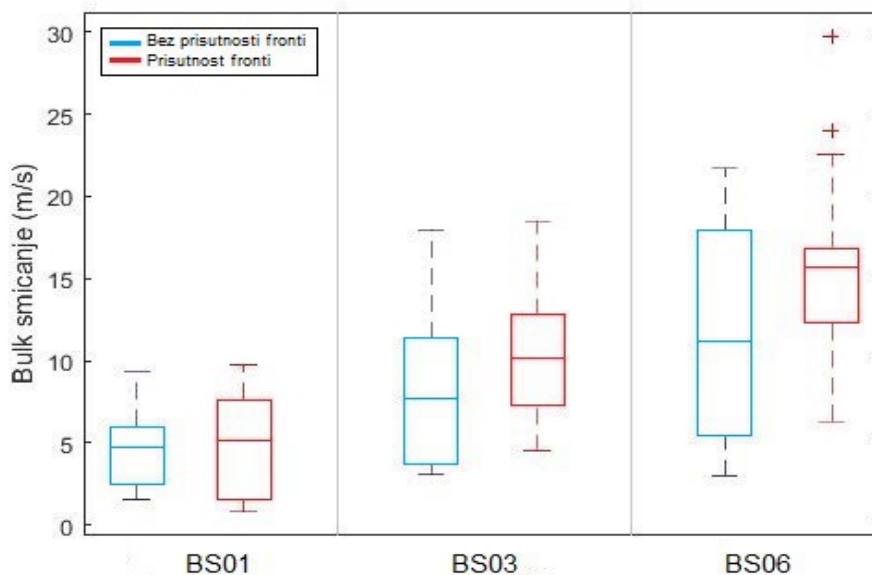
Slika 37. Statističke vrijednosti glavnog smicanja vjetra 0-1 km, 0-3 km i 0-6 km, po mjesecima (svibanj, lipanj, srpanj, kolovoz)

Vrijednosti smicanja vjetra 0-1 km i 0-3 km slične su kod LOKS-ova povezanih s centrom ciklone i prednjim sektorom ciklone. Smicanje 0-6 km nešto je veće u prisutnosti *centra ciklone* (medijan iznosi 17.2 m/s) (slika 38).



Slika 38. Statističke vrijednosti glavnog smicanja vjetra 0-1 km, 0-3 km i 0-6 km, za dvije najčešće prizemne sinoptičke situacije: centar ciklone i prednji sektor ciklone

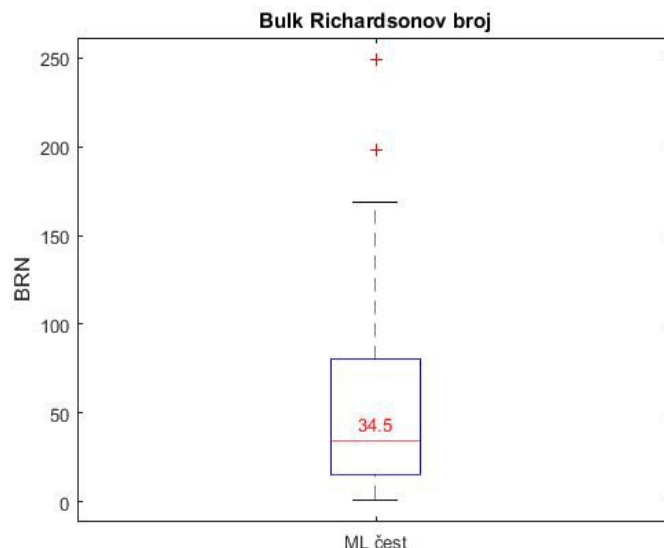
Smicanje na sva tri nivoa veće je uz *prisutnost sinoptičkih fronti*, osobito smicanje 0-6 km (medijan iznosi 15.7 m/s, u odnosu na 11.2 m/s). Ovakav rezultat je očekivan zbog utjecaja same fronte. U prisutnosti fronte vjetar mijenja smjer (Pandžić, 2002) (slika 39).



Slika 39. Statističke vrijednosti glavnog smicanja vjetra 0-1 km, 0-3 km i 0-6 km: u odsutnosti sinoptičkih fronti i uz prisutnost sinoptičkih fronti

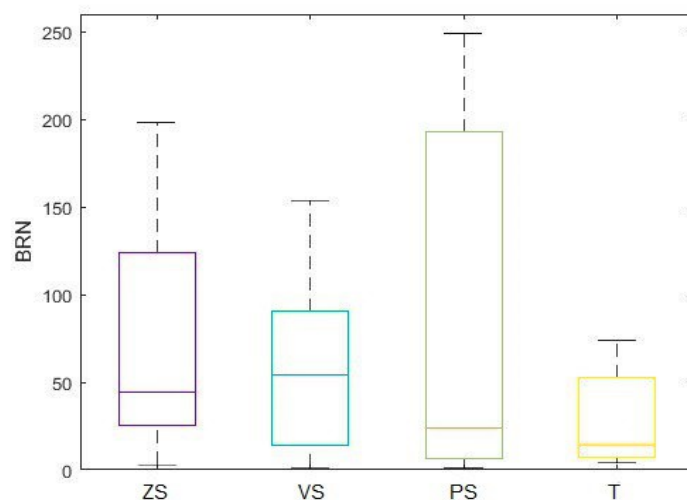
### 3.3.3. Bulk Richardsonov broj

Na grafičkom prikazu vrijednosti bulk Richardsonova broja odbačen je datum 16. srpnja 2014. kad je taj broj iznosio 8584, što je jako velika vrijednost u odnosu na ostale datume. Uzimajući u obzir tu činjenicu, vrijednosti bulk Richardsonova broja za preostale konvektivne dane iznosile su od 0.92 do 249. Medijan je iznosio 34.5, a interkvartilni raspon 15.4 – 80.3 (slika 40). U istraživanju Bluesteina i Jaina (1985.) vrijednosti bulk Richardsonova broja bile su u rasponu od 26 do 111.



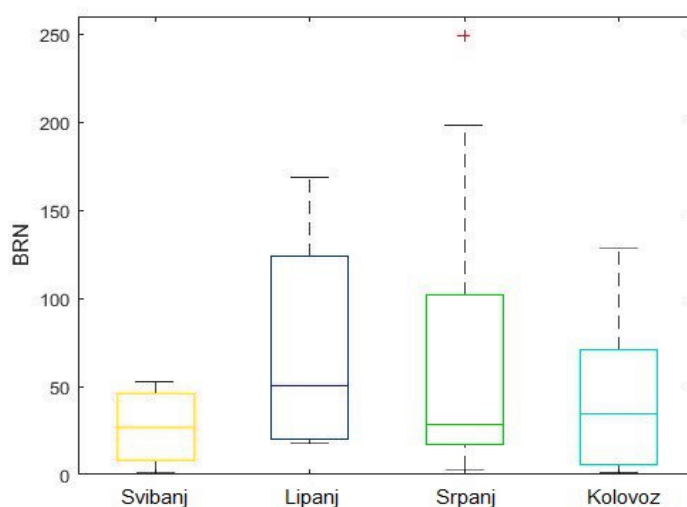
Slika 40. Statističke vrijednosti bulk Richardsonova broja za izmiješani sloj (engl. mixed layer, skraćeno ML) u najdonjih 100 hPa

Medijan bulk Richardsonova broja najveći je kod tipa s vodećom stratiformnom oborinom (54.3), zatim slijedi tip sa zaostajućom stratiformnom oborinom (44.5), tip s paralelnom stratiformnom oborinom (23.7), te transformacija tipova (13.9) (slika 41). Bulk Richardsonov broj od 8583.9 zabilježen je kod LOKS-a sa zaostajućom stratiformnom oborinom. Prema Weismanu i Klempu (1982.), može se zaključiti da tipovi s vodećom i zaostajućom stratiformnom oborinom imaju sklonost razvoju multićelijskih oluja, dok tipovi s paralelnom stratiformnom oborinom i transformacije među tipovima imaju sklonost razvoju superćelija. Međutim, superćelije se općenito razvijaju pri visokim vrijednostima CAPE-a i smicanja (Rasmussen i Blanchard, 1998) pa bulk Richardsonov broj treba interpretirati na taj način. U istraživanju Rasmussena i Blancharda (1998.) vrijednosti medijana ukupnog CAPE-a kod superćelija bile su iznad 1000 J/kg, a vrijednosti medijana BL-6 km smicanja (BL, od engl. boundary layer – granični sloj) bile su veće od 18 m/s. Tipovi s paralelnom stratiformnom oborinom i transformacije među tipovima u ovom radu imali su medijan MLCAPE-a manji od 300 J/kg. Razvoju multićelija pogoduju i umjerene vrijednosti smicanja (Weisman i Klemp, 1982), a veliki bulk Richardsonov broj dobije se kod malih vrijednosti vertikalnog smicanja vjetra.



