

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Geofizički odsjek

ZRINKO BAHORIĆ

**STATISTIČKA VEZA IZMEĐU SATELITSKIH INDEKSA
NESTABILNOSTI I POJAVE MUNJA ZA ŠIRE PODRUČJE
HRVATSKE**

DIPLOMSKI RAD

Voditelj: Doc. dr. sc. Maja Telišman Prtenjak

Suvoditelj: Dr. sc. Nataša Strelec Mahović

Zagreb, 2012.

Zahvaljujem se ponajprije dr. sc. Nataši Strelec Mahović na zaista velikoj pomoći i strpljenju da svoja znanja, iskustva i svoje vrijeme podijeli sa mnom. Hvala za pomoć u prikupljanju podataka, kvalitetnim i korisnim savjetima, raspravama, recenziji, te također za susretljivost i sudjelovanje u svim ostalim fazama izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem doc. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak na prihvatanju mentorstva kao i na korisnim savjetima, raspravama, velikoj susretljivosti oko svih pitanja vezanih uz rad i na recenziji rada.

Hvala i ostalim profesorima s Geofizičkog odsjeka Sveučilišta u Zagrebu koji su savjetima i prijedlozima pridonijeli ovom radu.

Zahvaljujem djelatnicima Odjela za vremenske analize i prognoze, pri DHMZ-u na ustupljenom radnom prostoru. Zahvaljujem Petri Mikuš na pomoći oko obrade i vizualizacije podataka.

Hvala kolegi Ivanu Smiljaniću na svemu onom čega se može sjetiti.

Veliko hvala svim kolegama studentima, posebno cijeloj "mojoj godini", kao i onima koji su uvijek bili tu negdje tijekom studija, a u velikoj mjeri su zaslužni za njegov sretan i uspješan završetak.

Hvala Jeleni na vjeri i ljubavi, na tehničkoj podršci također.

Posebno i veliko hvala mojim roditeljima na svemu.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1. Motivacija i cilj istraživanja.....	1
1.2. Indeksi nestabilnosti.....	2
1.2.1. K indeks.....	3
1.2.2. LI indeks- indeks podizanja.....	3
1.2.3. TPW indeks- indeks ukupne oborive vode.....	4
1.3. Dosadašnja istraživanja.....	4
2. Podaci i metode.....	8
2.1. Satelitski podaci.....	8
2.2. Podaci o pojavi munja.....	9
2.3. Metode obrade podataka.....	11
2.3.1. Statistički parametri izračunati iz tablice kontingencije.....	12
2.3.2. Metode kumulativnih i relativnih čestina.....	14
3. Rezultati.....	15
3.1. Usporedba K indeksa s pojavom munja.....	15
3.2. Usporedba TPW indeksa s pojavom munja.....	16
3.3. Usporedba LI indeksa s pojavom munja.....	17
3.4. Analiza kumulativnih i relativnih frekvencija pojave munja za indekse nestabilnosti.....	19
3.4.1. Kumulativne frekvencije pojave munja za K, LI, TPW indekse.....	19
3.4.2. Relativne frekvencije pojave munja za K, LI, TPW indekse.....	21
3.5. Primjeri ovisnosti pojave munja o indeksima nestabilnosti.....	23
4. Diskusija i zaključak.....	30
5. Literatura.....	33
6. Sažetak.....	35

1. UVOD

1.1. Motivacija i cilj istraživanja

Konvektivni razvoj oblaka vrlo je čest proces u atmosferi, točnije u troposferi, a vremenske prilike koje nastaju kao posljedica procesa konvekcije poput obilnih oborina, tuče, olujnih udara vjetra te pojave munja, pijavica pa čak i tornada, mogu značajno utjecati na ljudski život i na aktivnosti ljudi. U Hrvatskoj, koja se nalazi u području umjerenih širina, konvektivni razvoj oblaka uglavnom je vezan za topliji dio godine, što upućuje na činjenicu da je posljedicama konvekcije direktno ugrožena većina poljodjelskih kultura. Pribrojimo li tu još i ostale moguće ekonomске štete kao i direktnu prijetnju čovjekovoj sigurnosti, jasan je motiv i potreba za što točnjim prognozama konvektivnog razvoja.

U ovom radu promatrat će se duboka mokra konvekcija u 'čistom zraku'. Pod pojmom 'čisti zrak' podrazumijevamo stanje atmosfere u kojem nema oblaka, te nema premještanja sinoptičkih sustava (ciklona ili fronti). Naime, konvekciju uzrokovanu premještanjem sustava na sinoptičkoj skali numerički modeli za prognozu vremena uglavnom dobro prognoziraju. Na problem nailazimo kad sinoptička situacija ukazuje na stabilno stanje atmosfere, a do konvekcije ipak dođe tijekom dana. Nestabilnost atmosfere, uz dovoljan sadržaj vlage u nižim slojevima atmosfere i postojanje procesa koji uzrokuje dizanje zraka, jedan je od osnovnih i nužan uvjet za pojavu konvekcije (Doswell, 1987). Nestabilnost atmosfere promatrat će se ovdje pomoći indeksa nestabilnosti izvedenih iz satelitskih mjerjenja te će se pokušati utvrditi ovisnost pojave konvekcije o vrijednostima tih indeksa na širem području Hrvatske. S obzirom na činjenicu da su munje vrlo dobar indikator postojanja konvekcije (Ávila i sur., 2010) za usporedbu s indeksima nestabilnosti koristit će se podaci o pojavi munja u popodnevnim satima.

Povećane vrijednosti u polju pojedinog indeksa nestabilnosti ukazuju na mjesta pojačane nestabilnosti atmosfere, te samim time i na mjesta moguće pojave konvekcije. Također analizom prognostičari smanjuju i ograničavaju domenu moguće konvekcije, te se

mogu fokusirati na sužena područja na kojima mogu vršiti daljnju detaljniju analizu atmosferskog stanja.

1.2. Indeksi nestabilnosti

Indeksi nestabilnosti ukazuju na trenutno stanje atmosfere, koje može biti povoljno ili nepovoljno za kasniji nastanak konvekcije. Njihove vrijednosti povezujemo s vjerojatnošću pojave konvekcije. Računaju se uz pomoć jednostavnih algoritama koji se temelje na vertikalnim profilima pojedinih atmosferskih parametara u određenom trenutku. Obično se kao parametri promatraju vrijednosti temperature i vlažnosti zraka, iako to mogu biti i neka druga svojstva pa tako i dinamička, kao što su smjer i brzina vjetra. Vertikalni profil određenog parametra dobiva se iz radiosondažnih mjerena ili iz numeričkih modela za prognozu vremena. Zbog potrebe za većom prostornom i vremenskom rezolucijom obično se koriste numerički modeli, unatoč većoj pouzdanosti radiosondažnih mjerena. Kod računanja većine indeksa nestabilnosti koriste se vrijednosti parametara na diskretnim nivoima po visini (obično na standardnim izobarnim ploham) koji su reprezentativni za prikazivanje određenog svojstva, ali isto tako postoje i indeksi kod kojih se vrijednost dobiva vertikalnom integracijom stupca zraka, kao što su na primjer CAPE (eng. *Convective Available Potential Energy*) i indeks ukupne oborive vode , TPW (eng. *Total Precipitable Water*).

Kao što smo već spomenuli, vrijednosti indeksa nestabilnosti povezane su s vjerojatnošću pojave konvektivnog razvoja. Samim time moraju postojati granične vrijednosti indeksa iznad/ispod kojih oni predstavljaju nestabilno/stabilno stanje atmosfere. Te granične vrijednosti nisu fiksne već ovise o sinoptičkim uvjetima, geografskom položaju, klimatskim uvjetima te o promatranoj sezoni. U ovom radu pokušat ćemo odrediti granične vrijednosti triju globalnih indeksa: K indeksa, indeksa podizanja (eng. *Lifted index*, LI) i TPW indeks, za šire područje Hrvatske u toplom dijelu godine, te navedena tri indeksa pokušati objediniti u kombinirani indeks nestabilnosti. Takav kombinirani indeks trebao bi biti pouzdaniji i pregledniji indikator nestabilnosti, te bi kao takav bio od velike pomoći meteorologu pri izradi prognoze.

1.2.1. K indeks

K indeks se u praksi pokazao kao koristan indikator nestabilnosti u zračnoj masi. S povećanjem vrijednosti K indeksa raste vjerojatnost pojave grmljavinskog nevremena. Računamo ga pomoću izraza:

$$K = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700}) \quad (1)$$

gdje su T_{850} , T_{700} i T_{500} redom temperature zraka na izobarnim plohamama 850, 700 i 500 hPa, a Td_{850} i Td_{700} temperature rosišta na 850 i 700 hPa. Vrijednosti temperatura izražene su u °C.

K indeks u sebi sadrži tri informacije o konvektivnoj nestabilnosti; vertikalni temperaturni gradijent, podatak o vlažnosti u nižoj atmosferi te visinu vlažnog sloja. Nestabilnost atmosfere raste porastom samog indeksa, a općenito se uzima da je granična vrijednost između stabilnosti i nestabilnosti 20°C.

1.2.2. LI indeks - indeks podizanja

LI indeks koristan je pokazatelj vjerojatnosti pojave jakih grmljavinskih oluja. Izraz za računanje indeksa dan je kao:

$$LI = T_{500} - Tp_{500} \quad (2)$$

gdje je T_{500} temperatura atmosfere na 500 hPa, a Tp_{500} temperatura podignute česti, vrijednost indeksa izražena je u °C.

Promatrana čest sa sobom nosi informaciju o temperaturi i omjeru miješanja u graničnom sloju troposfere. Podizanjem, zbog adijabatičke ekspanzije, čest postaje hladnija. Ako je na određenoj visini temperatura česti viša od temperature okoline, čest će se uzdizati pa kažemo da je atmosfera nestabilna, a ako je ona niža, vrijedi obratno. Iz toga se vidi da je granična vrijednost za ovaj indeks jednaka vrijednosti od 0°C, premda to ne mora značiti da će ta vrijednost uvijek biti granica stabilnosti i nestabilnosti. U praksi se pokazalo da je vjerojatnost pojave jakih grmljavinskih oluja velika ako je $LI \leq -6°C$.

1.2.3. TPW indeks - indeks ukupne oborive vode

TPW indeks dobivamo integriranjem količine vlage, a izražava se u milimetrima vodenog stupca koji bi se dobio na jediničnoj površini kada bi se sva vodena para u stupcu atmosfere kondenzirala.

Ovaj indeks nije sam po sebi direktna mjera nestabilnosti, ali je vrlo važan za kratkoročnu prognozu stabilnosti atmosfere. Njegova važnost leži u činjenici da je količina vodene pare u atmosferi, pogotovo u njenim donjim slojevima, uz nestabilnost atmosfere i postojanje procesa koji uzrokuje dizanje zraka, važan čimbenik u procesu nastanka i dalnjeg razvoja duboke mokre konvekcije.

Vrijednosti TPW indeksa u umjerenim geografskim širinama kreću se od minimalnih (i nerealnih) 0 mm, do otprilike 45 mm. Za ovaj indeks ne postoji određena granična vrijednost koja razlučuje stabilnost i nestabilnost, iako vrijednost manja od 10 mm ukazuje na suhu atmosferu, u kakvoj obično ne očekujemo nastanak konvekcije.

