

Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Geofizički odsjek

**IVAN SMILJANIĆ**

**VERIFIKACIJA INDEKSA NESTABILNOSTI  
IZVEDENIH IZ SATELITSKIH MJERENJA  
NA ŠIREM PODRUČJU HRVATSKE**

**DIPLOMSKI RAD**

Voditelj: Doc. dr. sc. Maja Telišman Prtenjak  
Suvoditelj: Dr. sc. Nataša Strelec Mahović

Zagreb, 2011.

Zahvaljujem se ponajprije Dr. sc. Nataši Strelec Mahović na zaista velikoj spremnosti da svoje zanje i vrijeme podijeli sa mnom. Hvala za pomoć pri prikupljanju podataka i programiranju, na raspravama, savjetima, recenziji i za sudjelovanje u svim ostalim fazama izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem Doc. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak na prihvaćanju mentorstva kao i na korisnim savjetima pri pisanju rada, dugim raspravama i recenziji rada.

Zahvaljujem i ostalim profesorima sa Geofizičkog odsjeka Sveučilišta u Zagrebu koji su savjetima i prijedlozima pridonjeli ovom radu.

Hvala Dr. Marianne König koja mi je nesebično prenjela svoja saznanja i iskustva vezana uz temu istraživanja.

Djelatnicima Odjela za vremenske analize i prognoze, pri DHMZ-u zahvaljujem na ustupljnom radnom prostoru, savjetima i strpljivosti. Također zahvaljujem i Blaženki Matjačić i Nevenki Kadić Vlahović na pomoći pri dekodiranju BURF podataka.

Veliko hvala svim kolegama studentima; Kikiju, Stipi, Miranu, Tomaški, Pinokiju, Mikiju, Zokiju, Baji, Kelavi, Liculu, Đojiću, Grubaču, Barbari, Petri i svima ostalima, koji su u velikoj mjeri zaslužni za uspješan završetak mojeg studija, kao i za to da mi tijekom studija ne bude dosadno.

Hvala B na podršci, razumjevanju i ljubavi.

Najveće hvala mojim roditeljima i Bogu na njima.

## SADRŽAJ

1.	Uvod .....	01
1.1.	Motivacija i cilj istraživanja .....	01
1.2.	Konvekција .....	02
1.3.	Nestabilnost .....	03
1.4.	Indeksi nestabilnosti .....	05
1.4.1.	KO indeks .....	06
1.4.2.	K indeks .....	07
1.4.3.	LI indeks - indeks podizanja .....	07
1.4.4.	TPW indeks - indeks ukupne oborive vode .....	08
2.	Podaci i metode .....	09
2.1.	Satelitska motrenja .....	09
2.2.	Fizikalna metoda pretraživanja (engl. Physical Retrieval Method, PRM) .....	10
2.3.	Podaci i metode verifikacije .....	12
2.3.1.	Verifikacija s obzirom na satelitske podatke .....	12
2.3.2.	Verifikacija s obzirom na podatke o munjama .....	13
2.3.3.	Verifikacija s obzirom na radiosondažne podatke .....	14
3.	Rezultati verifikacije .....	16
3.1.	Primjer A: 19. svibnja 2009. ....	16
3.2.	Primjer B: 11. srpnja 2010. ....	21
3.3.	Primjer C: 17. kolovoza 2009. ....	24
3.4.	Primjer D: 1. svibnja 2009. ....	28
3.5.	Primjer E: 29. prosinca 2010. ....	32
3.6.	Radiosondažna verifikacija .....	33
3.6.1.	Radiosondažna verifikacija - K indeks .....	36
3.6.2.	Radiosondažna verifikacija - LI indeks .....	37
3.6.3.	Radiosondažna verifikacija - TPW indeks .....	38
3.6.4.	Testiranje značajnosti Monte Carlo metodom .....	39
4.	Zaključak .....	41
5.	Literatura .....	43
6.	Sažetak .....	45