Slika 41. Statističke vrijednosti bulk Richardsonova broja za izmiješani sloj u najdonjih 100 hPa, po tipovima (tip ZS, tip VS, tip PS, tip T)

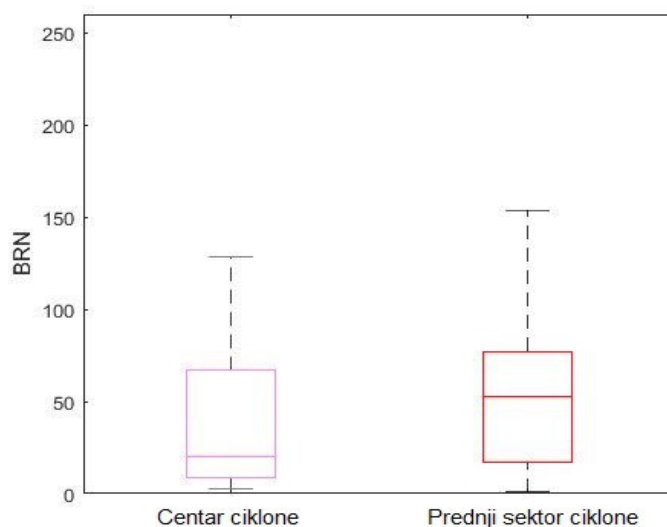
Gledajući medijane bulk Richardsonova broja po mjesecima, najniže vrijednosti ima svibanj (26.7), a najviše lipanj (50.6) (slika 42). Bulk Richardsonov broj od 8583.9 zabilježen je u srpnju.



Slika 42. Statističke vrijednosti bulk Richardsonova broja za izmiješani sloj u najdonjih 100 hPa, po mjesecima (svibanj, lipanj, srpanj, kolovoz)

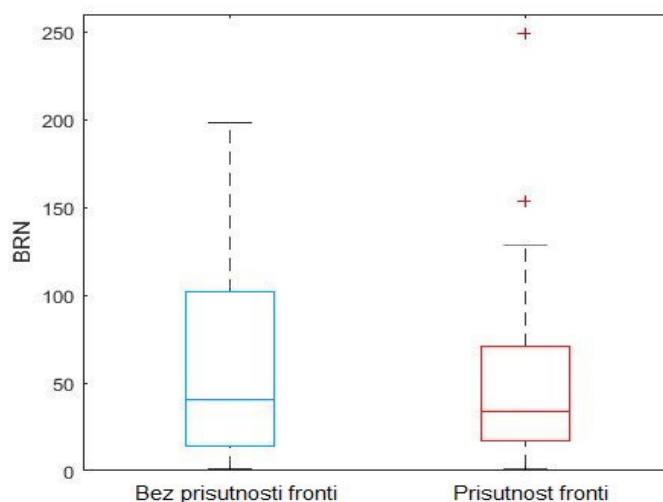
Medijan bulk Richardsonova broja za LOKS-ove povezane s *prednjim sektorom ciklone* (52.8) veći je nego onaj za LOKS-ove povezane s centrom ciklone (20.3). Maksimalne vrijednosti visoke su za obje sinoptičke situacije: za centar ciklone 128.1 i za

prednji sektor ciklone 153.8 (slika 43). Bulk Richardsonov broj od 8583.9 nije zabilježen kod ova dva sustava, već u stražnjem sektoru ciklone, a po visini na stražnjoj strani doline, uz sjeveroistočni režim strujanja.



Slika 43. Statističke vrijednosti bulk Richardsonova broja za izmiješani sloj u najdonjih 100 hPa, za dvije najčešće prizemne sinoptičke situacije: centar ciklone i prednji sektor ciklone

*U odsutnosti sinoptičkih fronti* bulk Richardsonov broj veći je (medijan iznosi 40.6) nego u njihovoj prisutnosti (33.8) (slika 44). Bulk Richardsonov broj od 8583.9 zabilježen je kod LOKS-a bez prisutnosti sinoptičkih fronti.



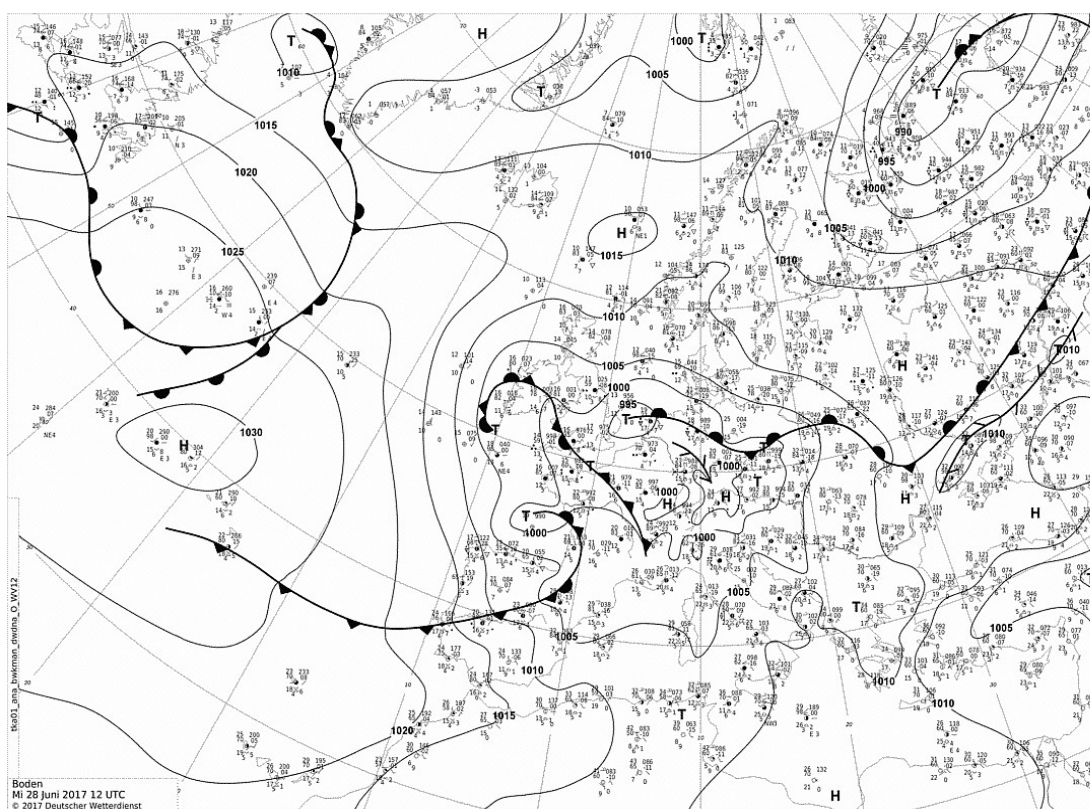
Slika 44. Statističke vrijednosti bulk Richardsonova broja za izmiješani sloj u najdonjih 100 hPa, u odsutnosti sinoptičkih fronti i uz prisutnost sinoptičkih fronti

#### 4. Prikaz slučajeva linijski organiziranih konvektivnih sustava

Za zorniji prikaz sinoptičkih i termodinamičkih uvjeta u kojima nastaju LOKS-ovi odabrane su dvije situacije. Kako je iz prethodnih rezultata vidljivo da se ovi sustavi najčešće javljaju u situacijama u kojima je prizemno prisutan centar ciklone ili prednja strana ciklone, a po visini prednja strana visinske doline, odnosno jugozapadno visinsko strujanje, odabrane su upravo takve dvije situacije.

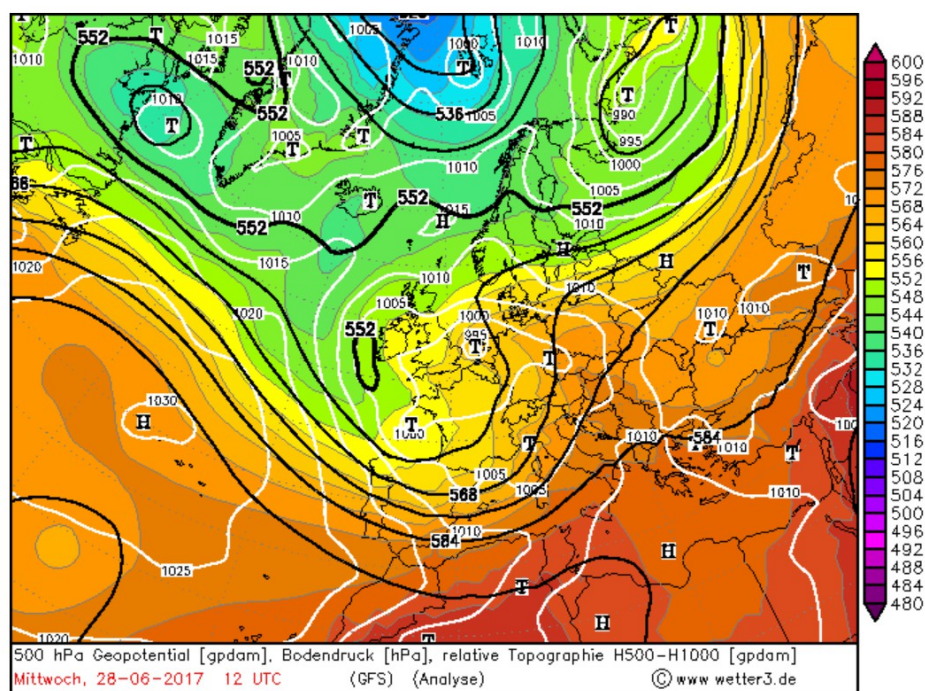
##### 4.1. Prvi slučaj (28. lipnja 2017.)