1.3. Dosadašnja istraživanja

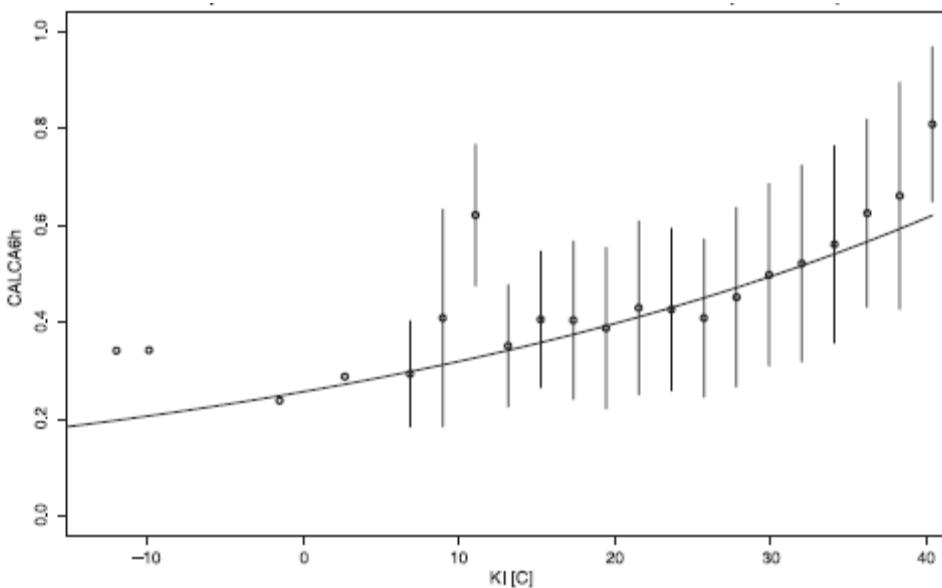
Za područje Hrvatske, nedavno su napravljena dva istraživanja vezana uz konvekciju: Smiljanić (2011) i Mikuš i sur. (2012). Druga studija pokazala je neke opće prostorne i vremenske (više "klimatološke") karakteristike munja za četverogodišnje razdoblje 2006.-2009. Također je na temelju mjeranja munja određivan povoljan tip vremena i dominantan režim strujanja. Podaci ukupnog električnog pražnjenja pokazali su najučestalije vrijeme početka i završetka konvektivne aktivnosti. Početak je obično u intervalu od 11-16 sati, s maksimumom oko podneva, a završetak konvekcije u večernjim satima između 17 i 20 sati po lokalnom vremenu. Na Jadranu se uočilo više noćnih munja (osobito u prva tri sata nakon ponoći) nego nad kopnenim dijelom. Gledano sezonski, aktivnost električnog pražnjenja ovisi o duljini svjetlog dijela dana: tako u proljeće električna pražnjenja započinju nešto kasnije u danu (oko 13 sati), tijekom ljeta oko podneva, dok u jesen nema preferiranog sata početka konvekcije. Dio dobivenog seta konvektivnih dana s munjama iz 2009. godine korišteni su i u ovom radu. Studija koju je izradio Smiljanić (2011) pokazuje verifikaciju globalnih indeksa

nestabilnosti (LI, K, KO, TPW). Indeksi su generirani sintezom kratkoročne prognoze i satelitskih mjerena te se uspoređivala jutarnja raspodjela intenziteta indeksa (od 04 UTC do 08 UTC), s mjestima nastanka (po)podnevne konvektivne naoblake. Cilj istraživanja je bio odrediti granične vrijednosti (ranojutarnjih) indeksa nestabilnosti koji bi upozorili na pojavu popodnevne konvekcije. Pokazalo se da od navedenih indeksa, KO indeks nije bio pogodan za detekciju konvekcije. KO indeks je definiran preko ekvivalentne potencijalne temperature na četiri izobarne plohe kao što prikazuje jednadžba (3):

$$KO = 0.5[(\Theta_{e500} - \Theta_{e700}) - (\Theta_{e850} - \Theta_{e1000})] \quad (3),$$

gdje su $\Theta_{e500}, \Theta_{e700}, \Theta_{e850}, \Theta_{e1000}$ redom vrijednosti ekvivalentne potencijalne temperature na izobarnim plohama od 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa, 1000 hPa. Osim što nije pokazivao tipične granične vrijednosti, planinska područja nisu dozvoljavala njegov proračun jer u svom algoritmu sadrži izobarnu plohu 1000 hPa. Zbog toga se u ovom radu KO indeks nije koristio. Smiljanić (2011) je također uočio da su u nekim slučajevima globalni indeksi nestabilnosti krivo ‘prognozirali’ konvektivne sustave te da se istraživanje trebalo provesti na većem broju slučajeva.

Nedaleko od Istre, Manzato (2003) je u svojoj studiji izradio klimatologiju konvektivnih indeksa nestabilnosti u Udinama. Pri tom je koristio 5050 radiosondažnih profila za topli dio godine u razdoblju od 1995–2001. Mjera za odabir konvektivnog dana bila je pojava munja (tipa oblak-tlo) u intervalima trajanja šest sati. Time je definirao parametar CALCA6h na temelju broja munja, oborine i udara vjetra. Ispitujući veze između parametra CALCA6h (intenziteta oluja) i vrijednosti 30-tak indeksa nestabilnosti naglasio je da u njegovoј analizi linearni koeficijent korelacije ima samo ograničenu primjenu. Razlog je u tome što između navedenih parametara dominira (pozitivna) nelinearna veza npr. vidljiva između CALCA6h i K indeksa na slici 1.



Slika 1. Empirijski odnos između srednje vrijednosti CALCA6h parametra i klasa K indeksa. Linija odgovara eksponencijalnoj prilagodbi, a okomite linije predstavljaju odstupanja (preuzeto iz Manzato, 2003).

De Coning i sur. (2011) su u svom radu za Južnu Afriku (na području dvadesetak puta većem od Hrvatske) napravili kombinirani indeks nestabilnosti kako bi se poboljšala kratkoročna (12-satna) prognoza konvekcije. Promatrali su jutarnje usrednjene vrijednosti svakog indeksa i pojavu munja te satelitski procijenjene oborine u popodnevnim satima. Za to su koristili podatke u 50 odabranih slučajeva tijekom dvije ljetne sezone (2007.-2008. i 2008.-2009.). Računajući statističke parametre iz tablice kontingencije (vidi pogl. 2.3.1.) definirali su kombinirani indeks nestabilnosti na temelju poznatih globalnih indeksa nestabilnosti. U tu svrhu autori su koristili vjerojatnost pojavljivanja munja preko kumulativnih frekvencija, te vrijednost Hanssen-Kuiper parametra za određivanje 'težina' s kojima su početni indeksi nestabilnosti činili kombinirani indeks nestabilnosti. Iako se kombinirani indeks pokazao kao dobar prediktor konvekcije na njihovom području, istaknuli su neka njegova ograničenja. Njegov je proračun moguć samo u satelitskim produktima bez oblaka, u ljetnim sezonomama za konvektivne događaje (a ne stratiformne) i uz napomenu da će njegove težine prema broju i rasporedu munja na drugom geografskom području biti drugačije.

S obzirom na ograničenja predloženog kombiniranog indeksa i njegovih 'težina', koje su uvelike određene geografskom regijom, ovdje je bila namjera provjeriti mogućnost formiranja kombiniranog indeksa za šire područje Hrvatske. U tu svrhu potrebno je odrediti preciznije granične vrijednosti indeksa nestabilnosti od Smiljanića (2011) koji je promatrao set dana kod kojih se javila duboka mokra konvekcija u 'čistom zraku' koristeći dio baze konvektivnih dana iz Mikuš i sur. (2012).

2. PODACI I METODE

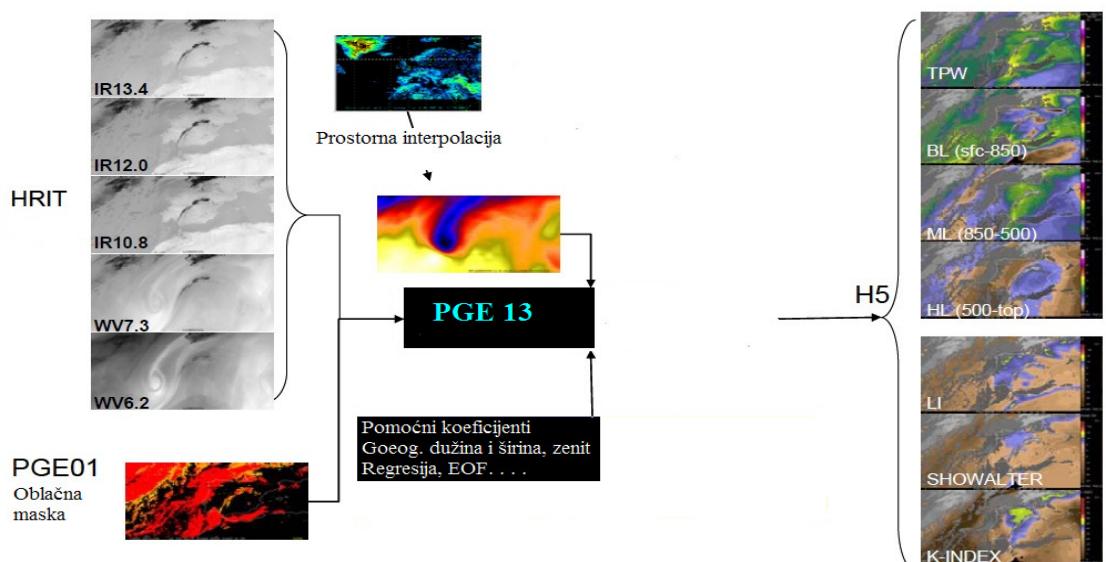
2.1. Satelitski podaci

Podaci koji će se koristiti u ovom radu dobiveni su s Meteosat satelita druge generacije (eng. *Meteosat Second Generation*, MSG). Trenutačno su u Zemljinoj orbiti tri takva geostacionarna satelita, Meteosat-8, Meteosat-9 te nedavno lansiran Meteosat-10. Oni skeniraju Zemljinu površinu pomoću instrumenta SEVIRI (eng. *Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager*) u dvanaest spektralnih područja, tj. kanala. U ovom radu koristili smo podatke sa satelita Meteosat-8 koji skenira dio Zemljine površine svakih pet minuta, za razliku od satelita Meteosat-9 koji ima petnaest minutnu vremensku rezoluciju. Podaci o temperaturi i vlažnosti zraka dobiveni sa SEVIRI instrumenta imaju razmjerno malu vertikalnu rezoluciju zbog ograničenog spektra valnih duljina. Ipak, kako indeksi nestabilnosti zahtijevaju poznavanje atmosferskih parametara na relativno malom broju nivoa, satelitski podaci dovoljni su za generiranje istih (Peppler, 1988; Fuhrhop i sur., 2000). Prostorna rezolucija Meteosat-8 satelita je otprilike 3 km po pikselu ($1 \text{ piksel} \approx 3 \times 3 \text{ km}^2$) u točki ispod satelita (König i de Coning, 2008). Ona se smanjuje s povećanjem geografske širine, tako da iznad prostora promatranog u ovom radu, odnosno iznad šireg područja Hrvatske, iznosi otprilike 4 km po pikselu što znači da veličina jednog piksela odgovara površini od 16 km^2 .

Satelitska mjerena spadaju u domenu daljinskih, pasivnih mjerena. Drugim riječima, mjerena se vrše na udaljenosti od predmeta i pri tom se fizički ne utječe na promatrani objekt. Informacije o promatranom objektu (npr. svojstva Zemljine atmosfere) prikupljaju se preko spektra elektromagnetskog zračenja koji objekt emitira. Zatim se iz primljenog elektromagnetskog zračenja, pomoću osnovnih zakona o zračenju razlučuju i detektiraju pojedina svojstva promatranog objekta, kao što su vlažnost, temperatura i sl.