## 1. UVOD

### 1.1. Motivacija i cilj istraživanja

Dobro je poznato da je razvoj konvektivnih oblaka jedan od češćih, a ujedno i važnijih procesa u atmosferi koji može značajno utjecati na svakodnevni ljudski život i djelovanje. Konvekcija je proces koji se javlja u troposferi iznad gotovo svih područja na Zemlji pa tako i u području umjerenih širina na kojima se nalazi Hrvatska. Vremenske prilike vezane uz razvoj konvektivnih oblaka nose sa sobom znatne, neophodne količine oborine ali često uključuju i mnoge opasne pojave kao što su obilni pljuskovi i poplave, tuča, olujni udari vjetra, munje, a ponekad i pijavice pa čak i tornada. Ogromne ekonomske štete kao i prijetnja čovjekovoj sigurnosti, koje prate ovakve događaje, dovoljan su poticaj i pokazatelj nužnosti što točnije prognoze konvektivnih razvoja.

Za nastanak i razvoj konvekcije nužna su tri osnovna uvjeta: dovoljan sadržaj vlage u nižim slojevima atmosfere, nestabilnost atmosfere te proces koji uzrokuje dizanje zraka (Doswell, 1987). U ovom radu promatrat će se nestabilnost atmosfere, kao jedan od osnovnih uvjeta za pojavu konvektivnog razvoja. Nastojat će se utvrditi ovisnost pojave duboke, mokre konvekcije o vrijednostima četiri indeksa nestabilnosti izvedenih iz satelitskih mjerena, za šire područje Hrvatske. Spomenuti indeksi sadrže informacije o vertikalnoj strukturi atmosfere iz kojih se može odrediti stupanj nestabilnosti atmosfere, odnosno vjerojatnost pojave konvektivnog razvoja. Glavna zadaća takvih indeksa u pravilu je ukazivanje na mesta pojačane nestabilnosti kako bi se prognostičari mogli fokusirati upravo na ta područja te na manjem prostoru izvršiti detaljniju analizu atmosfere (satelitom, radarom, opažanjima, itd.). Indeksi su dobiveni sintezom kratkoročne prognoze i satelitskih mjerena, što će u radu biti detaljnije opisano. Ova sintezom potrebna je iz više razloga. Prvi razlog su prostorno i vremenski rijetka radiosondažna mjerena kojima se dobivaju stvarni vertikalni profili atmosfere. Drugi je razlog što profili dobiveni iz numeričkih modela još uvijek imaju problema s potpuno točnom reprodukcijom atmosferskih profila. Isto tako, vrijednosti indeksa mogu biti generirane i na područjima koja nisu pokrivena radarima ili drugim mjerjenjima, pa se na takvim mjestima ipak dobiva neka vrsta informacije o stanju atmosfere.

S obzirom na to da konvekcija pripada domeni mezoskalnih i mikroskalnih procesa u atmosferi, vremenska domena konvektivnih procesa reda je veličine dana, odnosno sata. To znači da je za smislu prognozu ovakvih procesa potrebno ocijeniti stanje atmosfere samo nekoliko sati prije same inicijacije konvekcije. U tom smislu prednost spomenutih satelitskih indeksa nestabilnosti je vremenska razlučivost od 15 minuta, što je veliki pomak u odnosu na radiosondažna mjerena, koja se vrše najviše četiri, a najčešće samo puta dnevno.

## 1.2. Konvekcija

Pod pojmom konvekcije se u meteorologiji podrazumijeva vertikalni transport mase nekog fluida, čime se u vertikalnom smjeru prenose i svojstva istog. Najčešće se promatra prijenos vlage i topline kao nužnih sastojaka potrebnih za nastanak konvektivnih oblaka i popratnih pojava. Za razliku od pojma advekcije, pod kojim se podrazumijeva najčešće horizontalni kao i prisilni vertikalni transport fluida, konvekcija se u meteorologiji povezuje s uzgonskim procesima u fluidu. Nadalje, od više mogućih oblika konvekcije u ovom će radu naglasak biti na dubokoj mokroj konvekciji 'u čistom zraku'. Naime, za konvekciju koja je posljedica premještanja sinoptičkih sistema (npr. frontalnih sustava) najčešće se zna da li će se i kada pojaviti na nekom području. Problem, međutim, nastaje kad sinoptička situacija ne ukazuje na mogućnost pojave konvekcije, ali do razvoja iste ipak dođe. To je često slučaj ljeti, kada u jutarnjim satima imamo 'mirnu' atmosferu dok poslijepodne dolazi do intenzivnog razvoja konvektivnih sustava. Najčešće su to nepredvidljive situacije, koje nose sa sobom mnoge već spomenute opasne vremenske pojave.