LOKS se 28. lipnja 2017. razvio u prednjem sektoru ciklone, a sinoptičke fronte bile su udaljene (slika 45). Centar ciklone (995 hPa) u 12 UTC nalazio se kod Britanskog otočja, a kontinentalni dio Hrvatske je bio u području malo sniženog atmosferskog tlaka (1000–1005 hPa). Na 500 hPa plohi (slika 46) uočava se da je promatrano područje bilo na prednjoj strani doline, uz prevladavajući jugozapadni režim strujanja.



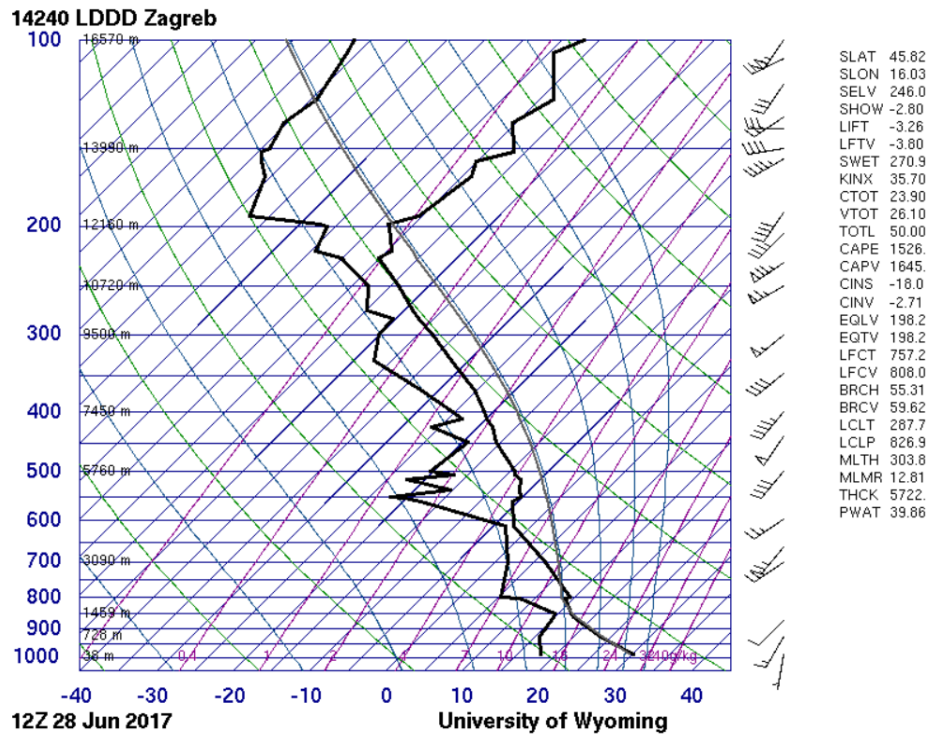
Slika 45. Prizemna sinoptička situacija 28. lipnja 2017. u 12 UTC.  
Izvor: Deutscher Wetterdienstes, <http://wetter3.de>





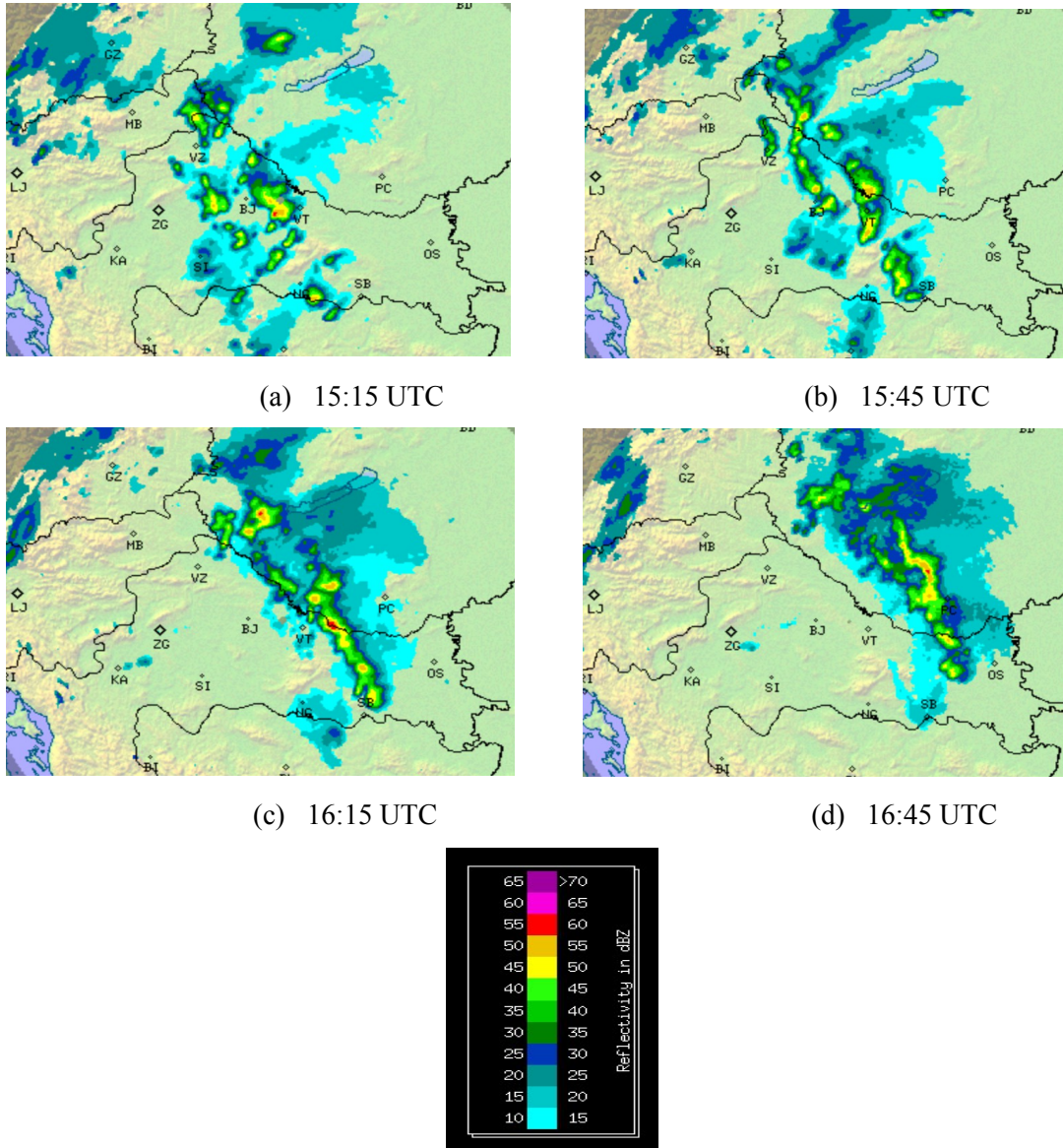
Slika 46. Visinska sinoptička situacija (500 hPa) 28. lipnja 2017. u 12 UTC.  
Izvor: Global Forecast System, <http://wetter3.de>

CAPE izmiješanog sloja iznosio je 1808.43 J/kg, što je velika vrijednost u odnosu na srednjak svih slučajeva (za oko 600 J/kg veća od gornjeg kvartila srednjaka). Nešto je manje odstupanje u odnosu na gornji kvartil MLCAPE-a za slučajeve koji su se razvili u prednjem sektoru ciklone (razlika je oko 130 J/kg). Površinski i najnestabilniji CAPE iznosili su 2354.3 J/kg (za oko 730 i 640 J/kg veći od gornjeg kvartila srednjaka, također velika odstupanja). Te su vrijednosti podjednake s gornjim kvartilom SBCAPE-a i MUCAPE-a za slučajeve u prednjem sektoru ciklone (oko 2400 J/kg). Vrijednosti CAPE-a relativno su visoke kod tipova s vodećom stratiformnom oborinom, kakav je ovaj slučaj. Vertikalno smicanje vjetra u sloju 0-6 km iznosilo je 21.68 m/s (gornji kvartil iznosio je 17.4 m/s). Smicanje veće od 20 m/s u sloju 0-6 km smatra se jakim (Markowski i Richardson, 2010). Bulk Richardsonov broj za čest izmiješanog sloja bio je 86.71 (gornji kvartil iznosio je 80.3). Ovo je jedan od intenzivnijih LOKS-ova što se tiče termodinamičkih parametara. Vrijednosti smicanja mogu ukazivati na sklonost superćelijskom razvoju ovog LOKS-a (i vrijednosti CAPE-a su dovoljno velike da bi to mogli tvrditi, prema Rasumssenu i Blanchardu, 1998.), ali je bulk Richardsonov broj velik i prema Weismanu i Klempu (1982.) za ovu vrijednost BRN-a veća je sklonost razvoju multićelijskog tipa oluje. U ovom slučaju bulk Richardsonov broj možemo smatrati reprezentativnim jer su vrijednosti CAPE-a i smicanja dovoljno velike. Slika 47 prikazuje "skew-T log-P" dijagram radiosondaže u 12 UTC, postaje Zagreb-Maksimir.