Za potrebe izračuna indeksa nestabilnosti koristi se šest od 12 raspoloživih kanala. Od toga su tri termička infracrvena, dva infracrvena u apsorpcijskim vrpcama vodene pare, te jedan kanal u apsorpcijskoj vrpci CO₂ (König i de Coning, 2008). Fizikalnom metodom pretraživanja (eng. *Physical Retrieval*) mogu se naći vertikalni profili temperature i vlažnosti zraka koji najbolje simuliraju zračenje snimljeno na vrhu atmosfere. Na slici 2 prikazana je

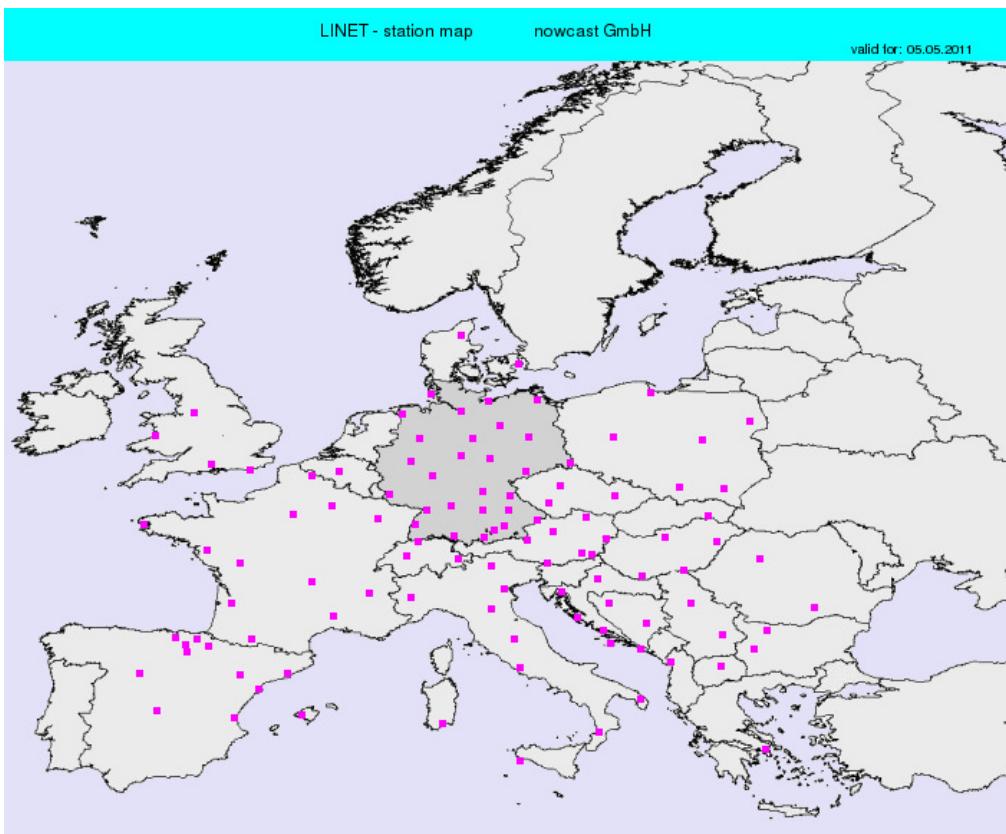
shema ulaznih parametara i izlaznih rezultata za računalni program PGE13 SPhR (eng. *Product Generation Element 13 SEVIRI Physical Retrieval*, http://www.nwcsaf.org/scidocs/Documentation/SAF-NWC-CDOP-INM-SCI-ATBD-13_v1.2.pdf). Na slici 2 IR 13.4, IR 12.0, IR 10.8, WV 7.3, WV 6.2 redom označavaju kanal u apsorpcijskoj vrpcu CO₂ ($13.4 \mu\text{m}$), dva termička infracrvena kanala (12.0 i $10.8 \mu\text{m}$), te dva infracrvena kanala u apsorpcijskim vrpcama vodene pare.



Slika 2. Shematski prikaz ulaz/izlaz PGE13 SPhR

2.2. Podaci o pojavi munja

Podatke o pojavi munja dobili smo preko suvremenog sustava za praćenje munja - LINET. To je europski sustav za praćenje munja razvijen u Njemačkoj (Betz i sur., 2007, 2009). Preko sedamdeset senzora postavljeno je diljem Europe, gotovo u svakoj zemlji. Od toga broja tridesetak ih se nalazi u Njemačkoj, a u Hrvatskoj ih je postavljeno šest (slika 3). Udaljenost susjednih senzora nad našim područjem iznosi maksimalno do dvjesto kilometara, a neka područja Hrvatske (osobito ona granična) prekrivaju senzori iz susjednih zemalja.



Slika 3. Mapa LINET senzora u Evropi (preuzeto iz Uglešić i sur., 2009)

Ovaj sustav koristi vrlo niski frekvencijski opseg te pomoću dvije okomite petljaste antene detektira elektromagnetske signale pri atmosferskom pražnjenju. LINET sustav daje informacije o geografskom položaju udara, amplitudi i polaritetu munje te broju povratnih udara u vremenu. Također može razlučiti tip munje: oblak-oblak ili oblak-tlo. U ovom radu zanima nas informacija o lokaciji i vremenu električnog pražnjenja. Točnost lociranja, tj. određivanja geografskih koordinata je do sto metara (Betz i sur., 2009).

Uspješno lociranje munja ovisi o više parametara kao što su osjetljivost antena, vrijeme odziva, obrada signala, polazne vrijednosti senzora. U sustavu LINET važne komponente optimizirane su tako da se detektiraju sva atmosferska pražnjenja, uključujući i ona s amplitudom manjom od 5 kA. Inače, tip pražnjenja oblak-oblak ima amplitudu oko 2-3 kA, dok pražnjenje tipa oblak-tlo ima amplitudu oko 10 kA.

Podaci o pojavi munja promatrani su u periodu 12-21 UTC kao i u radu de Coning i sur. (2011). Pogledamo li dnevnu distribuciju munja za Hrvatsku u radu Mikuš i sur. (2012), uočavamo da je upravo u tom periodu najčeštalija pojava munja.

2.3. Metode obrade podataka

Indekse nestabilnosti, kao indikatore vjerojatnosti pojave konvekcije, željeli smo dovesti u vezu s pojavom munja, kao produktom procesa konvekcije na određenom prostoru. Korištene su relativno jednostavne metode statističke obrade preko kojih se htjelo pokazati ovisnost pojave munja (konvekcije) u popodnevnim satima (12–21 UTC) s određenom vrijednošću indeksa nestabilnosti u jutarnjim satima (6-9 UTC).

Statistička obradu najprije se provela za 2009. godinu. Izdvojilo se je 27 slučajeva (dana) u topnjem dijelu godine, od svibnja do rujna. Odabrani su oni dani u kojima je došlo do pojave konvekcije u popodnevним satima u uvjetima u kojima u jutarnjim satima nije bilo oblaka nad promatranim područjem. Nakon provedene statističke obrade za ljetnu sezonu 2009., dodalo se još 13 slučajeva iz ljetne sezone 2010. godine. Naknadno povećanje broja slučajeva uvelo se u svrhu provjere jedne od statističkih metoda.

Satelitski indeksi nestabilnosti dobiveni su iz EUMETSAT-ove baze podataka u BUFR formatu (od eng. *Binary Universal Form for the Representation of meteorological data*), koji u sebi sadrži sirove vrijednosti promatranih fizikalnih veličina kao i prateći opis tih vrijednosti (naziv, fizikalne jedinice, decimalna mjesta, kompresiju podataka itd.). Kad su u pitanju indeksi nestabilnosti izračunati iz podataka s Meteosat 8 satelita, svakih pet minuta dostupna je jedna BUFR datoteka koja u sebi sadrži informacije o indeksima na mreži koja odgovara rezoluciji i vidnom polju satelita. Iz svake BUFR datoteke izdvojene su tri nove datoteke od kojih svaka sadrži vrijednosti za već spomenute indekse nestabilnosti: K, LI i TPW indeks. Za svaku točku mreže na temelju tih 5-minutnih podataka izračunata je srednja vrijednost svakog pojedinog indeksa u razdoblju od 6 do 9 UTC. Također, izdvojeni su podaci o pojavi munja za svaki promatrani slučaj za razdoblje 12-21 UTC.

2.3.1. Statistički parametri izračunati iz tablice kontingencije

Tablica kontingencije (Wilks, 2005), tablica 1, koristila se je za računanje statističkih parametara kao što su vjerojatnost detekcije (eng. *Probability of Detection*, POD), stopa

pogrešne detekcije (eng. *False Alarm Ratio*, FAR), te Hanssen-Kuiper parametar (HK). Svaki od navedenih parametara ima svoju domenu moguće vrijednosti te opisuje, svaki na svoj način, pojavljivanje 'točnih prognoza događaja' tj. odnos 'točnih prognoza' i 'pogrešnih prognoza' (tablica 2).

Tablica 1. Tablica kontingencije

Prognozirani događaj	Opaženi događaj		
	DA	NE	Ukupno
DA	a	b	a + b
NE	c	d	c + d
Ukupno	a + c	b + d	a + b + c + d = n

Tablica 2. Statistički parametri koji se računaju iz tablice kontingencije

Parametar	Opis	Domena	Najbolja vrijednost
POD	Koliki dio promatranih 'Da' događaja je točno prognoziran	0-1	1
FAR	Koliki dio prognoziranih 'Da' događaja nije opažen	0-1	0
HK	Koliko dobro prognoza odvaja 'DA' i 'NE' događaje	-1-1	1

Definicije statističkih parametara koji su se računali:

$$POD = \frac{a}{a + c} \quad (4)$$

$$FAR = \frac{b}{a + b} \quad (5)$$

$$HK = \frac{(ad - bc)}{[(a + c)(b + d)]} \quad (6).$$

Koeficijenti a , b , c i d izračunali su se tako što su se postavili odgovarajući granični uvjeti. Definicije četiri uvjeta pokazat će se na primjeru za jednu proizvoljnu vrijednost (15°C) K indeksa:

1. uvjet: Ako je $K \geq 15^{\circ}\text{C}$ i pojavile su se munje

2. uvjet: Ako je $K \geq 15^{\circ}\text{C}$ i nema munja

3. uvjet: Ako je $K \leq 15^{\circ}\text{C}$ i pojavile su se munje

4. uvjet: Ako je $K \leq 15^{\circ}\text{C}$ i nema munja

Uvjeti 1-4 popunjavaju tablicu kontingencije, tablica 2, i to na način da se za svaku promatrano točku (u ovom slučaju polje veličine $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$) usporedi vrijednost indeksa u toj točki sa zadanim (npr. 15°C) vrijednošću i registracijom poslijepodnevnih munja u toj točki. Ovdje treba napomenuti da se vrijednost indeksa uspoređuje s vrijednostima većim/manjim od zadane (ovisno o uvjetu), te se tako dobiva kumulativni doprinos. Ovisno o tome koji je uvjet ostvaren popunjava se tablica kontingencije. Ako je ostvaren 1. uvjet, u polje a se upisuje vrijednost 1, ako je ostvaren 2. uvjet, vrijednost 1 se upisuje u polje b , te analogno za c i d polje. Za svaku točku provjeravaju se zadani uvjeti i zbrajaju se jedinice u poljima tablice kontingencije za zadalu vrijednost. Metoda se provodi za interval zadanih vrijednosti indeksa za svaki promatrani dan.

Relacija (6) se može napisati i kao:

$$HK = \frac{a}{a+c} - \frac{b}{b+d} \quad (7).$$

Vidi se da će HK parametar biti to veći što je drugi član u relaciji (7) manji, i obrnuto. Dakle, ako drugi član u relaciji (6) ide u nulu HK = POD. Vrijednosti HK parametra de Coning i sur. (2011) koriste kao težine pri izračunu kombiniranog indeksa nestabilnosti. Težine odgovaraju određenoj vjerojatnosti pojave munja u skladu s HK parametrom. Ovdje je cilj ispitati predloženu metodologiju na podacima nad Hrvatskom. Potencijalni problem HK parametra je ukoliko imamo sličan broj 'promašenih prognoza' (c član u tablici kontingencije) i 'lažnih uzbuna' (b član u tablici kontingencije). Tada će HK parametar biti mali, te nije pogodan za proračun kombiniranog indeksa.