Opasne vremenske pojave vezane uz razvoj konvektivnih oblaka u pravilu su posljedica otpuštanja ogromnih količina energije pri promjeni faznih stanja vode. Jedan tipični konvektivni oblak radiusa 5 km i visine 10 km sadrži u prosjeku  $8 \times 10^8$  kg kondenzirane vode. Tijekom procesa kondenzacije tolike količine vode oslobađa se okvirno  $10^{14}$  J latentne topline, unutar perioda od 25 min (Doswell, 2001). Usporedbe radi, snaga ovakvog konvektivnog oblaka u konačnici odgovara ukupnoj snazi 60 najsnažnijih nuklearnih elektrana nazivne snage 1000 MW. Veći dio te energije ipak služi za pokretanje same konvekcije (protivno sili teži) dok manji dio sudjeluje u opasnim popratnim pojavama.

Kao što je već spomenuto, tri su sastojka potrebna da bi došlo do duboke, mokre konvekcije (Doswell, 1987):

- a) vlažan sloj zraka dovoljne debljine u nižoj ili srednjoj troposferi
- b) dovoljno velik vertikalni temperaturni gradijent atmosfere (uvjetna nestabilnost)
- c) početni vertikalni impuls, dovoljan da čest zraka dosegne *nivo slobodne konvekcije* (engl. *Level of free convection*, LFC)

Početni impuls na čest zraka može biti npr. orografska prisila (engl. *orographic forcing*) ili pak dijabatska insolacija dijela površine Zemlje koja ima veći toplinski kapacitet od okoline, pri čemu se stvaraju tzv. termali kojima se fluid prenosi iz nižih u više dijelove atmosfere. Ako je koncentracija vlage u uzdižućem fluidu dovoljna i ako fluid dosegne nivo kondenzacije, odnosno nivo slobodne konvekcije, doći će do kondenzacije vodene pare pri čemu će oslobođena latentna toplina biti utrošena na smanjivanje vertikalnog temperaturnog gradijenta česti (uzgon). Iz toga je očito da pri nedostatku jednog od navedenih uvjeta neće doći do razvoja duboke, mokre konvekcije.

Uzgon definiramo jednostavno pomoću izraza:

$$B = -\frac{\rho_p - \rho_e}{\rho_e} g = \frac{T_V(z)_p - T_V(z)_e}{T_V(z)_e} g \quad (1)$$

gdje je  $\rho_p$  gustoća česti zraka,  $\rho_e$  gustoća okolnog zraka,  $T_v(z)_p$  virtualna temperatura česti zraka,  $T_v(z)_e$  virtualna temperatura okolnog zraka i  $g$  ubrzanje sile teže.

Iz izraza je vidljivo da ako čest zraka ima manju gustoću i/ili veću temperaturu od okolnog zraka tada postoji pozitivni uzgon te posljedično uzlazno forsiranje na čest. Naravno, uzgon može biti i negativnog predznaka što povlači silazno forsiranje na čest. Takav negativan uzgon proizlazi većinom iz promjene vodene faze, tj. evaporacijom, kao i iz uvlačećeg efekta oborine (engl. *loading effect*). Ukupan efekt turbulentnog transporta toplijeg zraka u vis pozitivnim uzgonom i spuštanja hladnjeg zraka negativnim uzgonom za rezultat ima uspostavljanje stabilnosti u prethodno nestabilnoj atmosferi. Nadalje, ako se viz raz za uzgon integrira od nivoa slobodne konvekcije do *razine bez uzgona* (engl. *Level of Neutral Buoyancy*, LNB), gdje se temperatura česti izjednačava sa temperaturom okoline, dobiva se veličina koja se naziva *konvektivna raspoloživa potencijalna energija* (engl. *Convective Available Potential Energy*, CAPE). Ovo je jedna od važnijih veličina koja daje informaciju o količini energije dostupne za vertikalnu akceleraciju česti zraka i ukazuje na nestabilnost atmosfere (vrijednosti veće od 1000 J/kg).