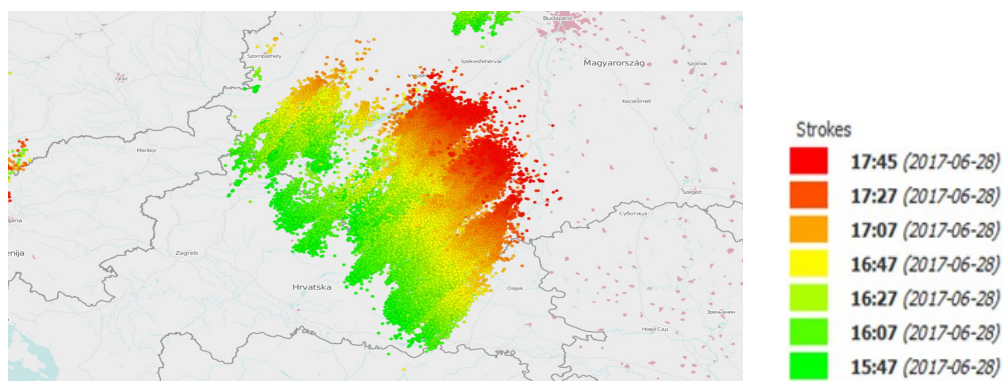
Slika 47. "Skew-T log-P" dijagram radiosondaže 28. lipnja 2017. u 12 UTC. Izvor: internetske stranice Sveučilišta u Wyomingu, <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

U 15:15 UTC na području središnje Hrvatske razvijaju se jedinične ćelije uz koje postoje područja stratiformne oborine (slika 48a). U 15:45 UTC konvektivne ćelije počinju se spajati u liniju (slika 48b). Nakon pola sata (16:15 UTC) konvektivna linija jasno se uočava, a stratiformna oborina dobro je razvijena (slika 48c). LOKS je potpuno formiran i kreće se prema sjeveroistoku, s jačanjem stratiformne oborine ispred konvektivne linije. U 16:45 UTC LOKS je u zreloj fazi, nakon čega reflektivnost konvektivne linije neznatno slabi, a konvektivna oborina postupno prelazi u stratiformnu (slika 48d).



Slika 48. Radarski prikazi LOKS-a tipa VS, u različitim vremenima (UTC), s polusatnim razmacima, 28. lipnja 2017.: a) 15:15, b) 15:45, c) 16:15, d) 16:45. Arhivske radarske snimke Državnog hidrometeorološkog zavoda RH, RC Bilogora

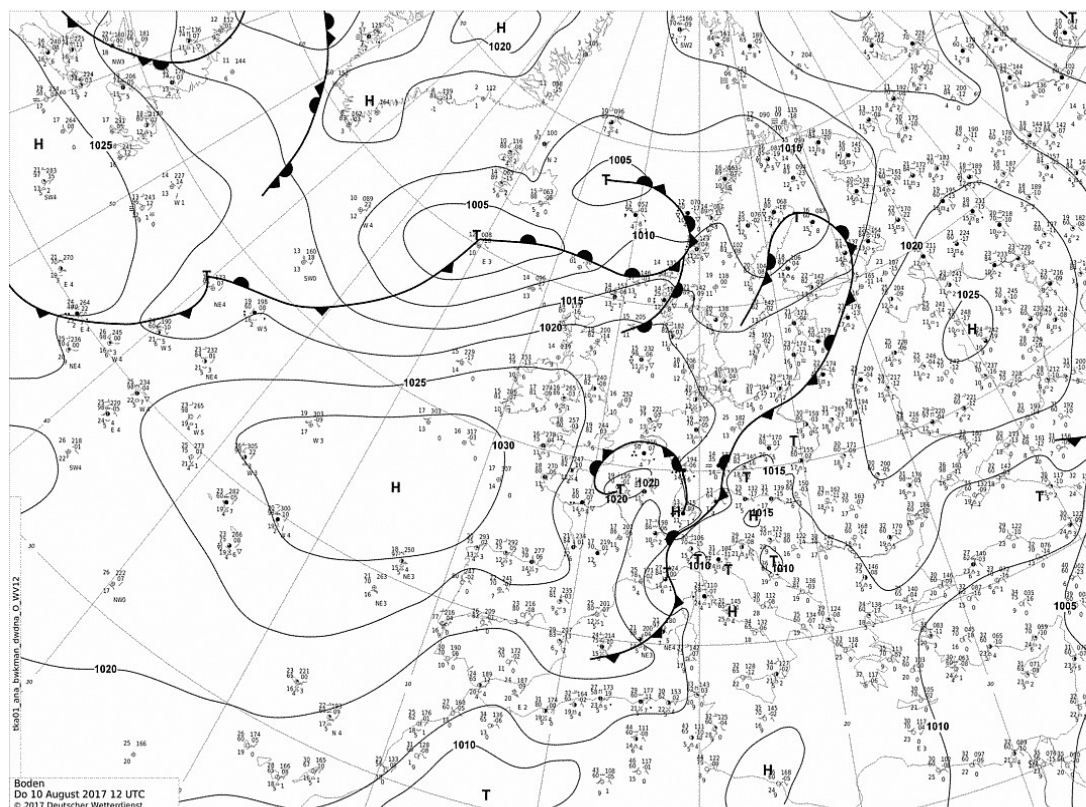
Premještanje LOKS-a u dvosatnom intervalu prikazano je u LINET sustavu, od vremena organiziranja konvektivne linije (15:45 UTC) do 17:45 UTC. Iako je refleksivnost na radarskim snimkama nakon 16:45 bila slabija nego u prethodnom terminu, LOKS je i dalje davao puno munja (slika 49).



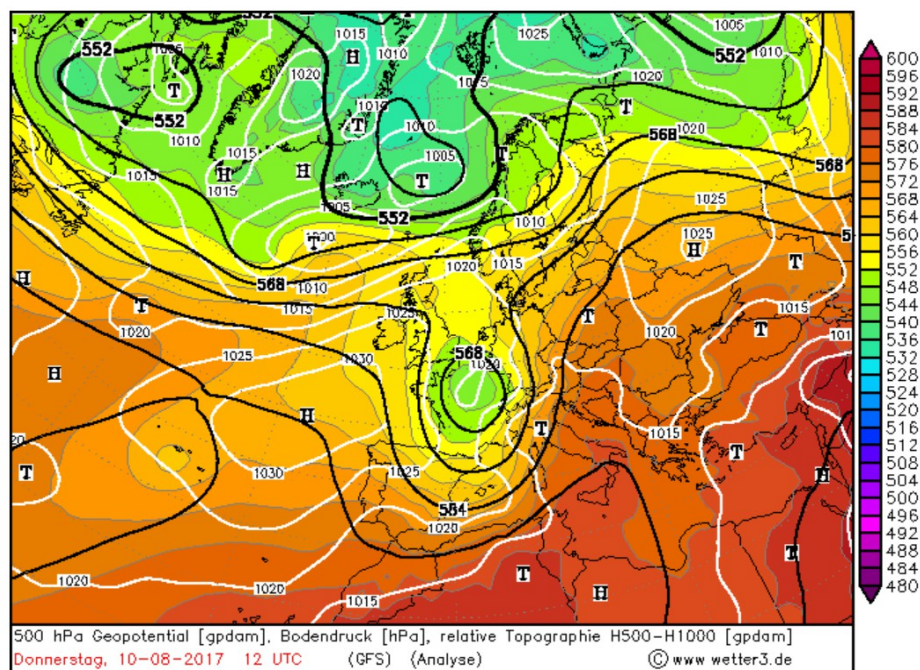
Slika 49. Prostorni i vremenski prikaz munja (LINET) kod LOKS-a tipa VS, 28. lipnja 2017., i njegovo premještanje u dvosatnom intervalu 15:45 – 17:45 UTC. Boje prikazuju vrijeme pojavljivanja munje, prema legendi.

#### 4.2. Drugi slučaj (10. kolovoza 2017.)

Nad područjem Hrvatske 10. kolovoza 2017. u 12 UTC nalazio se centar malo sniženog atmosferskog tlaka (1010 hPa), a sinoptičke fronte nalazile su se zapadnije od Hrvatske (slika 50). Na 500 hPa plohi u 12 UTC (slika 51) Hrvatska se nalazila na prednjoj strani doline, s prevladavajućim jugozapadnim strujanjem.



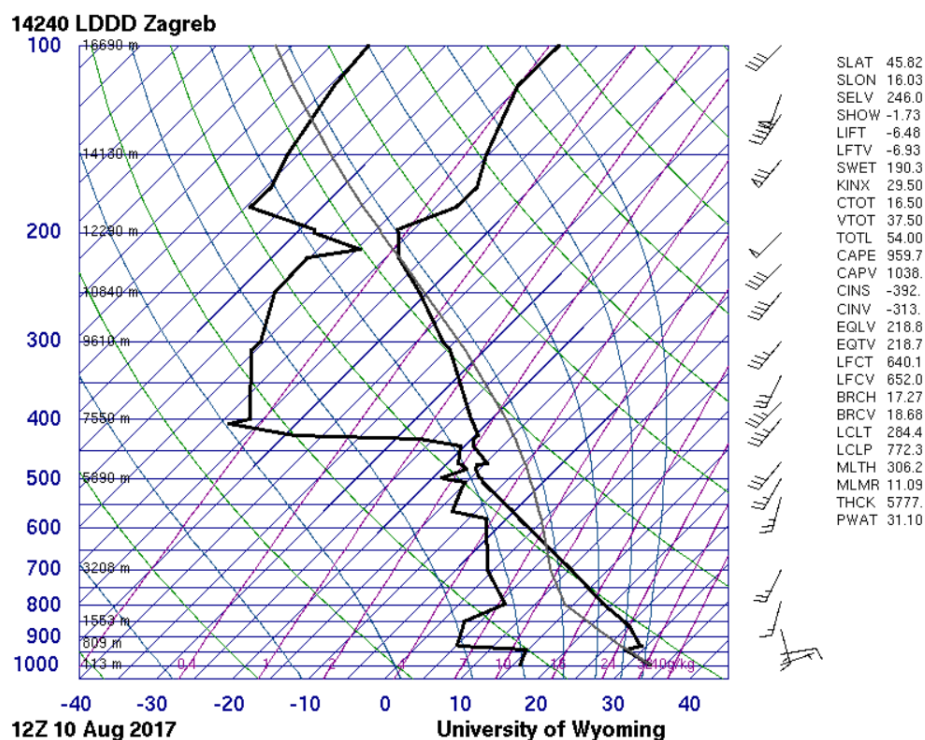
Slika 50. Prizemna sinoptička situacija 10. kolovoza 2017. u 12 UTC  
Izvor: Deutscher Wetterdienstes, <http://wetter3.de>