2.3.2. Metoda kumulativnih i relativnih frekvencija

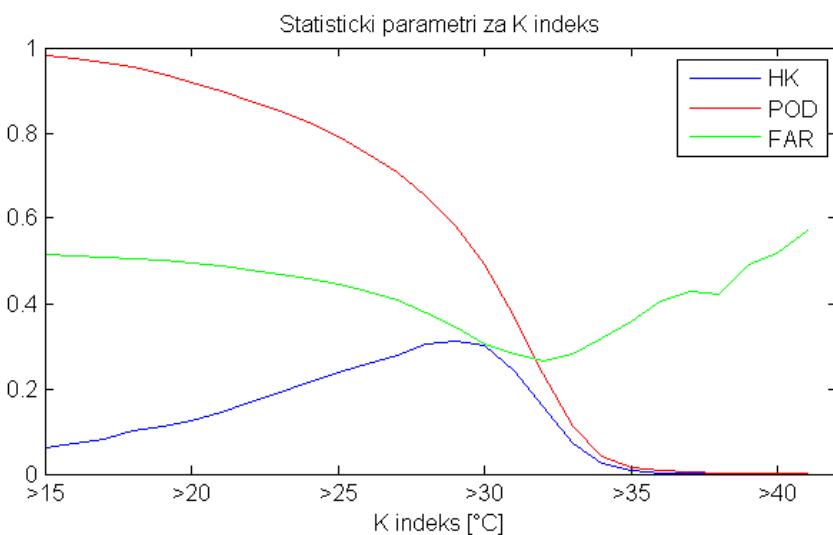
Metoda kumulativnih i relativnih frekvencija provedena je za svaku vrijednost indeksa kako bi se vidjela direktna veza između određene vrijednosti indeksa i pojave munja. Frekvencija pojavljivanja izračunala se tako što su se za točno određenu vrijednost indeksa prebrojali slučajevi s pojavom munja u popodnevnim satima, te podijelili s ukupnim brojem slučajeva pojave određene vrijednosti indeksa.

3. REZULTATI

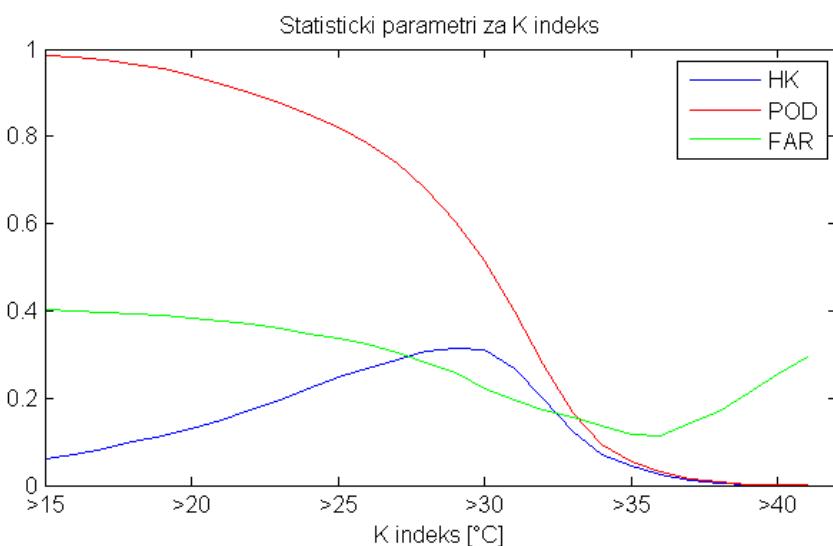
Kao što je spomenuto u prethodnom poglavlju, pri računanju relacija (4)-(6) kao i njihovih relativnih i kumulativnih frekvencija prvo su se postavile (definirale) granične vrijednosti pojave konvekcije za svaki indeks. Zatim su se vremenski usrednjene vrijednosti indeksa (6-9 UTC) i prostorno usrednjile na mreži prostorne domene $0.2^\circ \times 0.2^\circ$. Nakon toga slijedi njihova verifikacija s munjama i konačno određivanje tablice kontingencije (a, b, c, d parametara).

3.1. Usporedba K indeksa s pojavom munja

Slika 4 prikazuje vrijednosti statističkih parametara za K indeks. Za vrijednost K indeksa $>15^\circ\text{C}$ POD je gotovo 1. Stoga vrijednost K indeksa od 15°C možemo smatrati pragom za pojavu konvekcije. FAR za K indeks od 15°C i veći, iznosi oko 0.5, te pada na oko 0.25 za vrijednosti K indeksa 33°C , zatim ponovno raste. Ponovni rast FAR-a nakon vrijednosti 33°C možemo povezati s razmjerno malim brojem točaka u kojima je vrijednost K indeksa veća od 33°C . HK parametar je općenito podcijenjen, što ponovno upućuje na to da ukupan broj slučajeva nije dovoljan da bi se mogla provesti kompletan statistička analiza na ovaj način. Za ovakvu statističku analizu potreban je velik broj slučajeva (de Coning i sur., 2011). Upravo zbog tog razloga uvelo se još dodatnih 13 dana iz 2010. godine te je navedena metoda provedena za ukupno 40 dana na promatranoj domeni. Rezultat se nije bitno promijenio, iako je HK malo porastao kako se vidi na slici 5, što se i očekivalo. Naime, de Coning i sur. (2011) su u svom radu imali 50 promatranih dana, ali na puno većoj prostornoj domeni, $0.48^\circ\text{N}-44^\circ\text{S}$ i $10^\circ\text{W}-56^\circ\text{E}$, naspram promatrane domene u ovom radu, $41^\circ\text{N}-49^\circ\text{N}$ i $9^\circ\text{E}-21^\circ\text{E}$. Uzme li se u obzir da broj slučajeva (vrijednost indeksa u točki mreže) u jednom danu direktno ovisi o veličini prostorne domene jasno je da je broj slučajeva puno manji od broja u spomenutom radu za Južnu Afriku.



Slika 4. Statistički parametri za K indeks za 27 dana, sezona 2009.

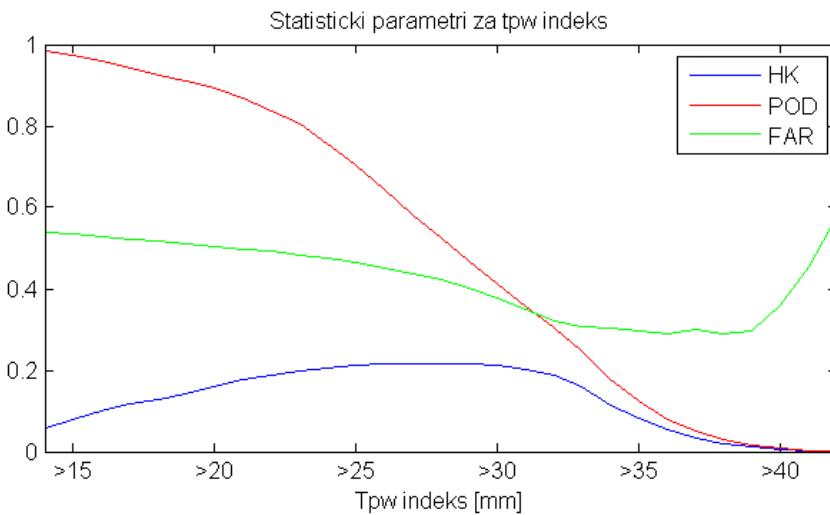


Slika 5. Statistički parametri za K indeks za 40 dana, sezone 2009. i 2010.

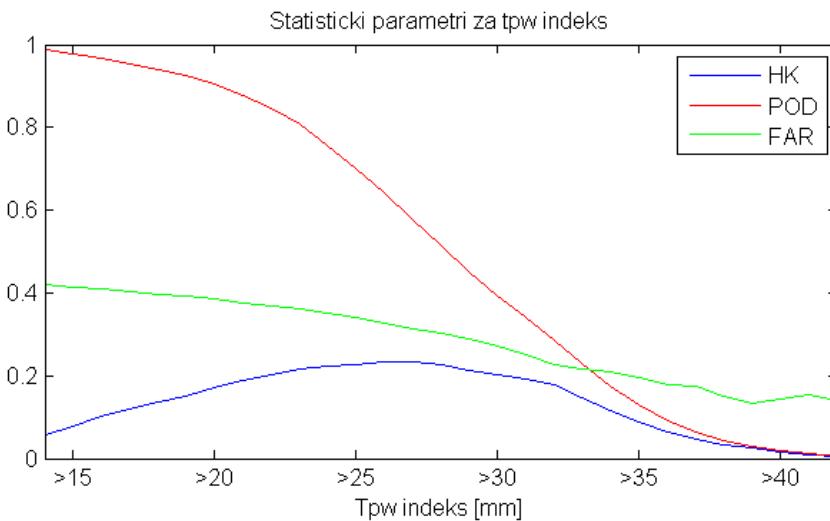
3.2. Usporedba TPW indeksa s pojavom munja

Za TPW indeks provela se analogna analiza kao i za K indeks. Na slikama 6 i 7 može se vidjeti da se HK parametar neznatno promijenio za veći broj slučajeva. Također je zanimljivo primijetiti da se FAR s povećanjem broja slučajeva smanjio za veće vrijednosti TPW indeksa, jer se uzimanjem većeg broja slučajeva povećao i broj točaka u kojima se javlja vrijednost TPW indeksa ≥ 40 mm. Kao i za K indeks, sudeći prema vrijednostima koje poprima HK

parametar, i ovdje se može zaključiti da je broj slučajeva premali da bi se provela kompletna analiza na ovaj način.



Slika 6. Statistički parametri za TPW indeks za 27 dana, sezona 2009.

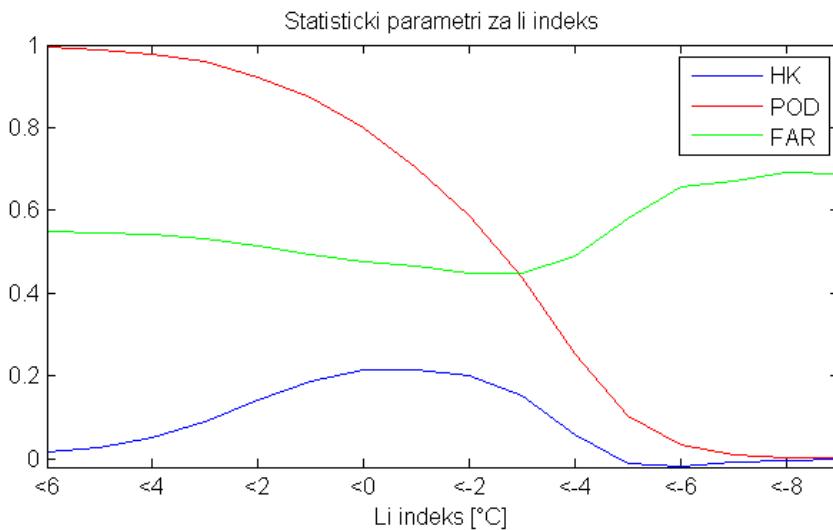


Slika 7. Statistički parametri za TPW indeks za 40 dana, sezone 2009. i 2010.

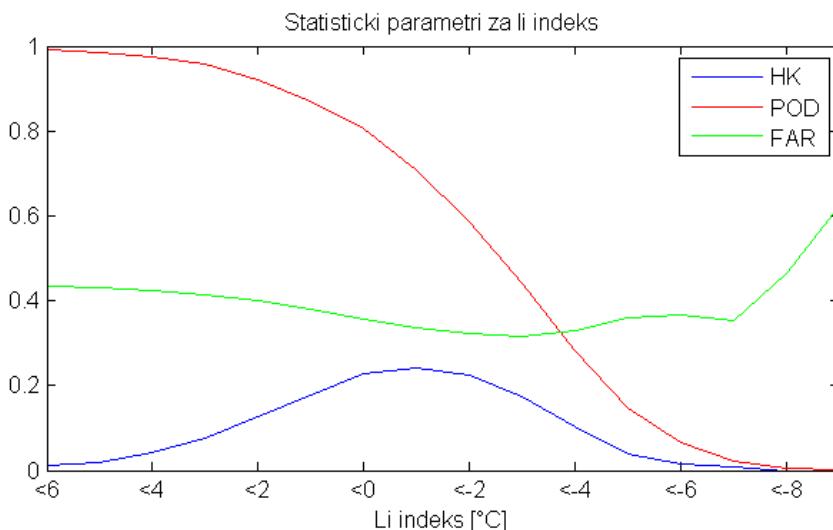
3.3. Usporedba LI indeksa s pojavom munja

LI indeks za razliku od K i TPW indeksa prati porast nestabilnosti atmosfere tako da mu se vrijednost smanjuje što je atmosfera nestabilnija. Zbog tog razloga su apscise na grafovima

obrnutu orijentirane, slike 8 i 9. Za vrijednosti LI indeksa između -5 i -7°C, parametar HK ima negativnu vrijednost kad se promatraju samo podaci iz 2009. To ponovno ukazuje na problem premalog broja slučajeva. S povećanjem broja slučajeva (slika 9), vidi se da HK poprima pozitivne vrijednosti što se i očekuje. Također, FAR se smanjuje s povećanjem broja slučajeva.