### 1.3. Nestabilnost

Promotrimo jednadžbu vertikalnog gibanja neviskoznog fluida:

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (2)$$

gdje je  $w=dz/dt$  vertikalna komponenta gibanja,  $z$  geometrijska visina,  $g$  akceleracija sile teže,  $\rho$  gustoća fluida, a  $p$  tlak.

Pri hidrostatičkoj ravnoteži nema akceleracije fluida pa je lijeva strana gornjeg izraza jednaka nuli. Tu je vidljivo da uzgon proizlazi iz neuravnoteženja sile gradijenta tlaka (prvi član na desnoj strani jednadžbe (2)) uzrokovanoj perturbacijama gustoće. Pomoću definicije vertikalnog gibanja i primjene metode linearizacije jednadžba (2) se može prevesti u oblik:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2} = B = -\frac{g}{T'} (\Gamma - \gamma) z \quad (3)$$

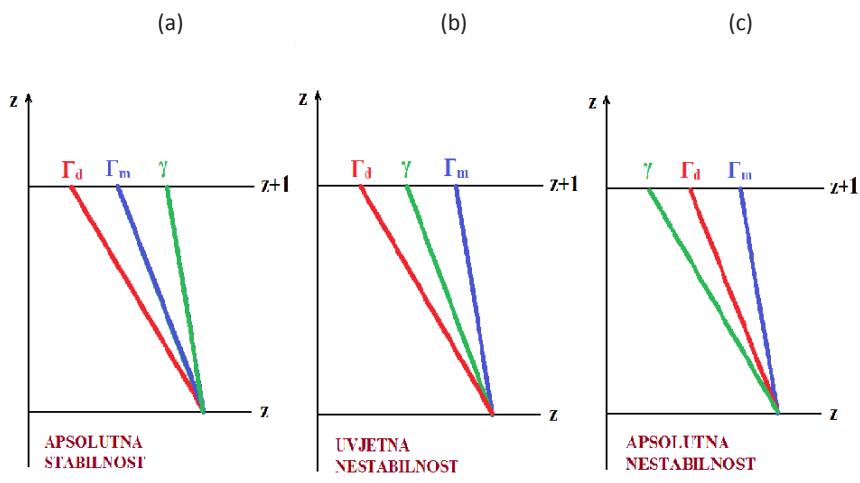
gdje  $T'$  predstavlja temperaturu okoline česti,  $\Gamma=dT/dz$  stopu hlađenja česti, a  $\gamma=dT'/dz$  stopu hlađenja okoline česti, tj. atmosfere. Uz konstantne koeficijente, jednadžba (3) predstavlja običnu diferencijalnu jednadžbu drugog reda, koja ima rješenje:

$$z(t) = z_o \exp[iNt] \quad (4)$$

gdje je  $z_o$  početna visina česti i  $N$  uzgonska ili tzv. Brunt-Väisälä frekvencija koja je jednaka:

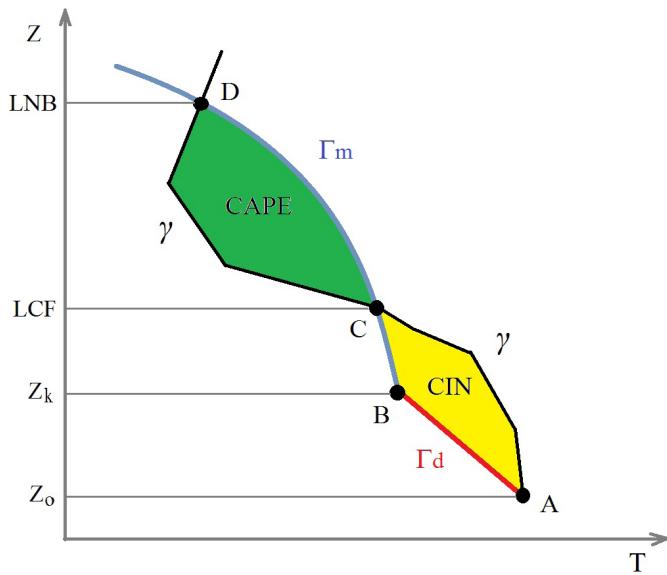
$$N^2 = \frac{g}{T'} (\Gamma - \gamma) z \quad (5)$$