Slika 51. Visinska sinoptička situacija (500 hPa) 10. kolovoza 2017. u 12 UTC

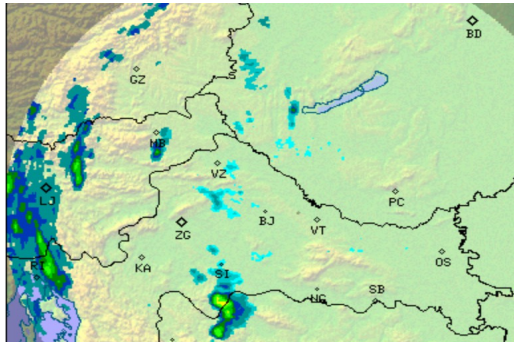
Izvor: Global Forecast System, <http://wetter3.de>

CAPE izmiješanog sloja iznosio je 632.95 J/kg, što odgovara vrijednosti medijana svih slučajeva i medijana za slučajeve koji su se razvili u prisutnosti centra ciklone. Površinski i najnestabilniji CAPE bili su veći (1505.68 J/kg). SBCAPE je za oko 140 J/kg veći od medijana srednjaka i za oko 190 J/kg veći od medijana za slučajeve koji su se razvili u prisutnosti centra ciklone. Vrijednost MUCAPE-a pokazuje slična odstupanja. Za oko 130 J/kg veća je od medijana srednjaka i za oko 165 J/kg od medijana za slučajeve povezane s centrom ciklone. Može se reći da su vrijednosti CAPE-a u ovom slučaju blizu prosječnih. Ovaj tip LOKS-a je transformacija, a kod takvih tipova bilježi se niži CAPE i jače smicanje u sloju 0-6 km. Vertikalno smicanje vjetra u sloju 0-6 km iznosilo je 17.2 m/s, što odgovara medijanu kod slučajeva u prisutnosti centra ciklone. Ovakvo smicanje smatra se umjerenim (Markowski i Richardson, 2010). Bulk Richardsonov broj za čest izmiješanog sloja iznosio je 13.99, što je ispod donjeg kvartila srednjaka svih slučajeva (15.4), a oko medijana za transformirane tipove LOKS-ova, koji imaju najniži BRN. Ovakvo nizak BRN zapravo ne ukazuje na superćelijski LOKS, iako se radi o vrlo razvijenom sustavu. Vertikalno smicanje vjetra nije dovoljno jako za supećelijsku organizaciju ovog LOKS-a (Markowski i Richardson, 2010), ali je dovoljno veliko za jaku multićelijsku organizaciju oluje i da uz postojeći CAPE snizi BRN na vrijednost ispod donjeg kvartila. "Skew-T log-P" dijagram radiosondaže 10. kolovoza 2017. u 12 UTC prikazan je na slici 52.

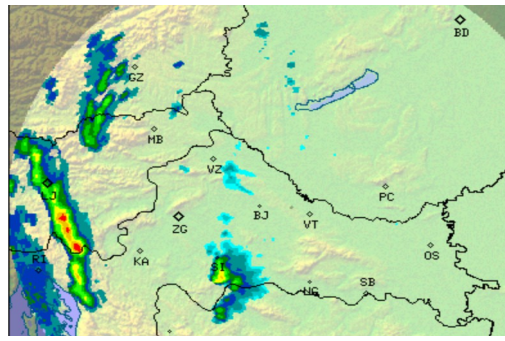


Slika 52. "Skew-T log-P" dijagram radiosondaže 10. kolovoza 2017. u 12 UTC. Izvor: internetske stranice Sveučilišta u Wyomingu, <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

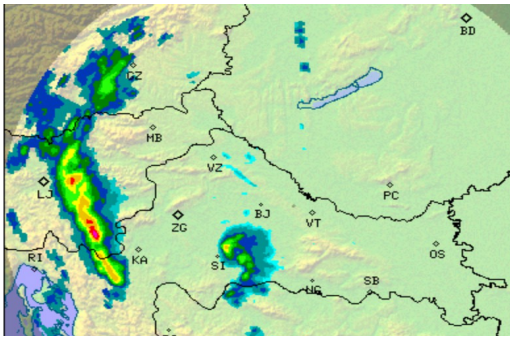
U 15:30 – 16:00 UTC nad područjem Gorskog kotara i Slovenije događa se nagli razvoj LOKS-a. Razvoj započinje iz područja gotovo stratiformne oborine koja prerasta u konvektivnu liniju, za razliku od prethodnog slučaja kada su se konvektivne ćelije spojile u liniju (slika 53a i 53b). S obje strane konvektivne linije postoji usko područje stratiformne oborine s velikim gradijentom u reflektivnosti u odnosu na konvektivnu liniju (slika 53b i 53c). Ovaj LOKS započinje kao tip s paralelnom stratiformnom oborinom. U 17:00 UTC širina konvektivne linije znatno se povećala, a LOKS se kreće dalje prema sjeveroistoku (slika 53d). U 17:30 LOKS razvija stratiformnu oborinu iza konvektivne linije i prelazi u tip sa zaostajućom stratiformnom oborinom (slika 53e). Za pola sata (18:00 UTC) LOKS poprima izrazito razvijena obilježja konvektivne linije i stratiformne oborine, s konvektivnom ćelijom velike radarske reflektivnosti nad područjem sjeverozapadne Hrvatske (slika 53f).



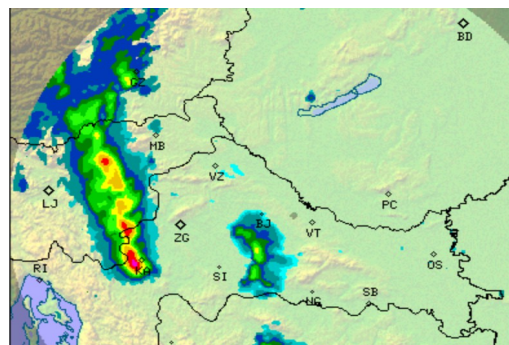
(a) 15:30 UTC



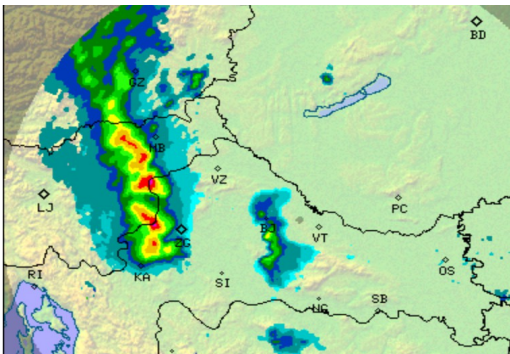
(b) 16:00 UTC



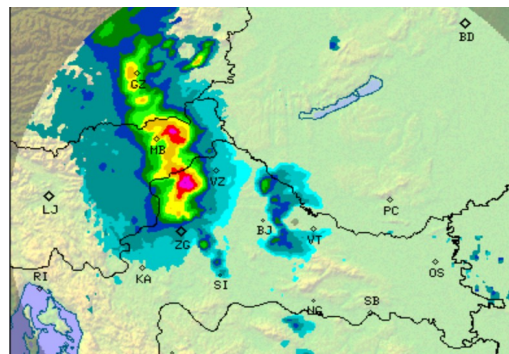
(c) 16:30 UTC



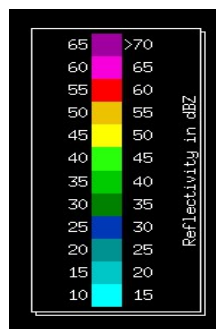
(d) 17:00 UTC



(e) 17:30 UTC

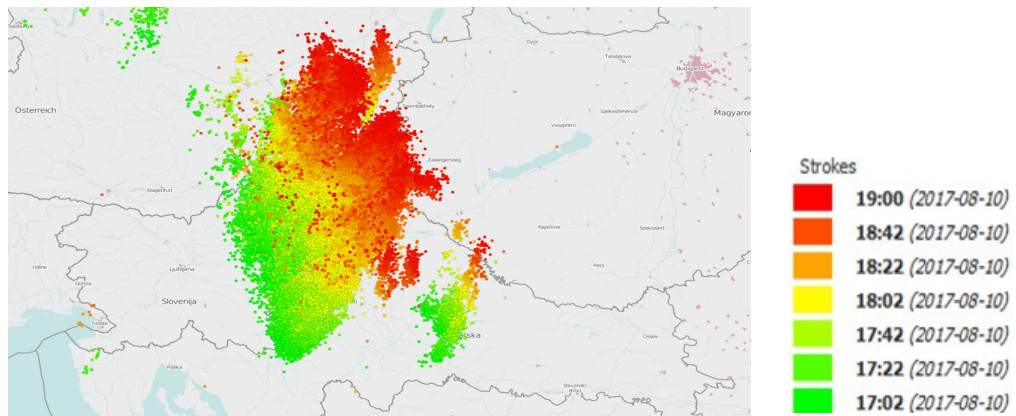


(f) 18:00 UTC



Slika 53. Radarski prikazi LOKS-a tipa T, u različitim vremenima (UTC), s polusatnim razmacima, 10. kolovoza 2017.: a) 15:30, b) 16:00, c) 16:30, d) 17:00, e) 17:30, f) 18:00. Arhivske radarske snimke Državnog hidrometeorološkog zavoda RH, RC Bilogora

Premještanje sustava u razvijenom stupnju prikazano je prostornom i vremenskom raspodjelom munja u dvosatnom intervalu (17 – 19 UTC). LOKS se kretao od jugozapada prema sjeveroistoku i davao je veliki broj munja (slika 54).