Slika 8. Statistički parametri za LI indeks za 27 dana, sezona 2009.



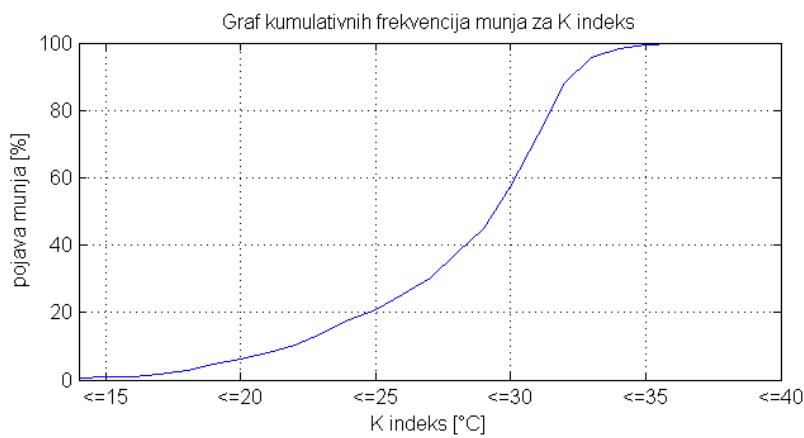
Slika 9. Statistički parametri za LI indeks za 40 dana, sezona 2009. i 2010.

3.4. Analiza kumulativnih i relativnih frekvencija pojave munja za indekse nestabilnosti

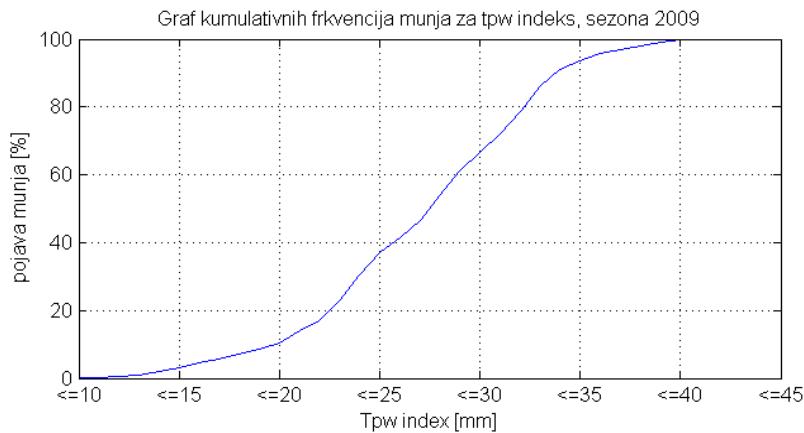
Za svaki se indeks posebno izračunala relativna frekvencija pojave munja za pojedine vrijednosti indeksa, te isto tako i kumulativne frekvencije. Na ovaj se način pokušalo u direktnu vezu dovesti pojavu konvekcije s pojedinom vrijednošću indeksa nad promatranom domenom. Graf kumulativnih frekvencija prikazuje kolika je vjerojatnost pojave munja za vrijednost indeksa i manje vrijednosti od njega. Vrijednost gdje graf kumulativnih frekvencija prestaje biti nula, može se smatrati najmanjom vrijednošću indeksa za koju je moguća pojava konvekcije. Relativne frekvencije prikazuju kolika je vjerojatnost pojave munja za pojedinu vrijednost indeksa. Kod ove veličine treba uzeti u obzir da je vrijednost indeksa promatrana na cijeloj domeni, a ne u jednoj točki. Ova se analiza, kao i prethodna, provela na prostornoj mreži $0.2^\circ \times 0.2^\circ$.

3.4.1. Kumulativne frekvencije pojave munja za K, LI i TPW indekse

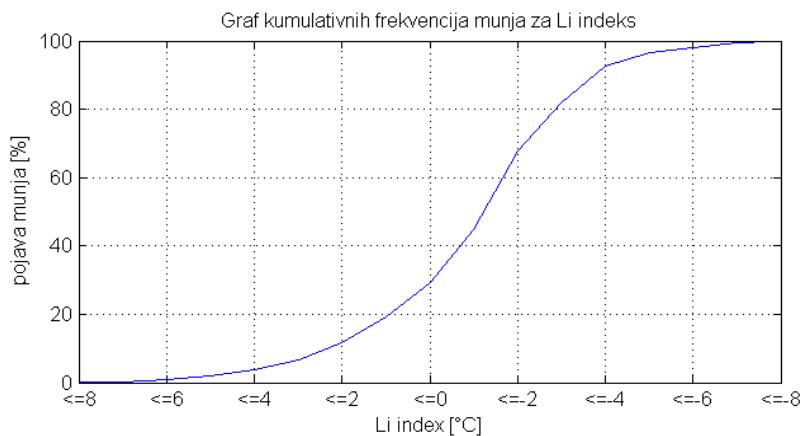
Na slici 10 vidi se da vrijednost K indeksa koja se može uzeti kao granična vrijednost za pojavu konvekcije iznosi oko 15°C . Također, vidi se da veza između vjerojatnosti pojave munja i vrijednosti K indeksa ne raste linearno s porastom vrijednosti indeksa. Slično vrijedi i za LI i TPW indeks (slike 11 i 12), samo što granična vrijednost za TPW indeks iznosi oko 10mm, a za LI oko 5°C . Dolje navedeni grafovi kumulativnih frekvencija prikazuju zapravo vjerojatnost pojave konvekcije u nekim intervalima pojedinog indeksa. Tako primjerice za vrijednost K indeksa od 20°C do 25°C vjerojatnost pojave konvekcije iznosi približno 10-20%. Za vrijednosti veće od 35°C vjerojatnost nastanka konvekcije je jako velika, iznad 90%. Naravno, te vjerojatnosti nisu sasvim pouzdane, već okvirne, što zbog relativno malog broja promatranih slučajeva, što zbog usrednjavanja indeksa u vremenu i prostoru.



Slika 10. Kumulativne frekvencije pojave munja za pojedine vrijednosti K indeksa, sezona 2009.



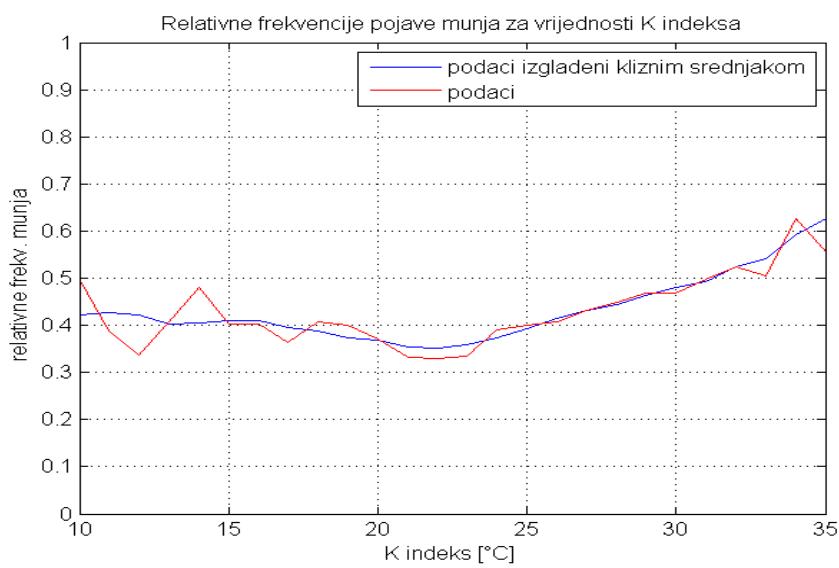
Slika 11. Kumulativne frekvencije pojave munja za pojedine vrijednosti TPW indeksa, sezona 2009.



Slika 12. Kumulativne frekvencije pojave munja za pojedine vrijednosti LI indeksa, sezona 2009.

3.4.2. Relativne frekvencije pojave munja za K, LI i TPW indekse

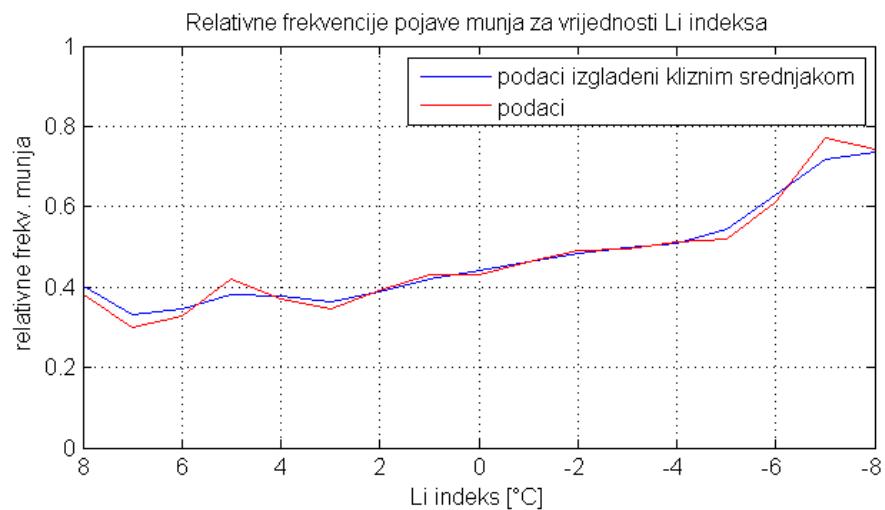
Nakon što se vidjelo da bi za analizu pomoću već spomenutih HK, FAR, POD parametara trebalo imati puno veći broj slučajeva, željela se prikazati i direktna veza vrijednosti indeksa s pojavom munja tj. konvekcije. Dobiveni rezultati prikazani su na slikama 13-15. Vrijednosti relativnih frekvencija pojave munja za pojedinu vrijednost indeksa ne smije se uzeti kao direktnu vjerojatnost za pojavu konvekcije. Za to ima više razloga. Naime, pri prostornom usrednjavanju na mreži $0.2^\circ \times 0.2^\circ$, manje vrijednosti indeksa moguće su se naći u prostoru prekrivenom munjama. Isto tako, nakon nastanka konvektivne naoblake u popodnevnim satima, oblačni sustavi su se mogli premještati po prostornoj domeni te je sustav za lociranje munja bilježio munje i iznad onih prostora na kojima u jutarnjim satima vrijednosti indeksa nestabilnosti nisu bile velike. Ipak, i ovi rezultati pokazuju da čestine pojavljivanja munja u prosjeku rastu s porastom vrijednosti indeksa. Također, vrlo velike, kao i vrlo male vrijednosti indeksa nisu dovoljno zastupljene tj. broj slučajeva je premali. To se vrlo dobro vidi za TPW indeks za koji vjerojatnost pojave munja jako oscilira za vrijednosti indeksa između 40 i 45 mm. Upravo se iz tog razloga koristio klizni srednjak, kako bi se izgladile veće oscilacije koje se uočavaju na krajevima prikazanih intervala (slike 13-15).



Slika 13. Relativne frekvencije pojave munja za pojedine vrijednosti K indeksa, sezona 2009.