Iz prethodnih je izraza vidljivo da ako je stopa hlađenja česti manja od stope hlađenja okoline, odnosno ako je korijen kvadrata uzgonske frekvencije imaginaran broj, dolazi do eksponencijalnog povećanja visine česti. To znači da u čest koja je infinitezimalno pomaknuta uvis nastavlja svoje gibanje u tom smjeru. Tada se kaže da je atmosfera hidrostatski nestabilna. Ako je pritom stopa hlađenja atmosfere ( $\gamma$ ) manja od suho-adijabatičke ( $\Gamma_d$ ), ali veća od mokro-adijabatičke stope ( $\Gamma_m$ ) hlađenja česti, tako da vrijedi  $\Gamma_d > \gamma > \Gamma_m$ , tada je riječ o uvjetnoj nestabilnosti (slika 1b). Apsolutno stabilna atmosfera povlači za sobom uvjet da je:  $\gamma > \Gamma_d > \Gamma_m$  (slika 1a). Međutim, u slučaju kada je  $\gamma < \Gamma_m < \Gamma_d$ , odnosno kada je korijen kvadrata uzgonske frekvencije realan broj, tada rješenje diferencijalne jednadžbe daje oscilatorna rješenja. U tom slučaju govori se o absolutnoj nestabilnosti (slika 1c).



*Slika 1. Shematski prikaz atmosferskih vertikalnih temperaturnih profila: stope hlađenja atmosfere ( $\gamma$ ), suho-adijabatičke stope ( $\Gamma_d$ ) i mokro-adijabatske stope ( $\Gamma_m$ ) u slučaju apsolutne stabilnosti (a), uvjetne (b) i apsolutne nestabilnosti (c).*

Pojednostavljeni fizikalni opis procesa duboke mokre konvekcije je prikazan na slici 2. Prepostavimo da se čest, koja je u blizini Zemljine površine, nalazi u statički uvjetno stabilnoj atmosferi. Njena relativna vlažnost je manja od 100% pa se, forsirana npr. dijabatskim zagrijavanjem površine, uzdiže do nivoa kondenzacije po suhoj adijabati. Do tog nivoa njena je temperatura pala toliko da ona postaje zasićena te se dalje giba po mokroj adijabati do LFC nivoa. Na toj razini njena temperatura prerasta temperaturu okoline te u tom stanju ona postaje nestabilna (pozitivna uzgonska frekvencija). Pokrenuta početnim vertikalnim inercijalnim impulsom nastavlja se uzdizati sve do LNB nivoa. Tu joj se temperatura izjednačava s temperaturom okoline te ona postaje statički stabilna (negativna uzgonska frekvencija). U tom stadiju čest započinje oscilatorno gibanje oko spomenutog nivoa, sukladno rješenju jednadžbe (4), te se njena energija akumulira u tom području (vrh kumulonimbusnog oblaka). Na slici 2 su prikazane i površine koje odgovaraju CAPE-u i energiji inhibicije konvekcije (engl. *Convective Inhibition, CIN*). CIN je ustvari ‘negativni CAPE’, odnosno energija potrebna da čest dosegne LFC nivo.



**Slika 2.** Skica duboke, mokre konvekcije u vektorialnom presjeku (prema slici 1 na [http://jadran.gfz.hr/pojmovnik\\_s.html#slobodna\\_k](http://jadran.gfz.hr/pojmovnik_s.html#slobodna_k)). Detaljniji opis u tekstu.