Slika 54. Prostorni i vremenski prikaz munja (LINET) kod LOKS-a tipa T, 10. kolovoza 2017., i njegovo premještanje u dvosatnom intervalu 17:00 – 19:00 UTC. Boje prikazuju vrijeme pojavljivanja munje, prema legendi.



## 5. Zaključak

Cilj ovog istraživanja bio je istražiti sinoptičke i termodinamičke karakteristike atmosfere u kojima se nad Hrvatskom javljaju linijski organizirani konvektivni sustavi. Slučajevi su izdvojeni temeljem radarskih podataka i podataka o električnom pražnjenju, a termodinamičke karakteristike atmosfere utvrđene su uz pomoć radiosondažnih podataka. Analiza radarskih odraza pokazala je da je od 50 izdvojenih LOKS-ova najveći broj pripadao tipu sa zaostajućom stratiformnom oborinom, a zatim tipu s vodećom stratiformnom oborinom (prema Parkeru i Johnsonu, 2000.). Najviše LOKS-ova pojavilo se 2017. godine, a najaktivniji mjesec bio je lipanj. Većina ih se formirala poslijepodne i navečer, 12 – 19 UTC, odnosno 14 – 21 sat po lokalnom vremenu. Najčešća prizemna sinoptička situacija u kojoj su se formirali LOKS-ovi bila je prisutnost centra ciklone nad područjem Hrvatske, koji se nije dugo zadržavao, a najčešće se nalazio nad Jadranom. Drugi po učestalosti prizemni sinoptički sustav vezan za LOKS-ove nad Hrvatskom bio je prednji sektor ciklone. Otprilike podjednaki broj slučajeva formirao se uz prisutnost sinoptičkih fronti, kao i u njihovoj odsutnosti pa se može zaključiti da sama prisutnost frontalnih sustava nije odlučujući faktor. Od ukupnog broja slučajeva 22% se dogodilo ispred hladne fronte, a da promatrano područje nije bilo u toplom sektoru ciklone; 14% pri prolasku hladne fronte preko promatranog područja; te 10% u toplom sektoru ciklone. Analizom histograma vremena pojavljivanja LOKS-ova ispred hladne fronte (bez toplog sektora ciklone) i onih bez sinoptičkih fronti, može se zaključiti da za LOKS-ove ispred hladne fronte bitnu ulogu ima predfrontalna konvergencija, a za one bez prisutnosti fronti uz konvergenciju i dnevno zagrijavanje. Za formiranje LOKS-ova ne smije se isključiti lokalni utjecaj orografije. U srednjoj troposferi (promatrana je ploha 500 hPa) kod pojavljivanja LOKS-ova nad Hrvatskom bila je najčešće prisutna prednja strana doline uz jugozapadni režim strujanja. Iz radiosondažnih podataka s postaje Zagreb-Maksimir izračunata je vrijednost CAPE-a, vertikalnog smicanja vjetra na tri nivoa i vrijednost bulk Richardsonova broja. Medijan CAPE-a izmiješanog sloja iznosio je 633 J/kg, površinskog CAPE-a 1363 J/kg, a najnestabilnijeg CAPE-a 1374 J/kg. CAPE izmiješanog sloja bio je manji od površinskog CAPE-a jer se većina LOKS-ova nad Hrvatskom formirala u poslijepodnevnom i večernjim satima (Bunkers i sur., 2002). Medijani CAPE-a izmiješanog sloja i najnestabilnijeg CAPE-a najveći su kod tipa LOKS-ova s vodećom stratiformnom oborinom. Najveće vrijednosti medijana sva tri CAPE-a javljale su se u lipnju. LOKS-ovi povezani s prednjim sektorom ciklone i bez prisutnosti sinoptičkih fronti imaju medijane sva tri CAPE-a veće nego oni povezani s centrom ciklone i uz prisutnost sinoptičkih fronti. Glavno smicanje vjetra 0-1 km iznosilo je 4.9 m/s, 0-3 km 9.4 m/s i 0-6 km 14.8 m/s (medijani). Najveće vrijednosti glavnog smicanja 0-6 km imaju transformacije među tipovima i tip s vodećom stratiformnom oborinom. Glavno smicanje na sva tri nivoa veće je uz prisutnost sinoptičkih fronti (medijani). Medijan bulk Richardsonova broja najveći je

kod tipa s vodećom stratiformnom oborinom (54.3), a najmanji kod transformacije među tipovima (13.9). Kod LOKS-ova u prednjem sektoru ciklone i bez bliže prisutnosti sinoptičkih fronti medijan bulk Richardsonova broja veći je nego kod onih vezanih uz centar ciklone i prisutnost sinoptičkih fronti.

## 6. Sažetak

U ovome radu istražuju se sinoptičke i termodinamičke karakteristike linijski organizirane konvekcije nad Hrvatskom. LOKS-ovi su izdvojeni detaljnim pregledom arhivskih radarskih slika radarskog centra Bilogora, Državnog hidrometeorološkog zavoda Republike Hrvatske. Izdvojeno je 59 LOKS-ova u osam konvektivnih sezona (2010. – 2017.). Konvektivna sezona obuhvaća mjesece svibanj, lipanj, srpanj i kolovoz. Istovremeno je određen tip svakog LOKS-a prema Parkeru i Johnsonu (2000.). Slučajevi su dodatno analizirani u sustavu detekcije munja (LINET), a na temelju provjere devet slučajeva je eliminirano. Preostalo je 50 LOKS-ova, odnosno 48 dana s LOKS-ovima. Analiza po tipovima, sezonama i mjesecima te sinoptička analiza izvršene su prema broju slučajeva, a termodinamička analiza prema broju dana s LOKS-ovima. Broj dana za termodinamičku analizu smanjen je na 33 zbog kriterija o reprezentativnosti radiosondažnih mjerenja („proximity soundings“) (Rasmussen i Blanchard, 1998; Renko i sur., 2016). Sinoptička analiza uključila je analizu prizemnih sinoptičkih karata (DWD analiza njemačke meteorološke službe: Europäischer Wetterbericht - Deutscher Wetterdienstes, <http://wetter3.de>) i tipizaciju vremena prema Poji (1965.). Za analizu visinske situacije, odnosno tipova vremena i režima strujanja, korištena je AT 500 hPa iz analize GFS (Global Forecast System) modela (<http://wetter3.de>). Indeksi nestabilnosti izračunati su pomoću otvorenog ("open-source") programa za analizu sondaža i hodograma - SHARPPy (Blumberg i sur., 2017). Rezultati su pokazali da je najveći broj LOKS-ova bio tipa zaostajuće stratiformne oborine. Najaktivnija godina bila je 2017., a prosječno najaktivniji mjesec lipanj. Većina LOKS-ova formirala se poslijepodne i navečer. Najveći broj LOKS-ova pojavio se za vrijeme prisutnosti centra ciklone nad Hrvatskom. Po visini je promatrano područje bilo pod utjecajem prednje strane visinske doline i jugozapadnog režima strujanja. Od indeksa nestabilnosti izračunati su MLCAPE, SBCAPE i MUCAPE: 633, 1363 i 1374 J/kg; glavno smicanje 0-1 km, 0-3 km i 0-6 km: 4.9, 9.4 i 14.8 m/s; te bulk Richardsonov broj: 34.5 (navedeni su medijani). Na kraju su prikazana dva slučaja: 28. lipnja 2017. i 10. kolovoza 2017.

Ključne riječi: LOKS (linijski organizirani konvektivni sustav), sinoptička analiza, termodinamička analiza, CAPE, smicanje, bulk Richardsonov broj

## 7. Literatura

Bermuda Weather Service, <http://www.weather.bm/helpDocs/RadarHelp/index.html>

Betz HD, Schmidt K, Laroche P, Blanchet P, Oettinger WP, Defer E, Dziewit Z, Konarski J: LINET – An international lightning detection network in Europe. *Atmospheric research*, 2009, Vol 91, str. 564-573

Bluestein HB, Jain MH: Formation of Mesoscale Lines of Precipitation: Severe Squall Lines in Oklahoma during the Spring. *American Meteorological Society*, 1985, Vol 42, No 16, str. 1711-1732

Blumberg WG, Halbert KT, Supinie TA, Marsh PT, Thompson RL, Hart JA: SHARPy: An Open-Source Sounding Analysis Toolkit for the Atmospheric Sciences. *American Meteorological Society*, 2017, str. 1625-1636, DOI: 10.1175/BAMS-D-15-00309.1, in press.