Slika 14. Relativne frekvencije pojave munja za pojedine vrijednosti TPW indeksa, sezona 2009.

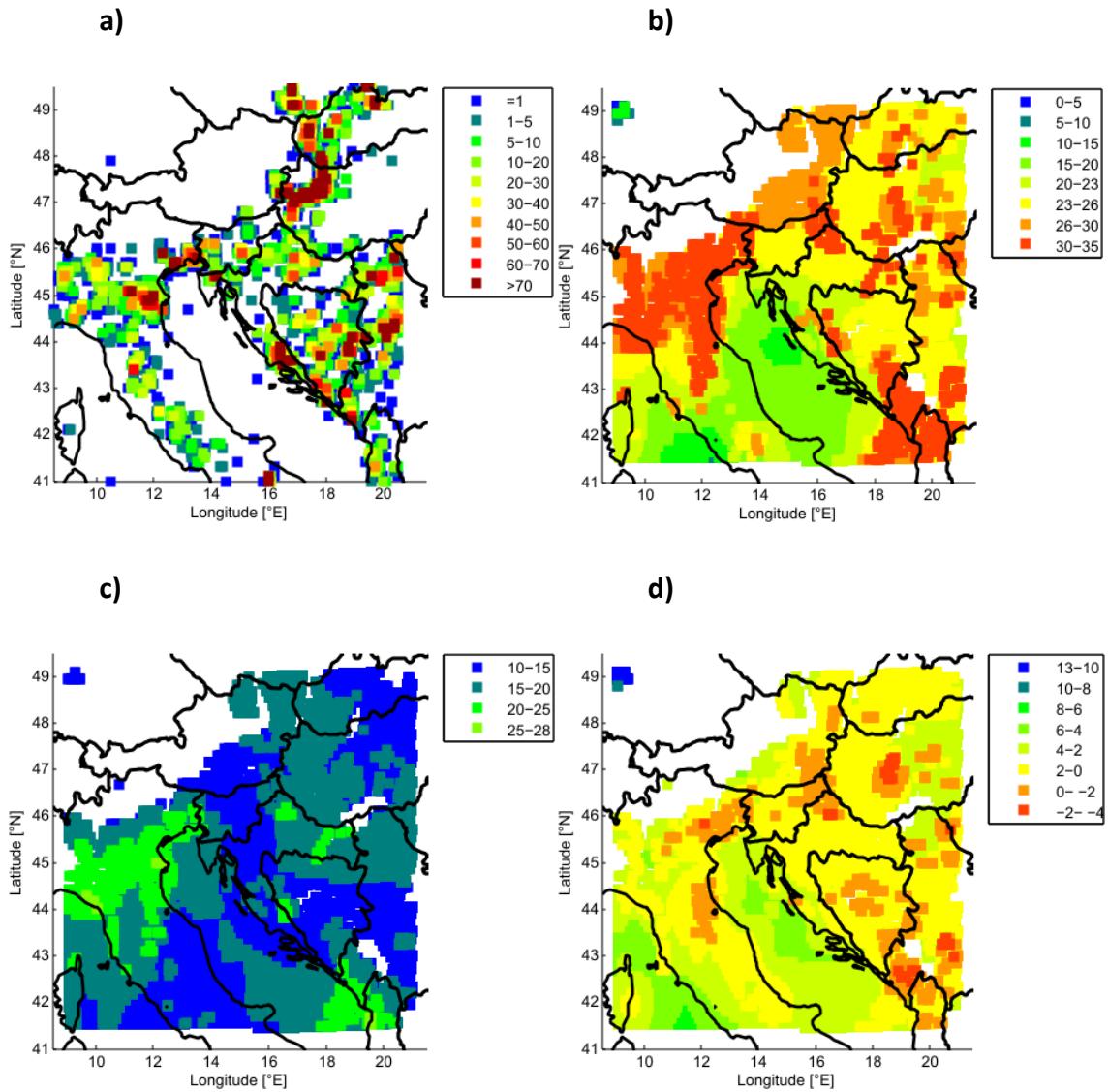


Slika 15. Relativne frekvencije pojave munja za pojedine vrijednosti LI indeksa, sezona 2009.

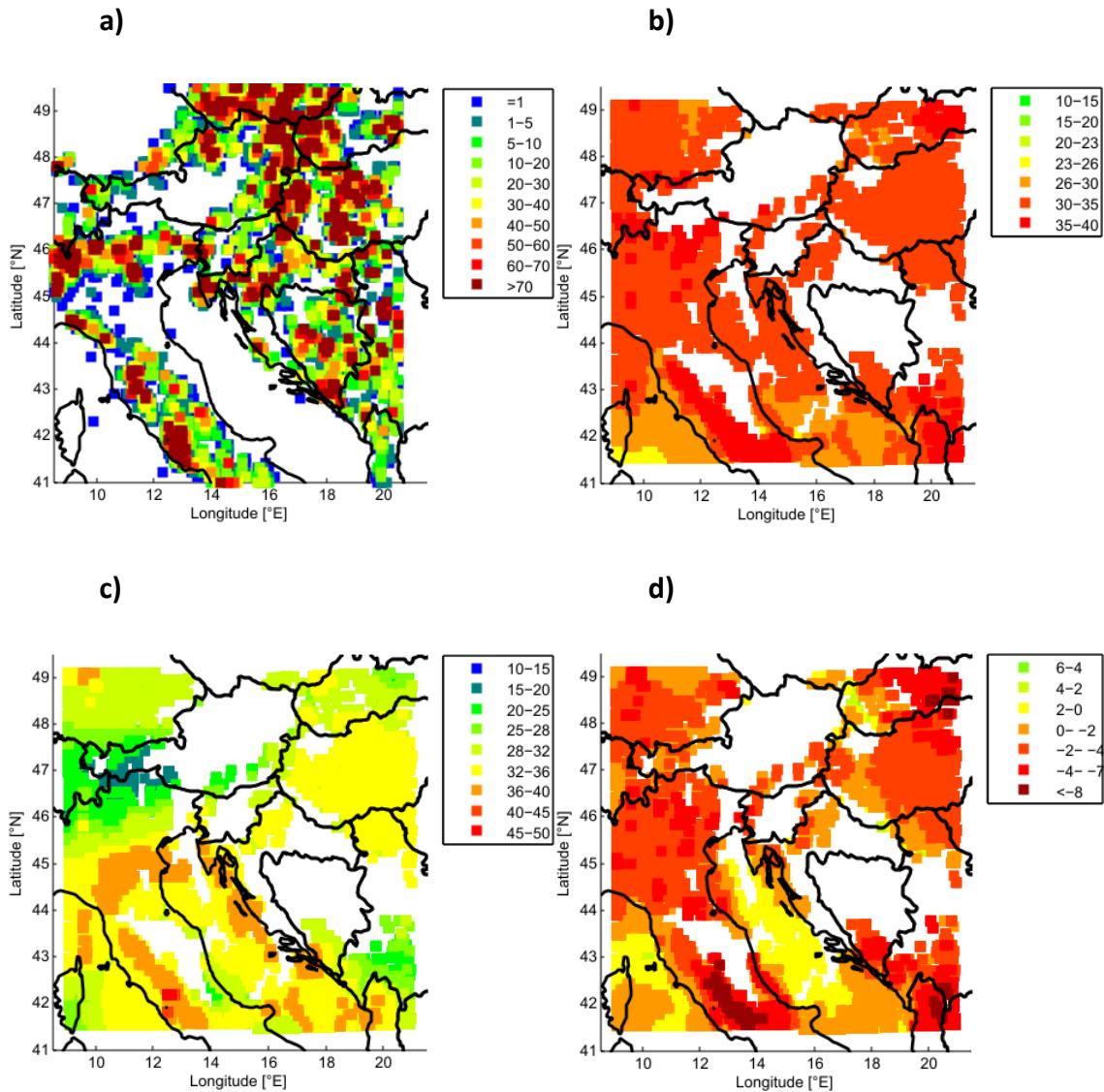
3.5. Primjeri ovisnosti pojave munja o indeksima nestabilnosti

U idućim primjerima, slike 16-20, prikazat će se direktna ovisnost pojave konvekcije u popodnevnim satima o vrijednostima pojedinog indeksa. Prikazano je pet primjera, jedan s početka sezone u svibnju, tri vrlo konvektivna dana sredinom ljetne sezone, te jedan na kraju sezone u rujnu. Broj munja nad nekim područjem govori o intenzitetu konvekcije. Iz danih primjera očito je da se konvekcija najjačeg intenziteta javlja u lipnju i srpnju, dok je u svibnju i rujnu nešto slabija.

U primjeru na slici 16 gotovo posvuda na području Hrvatske tijekom popodnevnih sati registrirana su električna pražnjenja, s maksimalnom učestalošću pojave munja u srednjoj Dalmaciji i sjeveroistočnom dijelu Istre. K indeks nad cijelim kopnenim područjem Hrvatske ima vrijednost veću od 15°C , koja se odredila kao granična za pojavu konvekcije. Mogu se uočiti tri njegova lokalna prostorna maksimuma: u srednjoj Dalmaciji, istočnoj Slavoniji i sjevernoj Hrvatskoj. Za razliku od maksimuma u srednjoj Dalmaciji koji je kasnije potvrđen i maksimalnim brojem munja, drugi lokalni maksimum K indeksa u Slavoniji u popodnevним satima predstavljao je područje bez električnog pražnjenja. Dok TPW indeks pokazuje prostorno isti potencijal za duboku konvekciju kao i K indeks, LI indeks prikazuje sjevernu Hrvatsku kao područje s najvećim konvektivnim potencijalom. Osim maksimuma K i TPW indeksa u Slavoniji, indeksi su relativno dobro ukazivali na mesta moguće konvekcije. Moguće je da ova pogrešna procjena indeksa potječe od horizontalne advekcije zraka u popodnevnim satima (Smiljanić, 2011).



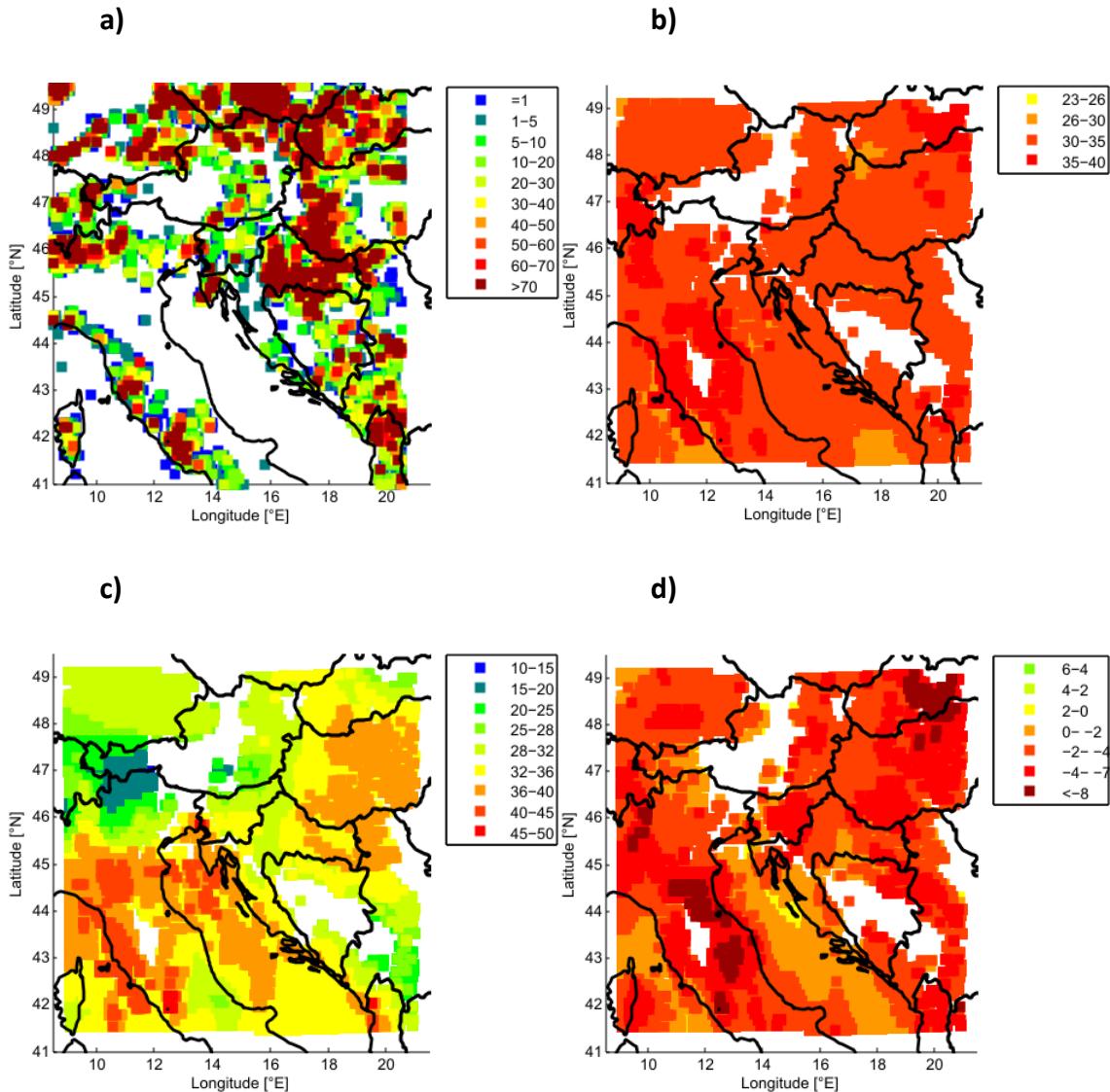
Slika 16. (a) Broj munja za razdoblje 12-21 UTC; vrijednosti K (b), TPW (c) i LI (d) indeksa usrednjениh za razdoblje 06-09 UTC, 04.05.2009. Broj munja je u prostornoj rezoluciji $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, indeksi nestabilnosti prikazani su za svaki piksel u intervalima vrijednosti prikazanih na legendi, K i LI u $^{\circ}\text{C}$, TPW u mm.