Potrebno je napomenuti da gornji primjeri nestabilnosti spadaju u kategoriju hidrostatičke nestabilnosti koja je, kao što je i rečeno, zaslužna za intenzivne konvektivne procese u umjerenim geografskim širinama (ne isključivo). Osim hidrostatičke nestabilnosti u promatranim geografskim širinama prisutne su i hidrodinamičke nestabilnosti atmosfere kao što su baroklina i barotropna nestabilnost. One su neizostavni dio procesa konvekcije i kao takve bi općenito trebale biti uvažene pri svim razmatranjima uvjeta nastanka konvekcije. Kao još jedan primjer nestabilnosti možemo spomenuti i tzv. simetričnu nestabilnost, odnosno izentropsko-inercijalnu nestabilnost, koja je spoj statičke i barotropne nestabilnosti. Prema Grisogono i Belušić (2008) to je jedina prava mezoskalna nestabilnost. Ona se javlja prilično rijetko u umjerenim širinama, ali je zato zaslužna za vrlo intenzivna konvektivna zbivanja u atmosferi. Razlog zbog kojeg je u ovom radu naglasak na hidrostatičkoj nestabilnosti leži u činjenici da je ovdje riječ o indeksima nestabilnosti, koji u sebi sadrže samo informacije o vlažnosti zraka i temperaturi u pojedinim slojevima atmosfere. Oni kao takvi nemaju dovoljnu i potpunu informaciju o drugim oblicima nestabilnosti, pa se u ovom radu općenito pokušala izbjegći verifikacija u danima u kojima konvektivne događaje ne bi mogli pripisati utjecaju hidrostatičke nestabilnosti.

#### 1.4. Indeksi nestabilnosti

Indeksi nestabilnosti indikacija su stanja atmosfere pogodnih, odnosno nepogodnih za nastanak i razvoj konvektivnih oblaka, sustava i svih prije spomenutih popratnih pojava. Računaju se pomoću jednostavnih algoritama koji u sebi sadrže vertikalne profile atmosferskih parametara u određenom trenutku. Pritom se najčešće ne promatraju svi nivoi profila, nego se uzimaju vrijednosti atmosferskih parametara na diskretnim nivoima (obično na standardnim izobarnim nivoima) koji su reprezentativni

za prikazivanje pojedinih svojstava (npr. vlažnost zraka u prvih 2 km atmosfere) (Galway, 1956; Kurz, 1993). Iznimke su npr. već spomenuti CAPE indeks i tzv. Indeks ukupne oborive vode (engl. *Total Precipitable Water*, TPW) kod kojih se vrijednosti samih indeksa dobivaju vertikalnom integracijom stupca zraka. Promatralju se ponajprije vrijednosti temperature i vlažnosti zraka, ali to općenito mogu biti i dinamička svojstva kao što su smjer i brzina vjetra. Vertikalni profili pojedinog parametra dobivaju se iz radiosondažnih mjerjenja ili iz numeričkih modela za prognozu vremena. Unatoč velikoj točnosti i pouzdanim vrijednostima indeksa iz radiosondažnih mjerjenja, broj dostupnih profila je preriđek i u prostoru i u vremenu. Stoga se često koriste vrijednosti dobivenih iz profila numeričkog modela zbog potrebe za većom vremenskom i prostornom rezolucijom.

Vrijednosti indeksa nestabilnosti povezane su s vjerojatnošću pojave konvektivnog razvoja. Drugim riječima, moguće je odrediti tipične granične vrijednosti indeksa iznad, odnosno ispod kojih će oni predstavljati stabilnost, odnosno nestabilnost atmosfere. Te granične vrijednosti nisu fiksne nego mogu varirati ovisno o promatranoj sezoni, sinoptičkim uvjetima, geografskom položaju i klimatskim uvjetima promatranog područja. Obično je potrebno veliko iskustvo meteorologa da se postave zadovoljavajuće granične vrijednosti pojedinih indeksa.

Indeks nestabilnosti ima veći broj, a odabiru se ovisno o specifičnostima atmosfere koje najbolje prezentiraju. Kao što je već napomenuto u uvodu, u ovom radu promatrat ćemo njih četiri: K indeks, KO indeks, indeks podizanja (engl. *Lifted index*, LI) i indeks ukupne oborive vode (engl. *Total precipitable water*, TPW).