Bunkers MJ, Klimowski BA, Zeitler JW: The importance of parcel choice and the measure of vertical wind shear in evaluating the convective environment. P8.2, 2002, 4 str. <https://pdfs.semanticscholar.org/>

Christian HJ, Blakeslee RJ, Boccippio DJ, Boeck WL, Buechler DE, Driscoll KT, Goodman SJ, Hall JM, Koshak WJ, Mach DM, Stewart MF: Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *J. Geophysical Research*, 2003, Vol 108, str. ACL 4-1 – ACL 4-15

Davidson M: <http://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/training/deep/index.htm>, NCEP, 1999

DHMZ, <http://meteo.hr>, 2017

Doswell CA, Rasmussen EN: The Effect of Neglecting the Virtual Temperature Correction on CAPE Calculations. *American Meteorological Society*, 1994, Vol 9, str. 625-629

Emanuel KA (1994): *Atmospheric Convection*. Oxford University Press, 1994, 580 str.

Grisogono B, Belušić D i bivši studenti 4. godine predbolonjskog studija: Uvod u mezoskalnu meteorologiju i atmosfersku turbulenciju. Grupa za meteorologiju i oceanografiju, Geofizički odsjek, PMF, Sveučilište u Zagrebu. Interne skripte, 2015, 164

str.

Hane CE: Extratropical Squall Lines and Rainbands. Mesoscale Meteorology and Forecasting, American Meteorological Society, 1986, Springer, str. 359-389

Hannesen R, Dotzek N, Gysi H, Beheng KD (1998): Case study of tornado in the Upper Rhine valley. Meteorol. Z., N. F. 7, 1998, str. 163–170

Holton JR: An Introduction to Dynamic Meteorology. Fourth edition. Elsevier academic press, 2004, 535 str.

Horvath K, Lin YL, Ivančan-Picek B: Classification of Cyclone Tracks over the Apennines and the Adriatic Sea. American Meteorological Society, 2008, Vol 136, str. 2210-2227

Houze RA Jr: Structure and Dynamics of a Tropical Squall-Line System. American Meteorological Society, 1977, Vol 105, str. 1540-1567

Houze RA Jr, Smull BF, Dodge P: Mesoscale Organization of Springtime Rainstorms in Oklahoma. American Meteorological Society, 1990, Vol 118, str. 613-654

Houze RA Jr: Stratiform Precipitation in Regions of Convection: A Meteorological Paradox? American Meteorological Society, 1997, Vol 78, No.10, str. 2179-2196

Houze RA Jr: Mesoscale convective systems. Reviews of Geophysics, 2004, Vol 42, RG4003/2004, 43 str.

Kane RJ Jr, Chelius CR, Fritsch JM: Precipitation Characteristics of Mesoscale Convective Weather Systems. American Meteorological Society, 1987, Vol 26, str. 1345-1357

Markowski P, Richardson Y: Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. Royal Meteorological Society. Wiley-Blackwell, 2010, 407 str.

Mikuš P, Telišman Prtenjak M, Strelec Mahović N: Analysis of the convective activity and its synoptic background over Croatia. Atmospheric Research, 2012, Vol 104-105, str. 139-153

Moncrieff MW, Green JSA: The propagation and transfer properties of steady convective overturning in shear. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1972, Vol 98, str. 336-352

Murugavel P, Pawar SD, Gopalakrishnan V: Trends of Convective Available Potential Energy over the Indian region and its effect on rainfall. Royal Meteorological Society. International Journal of Climatology, 2012, Vol 32, str. 1362-1372

Pandžić K: Analiza meteoroloških polja i sustava. Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu. Hinus, 2002, 314 str.

Parker MD i Johnson RH: Organizational Modes of Midlatitude Mesoscale Convective Systems. American Meteorological Society, 2000, Vol 128, str. 3413-3436

Poje D: Tipovi vremena u Jugoslaviji i njihova ovisnost o cirkulaciji atmosfere nad Jugoslavijom. Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, 1965, 215 pp.

Rasmussen EN, Blanchard DO: A Baseline Climatology of Sounding-Derived Supercell and Tornado Forecast Parameters. American Meteorological Society, 1998, Vol 13, str. 1148-1164

Renko T, Kuzmić J, Šoljan V, Strelec Mahović N: Waterspouts in the Eastern Adriatic from 2001 to 2013. Natural Hazards, 2016, Vol 82, pp 441-470

Rotunno R, Klemp JB, Weisman ML: A Theory for Strong, Long-Lived Squall Lines. American Meteorological Society, 1988, Vol 45, No 3, str. 463-485

Schiesser HH, Houze RA Jr, Huntrieser H: The Mesoscale Structure of Severe Precipitation Systems in Switzerland. American Meteorological Society, 1995, Vol 123, str. 2070-2097

Smull BF, Houze RA Jr: A Midlatitude Squall Line with a Trailing Region of Stratiform Rain: Radar and Satellite Observations. American Meteorological Society, 1985, Vol 113, str. 117-133

Strelec Mahović N, Horvath A, Csirmaz K: Numerical simulation of severe convective phenomena over Croatian and Hungarian territory. Atmospheric Research, 2007, Vol 83, str. 121-131

The COMET Program: <https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/shear>, 2018

Thompson R: Explanation of SPC Severe Weather Parameters. Storm Prediction Center, 2006, <https://www.spc.noaa.gov/sfctest/help/sfcoa.html>

University of Wyoming, <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>, 2018

Weather World 2010 project, The Department of Atmospheric Sciences at the University of Illinois at Urbana-Champaign, [http://ww2010.atmos.uiuc.edu\(Gh\)/guides/mtr/svr/comp/wind/cnvt.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu(Gh)/guides/mtr/svr/comp/wind/cnvt.rxml)

Weisman ML, Davis CA: Mechanisms for the Generation of Mesoscale Vortices within Quasi-Linear Convective Systems. American Meteorological Society, 1998, Vol 55, str. 2603-2622

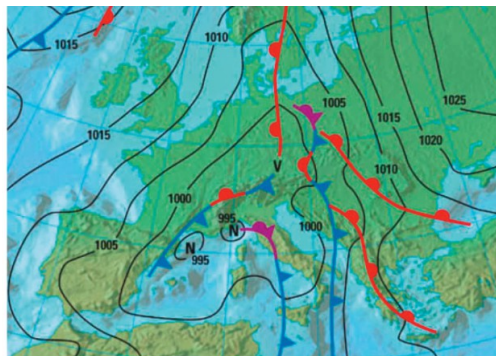
Weisman ML, Klemp JB: The Dependence of Numerically Simulated Convective Storms on Vertical Wind Shear and Buoyancy. American Meteorological Society, 1982, Vol 110, str. 504-520

Wheatley DM, Trapp RJ: The Effect of Mesoscale Heterogeneity of the Genesis and Structure of Mesovortices within Quasi-Linear Convective Systems. American Meteorological Society, 2008, Vol 136, str. 4220-4241

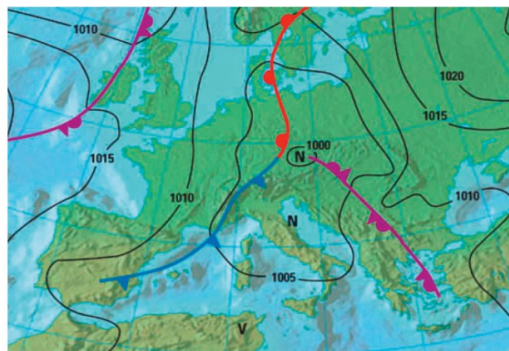
Williams E, Boldi B, Matlin A, Weber M, Hodanish S, Sharp D, Goodman S, Raghavan R, Buechler D: The behaviour of total lightning activity in severe Florida thunderstorms. Atmospheric Research, 1999, Vol 51, str. 245-265

Zaninović K, Gajić-Čapka M, Perčec Tadić M, Vučetić M, Milković J, Bajić A, Cindrić K, Cvitan L, Katušin Z, Kaučić D, Likso T, Lončar E, Lončar Ž, Mihajlović D, Pandžić K, Patarčić M, Srnec L, Vučetić V: Klimatski atlas Hrvatske / Climate atlas of Croatia 1961-1990, 1971-2000. Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb, 2008, 200 str.