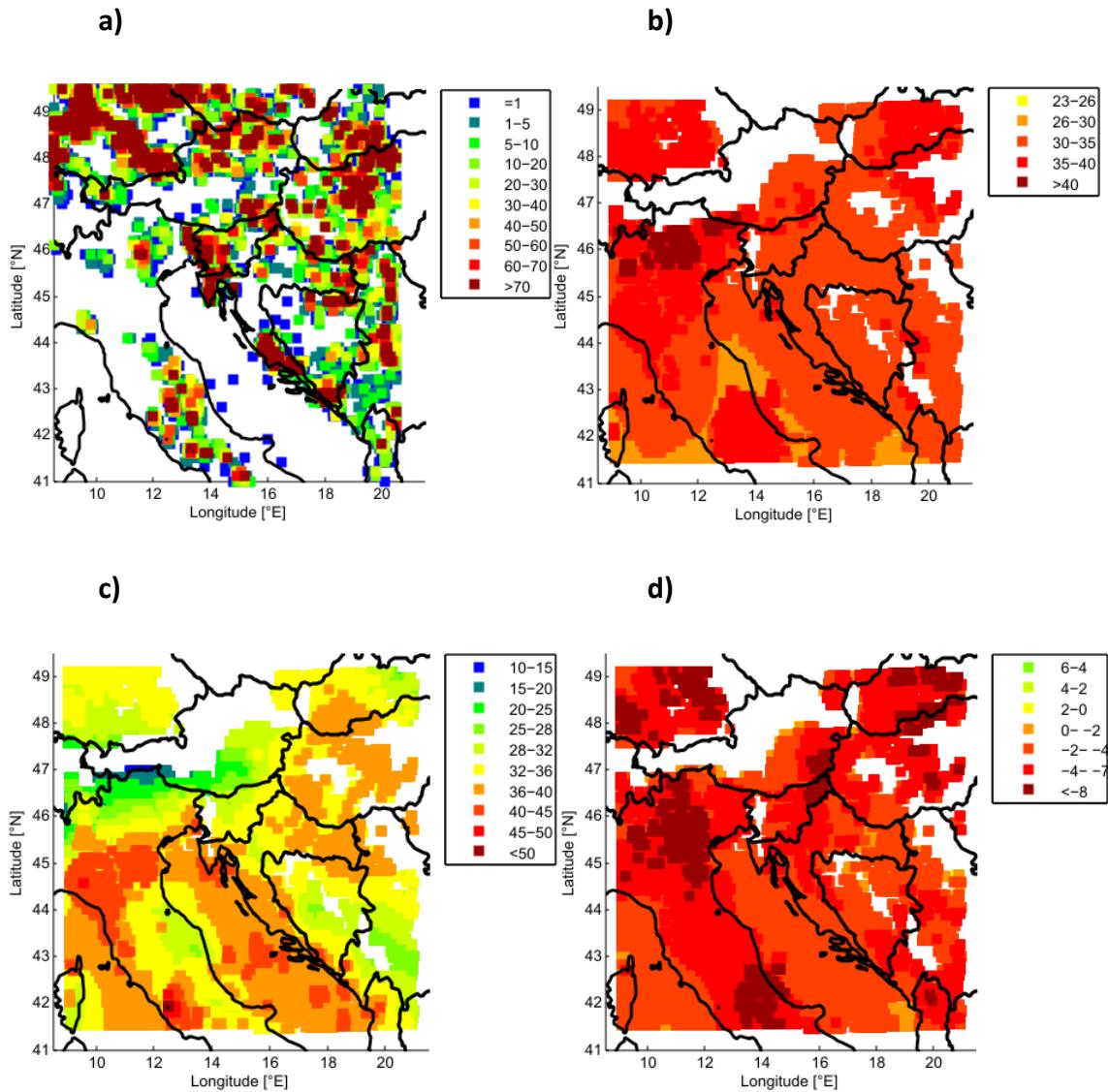
Slika 17. (a) Broj munja za razdoblje 12-21 UTC, vrijednosti K (b), TPW (c) i LI (d) indeksa usrednjениh za razdoblje 06-09 UTC, 29.06.2009. Broj munja je u prostornoj rezoluciji $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, indeksi nestabilnosti crtani su za svaki piksel u intervalima vrijednosti prikazanih na legendi, K i LI u $^{\circ}\text{C}$, TPW u mm.

U drugom primjeru (slika 17) konvekcija se razvila nad gotovo čitavom promatranom domenom. Općenito je većeg intenziteta nego u prvom primjeru na slici 16. Također su i vrijednosti svakog pojedinog indeksa veće nego u prvom primjeru. K indeks gotovo nigdje nema vrijednost ispod $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, a maksimum mu doseže, u Italiji, čak do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bijela polja na slikama označavaju da nema informacije o vrijednostima indeksa, što upućuje na postojanje

naoblake u jutarnjim satima nad tim područjem. Time je onemogućen njihov proračun. Indeksi su ponovno dobro ukazivali na pojavu konvekcije nad većim dijelom domene, ali isto tako i 'promašili' područje Jadrana. Ovaj primjer vodi do zaključka da se u kombinirani indeks nestabilnosti treba uključiti i utjecaj topografije (de Coning i sur., 2011).



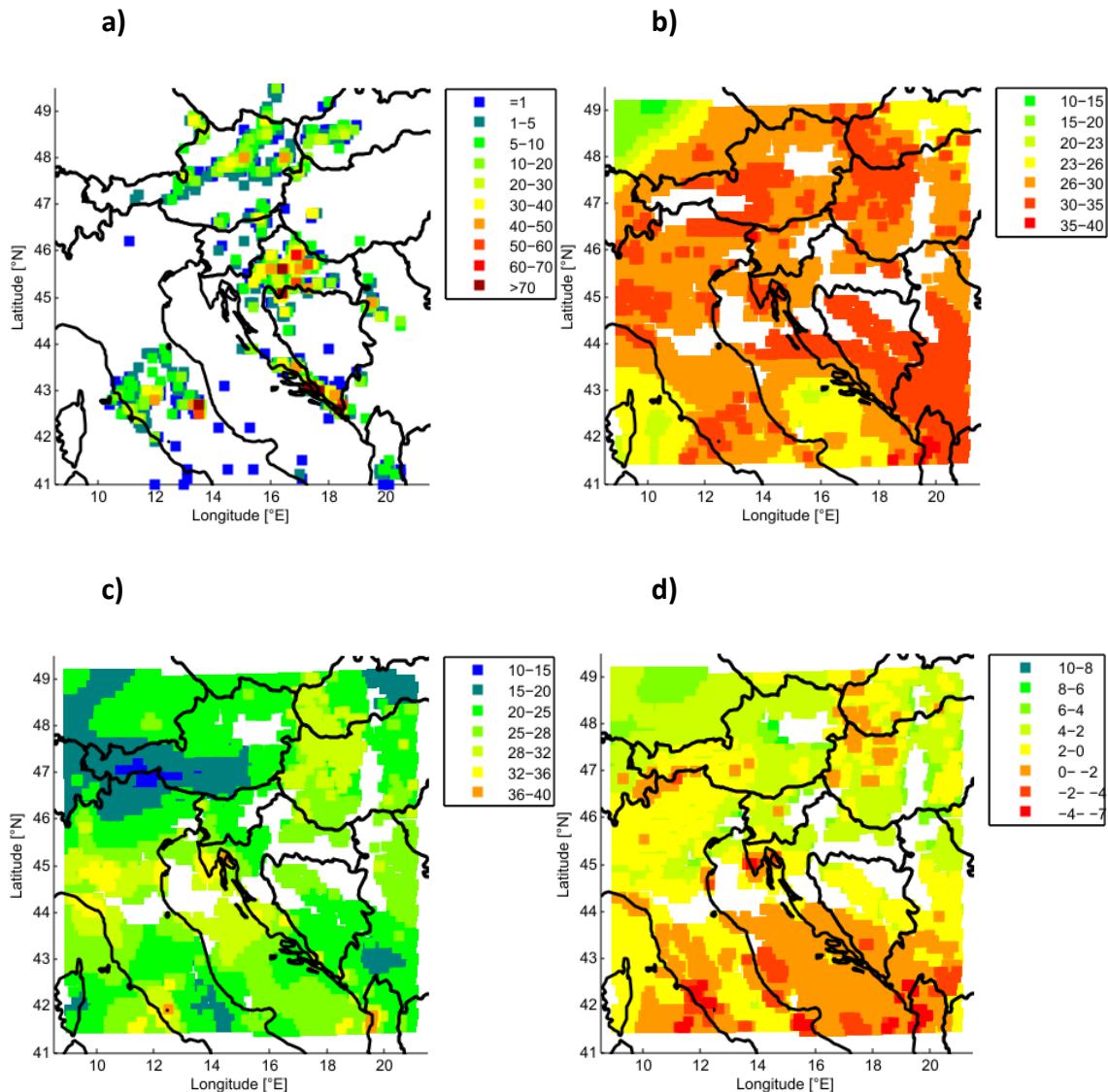
Slika 18. (a) Broj munja za razdoblje 12-21 UTC, vrijednosti K (b), TPW (c) i LI (d) indeksa usrednjениh za razdoblje 06-09 UTC, 30.06.2009. Broj munja je u prostornoj rezoluciji $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, indeksi nestabilnosti crtani su za svaki piksel u intervalima vrijednosti prikazanih na legendi, K i LI u $^{\circ}\text{C}$, TPW u mm.



Slika 19. (a) Broj munja za razdoblje 12-21 UTC, vrijednosti K (b), TPW (c) i LI (d) indeksa usrednjениh za razdoblje 06-09 UTC, 03.07.2009. Broj munja je u prostornoj rezoluciji $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, indeksi nestabilnosti crtani su za svaki piksel u intervalima vrijednosti prikazanih na legendi, K i LI u $^{\circ}\text{C}$, TPW u mm.