#### 1.4.1. KO indeks

Iz definicije ovog indeksa, prikazane izrazom (6), vidljivo je da on sadrži informacije o vrijednosti ekvivalentne potencijalne temperature na četiri izobarene plohe. Ako je poznato da negativni vertikalni gradijent ove veličine ukazuje na potencijalnu nestabilnost atmosfere ( $d\Theta_e/dz < 0$ ), jasno je da je ovaj indeks pokazatelj takvog stanja u atmosferi. Konkretno, indeks se računa pomoću izraza:

$$KO = 0.5 [ (\Theta_{e500} + \Theta_{e700}) - (\Theta_{e850} + \Theta_{e1000}) ] \quad (6)$$

gdje su  $\Theta_{e1000}$ ,  $\Theta_{e850}$ ,  $\Theta_{e700}$  i  $\Theta_{e500}$  ekvivalentne potencijalne temperature na izobarnim plohama 1000, 850, 700 i 500 hPa. Granična vrijednost indeksa je oko  $0^\circ\text{C}$ . Ispod te vrijednosti atmosfera postaje nestabilna i pogodna za nastanak konvekcije. Prema visinama izobarnih ploha vidljivo je da se radi o gradijentu ekvivalentne potencijalne temperature između prizemnog sloja i srednje troposfere ( $\sim 5$  km visine). Međutim, iz same definicije proizlazi i činjenica da je ovaj indeks neupotrebljiv u područjima gdje je nemoguće odrediti izobarnu plohu 1000 hPa. To se odnosi na područje povišene orografije što će se pokazati i u ovom radu.

### 1.4.2. K indeks

K indeks u sebi sadrži tri bitne informacije o konvektivnoj nestabilnosti; vertikalni temperaturni gradijent, vlažnost u nižoj troposferi i visinu vlažnog sloja. Računa se pomoću izraza:

$$K = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700}) \quad (7)$$

gdje  $T_{850}$ ,  $T_{700}$  i  $T_{500}$  redom predstavljaju 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  $^{\circ}\text{C}$ .

Nestabilnost atmosfere raste s porastom vrijednosti K indeksa, a uzima se da je granična vrijednost između stabilnosti i nestabilnosti  $20^{\circ}\text{C}$ . Okvirne vjerojatnosti za pojavu duboke, mokre konvekcije su dane u tablici 1.

**Tablica 1. Vrijednosti K indeksa i pripadne vjerojatnosti za razvoj konvekcije**

(izvor: <http://www.srh.noaa.gov/ffc/?n=gloss2> ).

$K < 15$	~ 0% vjerojatnosti
$15 < K < 20$	< 20% vjerojatnosti
$21 < K < 25$	20-40% vjerojatnosti
$26 < K < 30$	40-60% vjerojatnosti
$31 < K < 35$	60-80% vjerojatnosti
$36 < K < 40$	80-90% vjerojatnosti
$K > 40$	> 90% vjerojatnosti

### 1.4.3. LI indeks - indeks podizanja

Ovaj indeks promatra podizanje imaginarne česti zraka od površine do visine na kojoj je tlak jednak 500 hPa. Dakle, promatra se stabilnost donje polovine troposfere, a izraz za računanje indeksa dan je kao:

$$LI = T_{500} - Tp_{500} \quad (8)$$

gdje je  $T_{500}$  temperatura atmosfere na 500 hPa a  $Tp_{500}$  temperatura podignute česti. Vrijednost indeksa izražena je u  $^{\circ}\text{C}$ .

Promatrana čest sa sobom nosi informaciju o temperaturi i omjeru miješanja u graničnom sloju troposfere. Podizanjem, zbog adijabatičke ekspanzije, čest postaje hladnija te se njena temperatura na spomenutoj visini uspoređuje s temperaturom okolnog zraka. Ako je ona viša od temperature okoline, čest će se uzdizati pa se kaže da je prisutna nestabilnost, a ako je ona manja, čest će tonuti pa je stanje stabilno. U situaciji kad su one jednake prisutna je neutralna stabilnost. Iz toga je jasno da je granična vrijednost za ovaj indeks jednaka vrijednosti od  $0^{\circ}\text{C}$ , premda to ne znači da će to uvijek biti granica između stabilnosti i nestabilnosti.

#### **1.4.4. TPW indeks - indeks ukupne oborive vode**

Indeks predstavlja ukupnu količinu vodene pare u vertikalnom stupcu atmosfere. Dobiva se 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 direktna mjera nestabilnosti, ali je od velike važnosti za kratkoročnu prognozu (engl. *nowcasting*) stabilnosti atmosfere. Težinu mu daje činjenica da je količina vodene pare u atmosferi, pogotovo u njenim donjim slojevima, vrlo važan faktor nestabilnosti atmosfere i procesa nastanka i daljnog razvoja duboke mokre konvekcije.