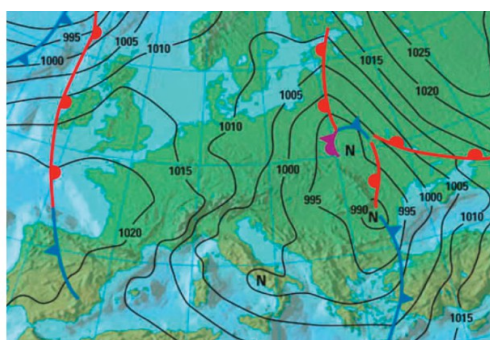
## Dodatak A (prizemna sinoptička situacija)



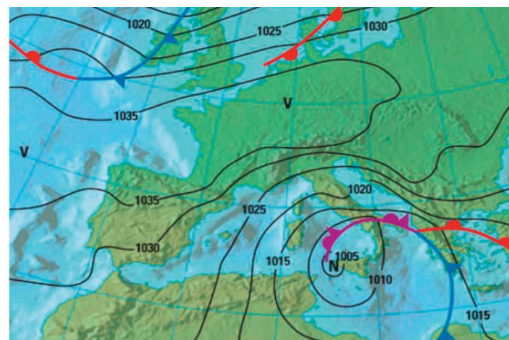
(a)



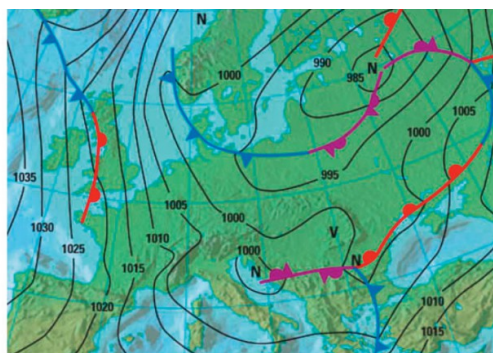
(b)



(c)



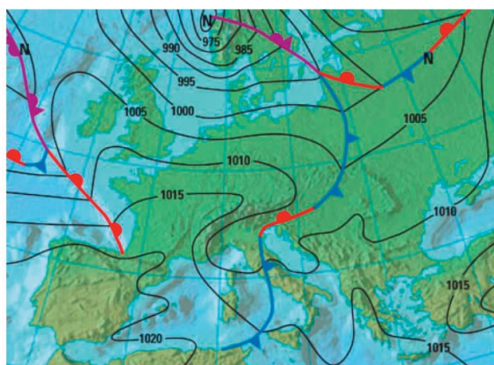
(d)



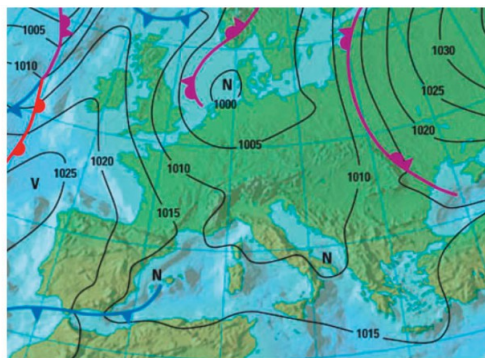
(e)

Slika 55. Tipovi vremena u odnosu na položaj prizemne ciklone: a) prednji sektor ciklone (N1), b) donji sektor ciklone (N2), c) stražnji sektor ciklone (N3), d) gornji sektor ciklone (N4), e) središte ciklone (Nc). Prema Poji (1965.) i Zaninović i sur., (2008.). Izvor: Klimatski atlas Hrvatske, Zaninović i sur., 2008., DHMZ ([www.meteo.hr](http://www.meteo.hr))

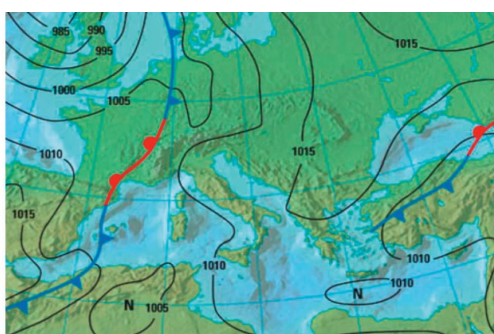




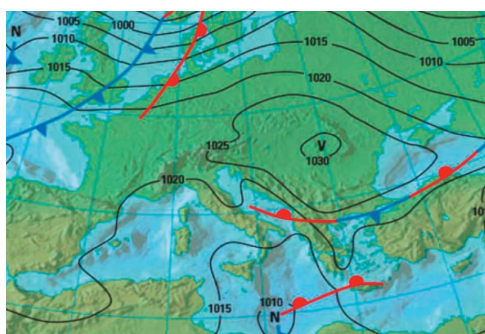
(a)



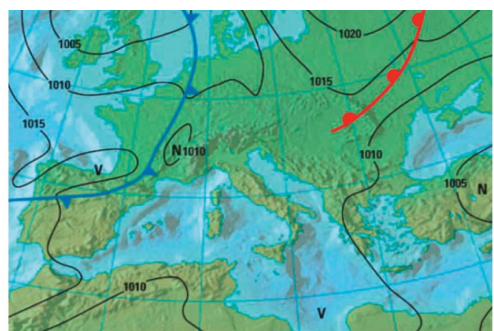
(b)



(c)



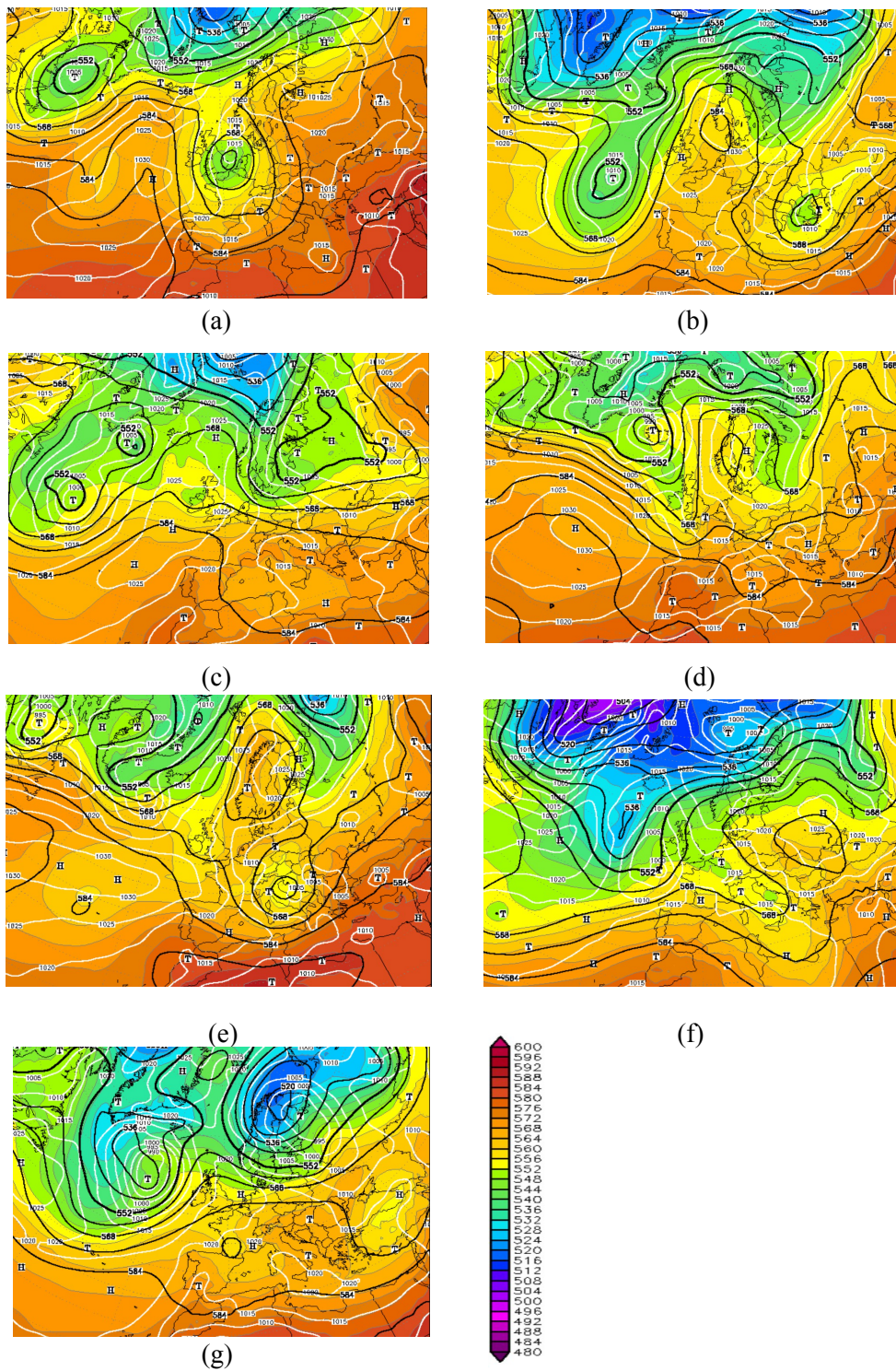
(d)



(e)

Slika 56. Tipovi vremena u odnosu na položaj prizemne doline i bezgradijentnog polja: a) prednja strana doline (Dol1), b) os doline (Dol2), c) stražnja strana doline (Dol3), d) termička dolina vezana uz Jadran (tDol), e) bezgradijentno polje (B). Prema Poji (1965.) i Zaninović i sur., (2008.).  
Izvor: Klimatski atlas Hrvatske, Zaninović i sur., 2008., DHMZ ([www.meteo.hr](http://www.meteo.hr))

## Dodatak B (visinska sinoptička situacija)



Slika 57. Izobarna ploha 500 hPa i relativna topografija (500 – 1000 hPa): a) prednja strana doline (PSD), b) stražnja strana doline (SSD), c) donja strana doline (DSD), d) zonalno strujanje (W), e) visinska ciklona (Cv), f) visinska dolina čija os prolazi Hrvatskom (Dol), g) bezgradijentno polje (Bp). Crne linije su izohipse. Relativna topografija prikazana je različitim bojama, prema skali.

Izvor: Global Forecast System, <http://wetter3.de>