U primjerima na slikama 18 i 19, ponovno se vidi da vrijednosti indeksa iznad mora nemaju istu težinu kao na kopnu. Međutim, odsustvo munja nad morem ne isključuje u potpunosti pojavu duboke konvekcije nad morem kao što najavljuju indeksi. Iako je duboka konvekcija nad morem dvostruko rjeđa od one na kopnu, Ávila i sur. (2010) su pokazali da je odnos između udara munja nad morem u odnosu od one nad kopnom znatno manji i iznosi 1:10.

Također, treba napomenuti da su sva tri indeksa iznad svojih graničnih vrijednosti za pojavu konvekcije na mjestima gdje se konvekcija i pojavila.



Slika 20. (a) Broj munja za razdoblje 12-21 UTC, vrijednosti K (b), TPW (c) i LI (d) indeksa usrednjениh za razdoblje 06-09 UTC, 10.09.2009. Broj munja je u prostornoj rezoluciji $0.1 \times 0.1^\circ$, indeksi nestabilnosti crtani su za svaki piksel u intervalima vrijednosti prikazanih na legendi, K i LI u $^{\circ}\text{C}$, TPW u mm.

Primjer na slici 20 prikazuje završetak promatrane sezone. Vidi se da je preko cijele domene konvekcija slabijeg intenziteta nego u prethodna tri primjera, te je broj munja manji. Također su i vrijednosti svakog pojedinog indeksa u prosjeku niže nego u prethodnim primjerima. Ipak, svaki indeks ima vrijednost veću od granične vrijednosti za pojavu konvekcije tamo gdje se ona i pojavljuje. Minimumi K indeksa jako dobro prate područja gdje nije bilo munja. Na ovom primjeru, kao i na prethodnima, uočava se da vrijednost K indeksa na rubovima oblaka (bijela područja na slici) obično poraste, dok se vrijednosti LI u prosjeku malo smanjuju.

4. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

U ovom radu pokušalo se dovesti u statističku vezu vrijednosti indeksa nestabilnosti u jutarnjim satima s pojmom munja u popodnevnom terminu. To se radilo u svrhu poboljšanja prognoze duboke mokre konvekcije u 'čistom zraku', kao i zbog eventualne izrade univerzalnog, kombiniranog indeksa nestabilnosti. S obzirom na to da statistička analiza na temelju parametara POD, FAR, HK (Wilks, 2005; de Coning i sur., 2011) nije mogla biti u potpunosti provedena zbog premalog broja slučajeva, kombinirani indeks nestabilnosti koji bi u sebi sadržavao informaciju o sva tri promatrana indeksa nije mogao biti izведен. Pretpostavlja se da bi izvođenje kombiniranog indeksa, koji bi još bolje od pojedinačnih indeksa opisivao vezu s pojmom konvekcije, omogućilo povećanje broja slučajeva. Naime, vrijednost HK parametra (pod uvjetom da je dovoljno velik) može se iskoristiti kao težinski faktor za kumulativne čestine. Parametar HK govori koliko su dobro odvojeni događaji koji su se dogodili i zadovoljavaju uvjete ('DA' događaji) od onih koji ne zadovoljavaju zadane uvjete ('NE' događaji). U ovdje prikazanoj analizi HK poprima relativno male vrijednosti za korišten set podataka, što ukazuje na to da su prvi i drugi član relativno bliski po iznosu. Dakle, postoji dosta 'promašenih prognoza' (c član u tablici kontingencije), ali isto tako i 'lažnih uzbuna' (b član u tablici kontingencije). To se može objasniti relativno malim brojem promatranih slučajeva, gdje onda nedostaju podaci s višim/nižim vrijednostima indeksa. Oni bi povećali broj 'točnih prognoza' (a član u tablici kontingencije) kao i d član koji ukazuje na to da se nije ostvario događaj koji se nije ni prognozirao. Ovakva analiza vodi do zaključka da bi trebalo promatrati i dane kada nije bilo konvekcije. Nadalje, kroz primjere na slikama 15 do 19 može se primijetiti da bi u izračun takvog kombiniranog indeksa trebalo uvesti i topografiju (de Coning i sur., 2011).

Razmotrimo sad analize svakog indeksa posebno. K indeks ima graničnu vrijednost za pojavu konvekcije oko 15°C . Ta se vrijednost pokazala vrlo pouzdana u kasnije analiziranim primjerima. Nadalje, K vrijednosti treba uzeti s oprezom na rubovima oblaka jer su često precijenjene. Granična vrijednost za TPW, oko 13 mm, pokazala se također točnom i pouzdanom u danim primjerima. Problem se javlja, kao i kod ostala dva indeksa, kasnije kako vrijednosti indeksa rastu. Naime, vrijednosti indeksa rastu, ali vjerojatnosti pojavljivanja

konvekcije nisu jednoznačne. U tom smislu, bolje je promatrati intervale vrijednosti pojedinog indeksa pa samim time i intervale vjerojatnosti pojave munja. LI indeks ima graničnu vrijednost za pojavu konvekcije oko 5°C , što odstupa od uobičajene granične vrijednosti od 0°C . Na ovom slučaju vidi se potreba za izradom lokalnih indeksa nestabilnosti koji bi se računali posebno za neko geografsko područje (de Coning i sur., 2011) što se dobiva korištenjem izlaza iz regionalnog (mezoskalnog) numeričkog atmosferskog modela. Vjerojatnost pojave munja raste s manjim vrijednostima LI, koje su u promatranoj sezoni dosegle ispod -10°C .

Vrijednosti sva tri indeksa obično su veće u lipnju i srpnju, isto tako u tom periodu javljaju se i najintenzivnije grmljavinske oluje. Ipak, treba obratiti pažnju na to da ista vrijednost svakog indeksa početkom svibnja i rujna nema istu težinu kao ta vrijednost u lipnju ili srpnju. Primjerice, vrijednost K indeksa od $30\text{-}35^{\circ}\text{C}$ u svibnju gotovo sigurno garantira pojavu konvekcije u popodnevnim satima, dok taj isti raspon vrijednosti u lipnju ili srpnju ima nešto manju vjerojatnost pojave konvekcije (primjeri na slikama 16-20).

U smislu boljeg prognoziranja duboke mokre konvekcije u "čistom zraku", smatram da bi se slična analiza trebala provesti za puno veći broj slučajeva. Broj slučajeva se može povećati proširenjem prostorne domene i/ili povećanjem vremenskog niza (broja dana). Proširenje prostorne domene nema prevelikog smisla, jer nas zanima šire područje Hrvatske. Vremenski niz mjerenja može se povećati iz arhive mjerenja (ako postoji) ili iz aktualnih podataka. S obzirom da su mjerenja munja novijeg datuma (tek od 2006. godine, s većom pokrivenošću od 2008.), moguće je koristiti podatke o oborini i grmljavini te tako produljiti niz. Bilo bi zanimljivo vidjeti i analizu na danima kada se nije javila konvekcija: kakve bi bile vrijednosti indeksa, te koliko bi imali "lažnih uzbuna" (FAR) u takvim slučajevima.

Ovaj rad pokazao je pristup problemu s nekoliko strana, primjenom metoda statističke obrade ili subjektivnim pristupom kod određenih primjera. Vjerujem da postoji još mogućnosti i metoda za analiziranje ovog problema, a pokazano je da bi povećanjem broja slučajeva bitno unaprijedila ovakva analiza. Treba napomenuti također da iako su munje dobar indikator konvekcije (kada ima munja svakako ima i duboke konvekcije), ako ima duboke konvekcije ne mora nužno biti i električnog pražnjenja. To osobito vrijedi za područje nad morem. Upravo zbog ovih razloga, a u svrhu poboljšanja prognoza duboke mokre

konvekcije u "čistom zraku", nadam se da će ovaj rad biti samo početak daljnje analize zavisnosti indeksa nestabilnosti i pojave munja.

5. LITERATURA

1. Ávila E.E., Bürgesser R.E., Castellano N.E., Collier A.B., Compagnucci R.H., Hughes A.R.W. (2010): Correlations between deep convection and lightning activity on a global scale. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **72**, 1114-1121.
2. Betz H.-D., Schmidt K., Fuchs B., Oettinger W. P., Holler H. (2007): Cloud Lightning: Detection and Utilization for Total Lightning Measured in the VLF/LF Regime. *Journal of Lightning Research*, **2**, 1–17.
3. Betz H.-D., Schmidt K., Laroche P., Blanchet P., Oettinger W. P., Defer E., Dziewit Z., Konarski J.(2009): LINET – An international lightning detection network in Europe. *Atmospheric Research*, **91**, 564–573, doi:10.1016/j.atmosres.2008.06.012.
4. Doswell C. A. III (1987): The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: A case study example. *Weather and Forecasting*, **2**, 3-16.
5. de Coning E., Koenig M., Olivier J.(2011): The combined instability index: a new very-short range convection forecasting technique for southern Africa, *Meteorological Applications*, **18** 421-439, DOI: 10.1002/met.234.
6. Fuhrhop R., Erdmann A., Czekala H., Simmer C. (2000): Development of operational algorithms for the retrieval of instability indices from MSG. Final Rep. of EUMETSAT Contract EUM/CO/98/646/JKK, 147 str.
7. König M., de Coning E. (2008): The MSG Global Instability Indices Product and Its Use as a Nowcasting Tool. *Weather and forecasting*, **24**, 72-85.
8. Manzato A, (2003): A climatology of instability indices derived from Friuli Venezia Giulia soundings, using three different methods. *Atmospheric Research*, **67-68**, 417-454.

9. Mikuš P., Telišman Prtenjak M., Strelec Mahović N. (2012): Analysis of the convective activity and its synoptic background over Croatia, *Atmospheric Research* **104/105**, 139-153.
10. Peppler R. A. (1988): A review of static stability indices and related thermodynamic parameters. SWS Misc. Publ. 104, Illinois State Water Survey Division, Climate and Meteorology Section, 94 str.
11. Smiljanić I. (2011): Verifikacija indksa nestabilnosti izvedenih iz satelitskih mjerena na širem području Hrvatske, PMF, diplomski rad, 45 str.
12. Uglešić I., Milardić V., Milešević B., Franc B., Filipović-Grčić B. (2009): Uspostava sustava za lociranje munja u Hrvatskoj, Hrvatski ogranač međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sustave – CIGRÉ, 9. savjetovanje HRO CIGRÉ Cavtat, 8.-12. studenoga 2009.
13. Wilks D. S. (2005): Statistical methods in the atmospheric sciences, Academic Press Inc., San Diego, USA, 464 str.

6. SAŽETAK

U ovom radu se ispituje statistička veza između satelitskih indeksa nestabilnosti u jutarnjim satima i pojavu munja u popodnevnim satima. Indeksi nestabilnosti sadrže u sebi informacije o potencijalnoj mogućnosti razvoja konvekcije, dok pojava munja upućuje na postojanje konvektivnog razvoja oblaka i olujnog nevremena. Stoga je cilj bio što bolje opisati njihovu međusobnu zavisnost u svrhu boljeg prognoziranja duboke mokre konvekcije u "čistom zraku". Pri tom se koristila metodologija izrade kombiniranog indeksa za Južnu Afriku (de Coning i sur., 2011), koja se pokušala primijeniti za šire područje Hrvatske. Podaci su bili dostupni za 27 dana tijekom 2009. godine i za 13 dana u 2010. godini od travnja do listopada. Promatrajući svaki indeks posebno, određene su granične vrijednosti indeksa za pojavu konvekcije te intervale vjerojatnosti pojave konvekcije preko kumulativnih čestina. Pojedini su primjeri pokazali kombinirani utjecaj topografije i samih indeksa na pojavu konvekcije. Unatoč navedenog, predložena metoda nije omogućila izradu kombiniranog indeksa za šire područje Hrvatske s obzirom na premali broj dana. Pokazalo se da su dulji nizovi podataka nužni za određivanje kombiniranog indeksa za Hrvatsku, koji bi preglednije i bolje indicirao mjesta moguće pojave munja.