Vrijednosti TPW indeksa u umjerenim geografskim širinama kreću se od minimalnih (i nerealnih) 0 mm, do otprilike 45 mm. U suptropskim predjelima maksimalne su vrijednosti i mnogo veće. Također, vrijednosti znatno variraju u ovisnosti o sezonskom i dnevnom hodu temperature. To je povezano s činjenicom da toplji zrak može primiti veće količine molekula vodene pare. Za TPW indeks ne postoji određena granična vrijednost iznad ili ispod koje možemo očekivati konvektivne događaje (premda je u grafičkim prikazima u ovom radu ona postavljena na 10mm). No količina vodene pare je uvijek dobra vodilja u zaključivanju o potencijalnoj nestabilnosti atmosfere.

## 2. PODACI I METODE

### 2.1. Satelitska motrenja

Satelitska mjerena spadaju u domenu daljinskih, pasivnih mjerena. To znači da se mjerena vrše na udaljenosti od predmeta promatranja i da se pri promatranju fizički ne utječe na njega. Promatraju se svojstva Zemljine površine i atmosfere, a podaci se prikupljaju uz pomoć primljenog spektra elektromagnetskog zračenja kojeg oni emitiraju. Iz primljenog zračenja, pomoću osnovnih zakona zračenja (Planckov, Rayleigh-Jeansov, Stefan-Boltzmannov, Wienov i Kirchoffov zakon) detektiraju se različita svojstva promatranog predmeta, kao što su temperatura, vlažnost, sastav, i druga.

Podaci koji će biti korišteni u ovom radu snimljeni su s Meteosat satelita druge generacije (engl. *Meteosat Second Generation*, MSG). MSG sateliti su geostacionarni sateliti kojima upravlja organizacija EUMETSAT (engl. *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*). Prvi MSG satelit lansiran je 2002. godine, a trenutačno su u Zemljinoj orbiti dva satelita pod operativnim nazivima *Meteosat-8* i *Meteosat-9*, koji se nalaze u blizini sjecišta nultog meridijana i ekvatora na visini od 36000 km. Glavni instrument na satelitu je SEVIRI (engl. *Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager*). On skenira Zemljinu površinu svakih 15 minuta (*Meteosat-9*), odnosno 5 minuta (*Meteosat-8*) u 12 spektralnih područja, odnosno kanala (Schmetz i sur. 2002). SEVIRI instrument ima slabu vertikalnu rezoluciju podataka o temperaturi i vlažnosti zraka, zbog ograničenog spektra valnih duljina. Međutim, kako indeksi nestabilnosti zahtijevaju poznavanje parametara na vrlo malom broju nivoa, on je dovoljan za generiranje istih (Peppler, 1988; Fuhrhop i sur., 2000). Popis SEVIRI kanala dan je u tablici 2.

Tablica 2. Spektralna područja SEVIRI instrumenta i njihova primjena

Broj kanala	Spektralno područje (μm)	Središnja valna duljina (μm)	PRIMJENA
1	VIS0.6	0.635	Prepoznavanje i praćenje oblaka, monitoring površine tla i aerosola. U kombinaciji s drugim kanalima može koristiti za računanju vegetacijskog indeksa
2	VIS0.8	0.81	
3	NIR1.6	1.64	Razlikovanje snijega od oblaka te vodenih od ledenih oblaka.
4	IR3.9	3.90	Prepoznavanje niskih oblaka i magle noću, procjena temperature tla i mora noću, detekcija šumskih požara.
5	WV6.2	6.25	Mjera za količinu vodene pare u srednjoj troposferi. Omogućava računanje atmosferskog vjetra i pridjeljivanje visine polutransparentnim oblacima. Dva kanala - dva različita sloja atmosfere.
6	WV7.3	7.35	
7	IR8.7	8.70	Informacija o tankim cirusima. Omoguće razlikovanje ledenih od vodenih oblaka.
8	IR9.7	9.66	Osjetljiv na koncentraciju ozona u nižoj stratosferi – praćenje ukupnog ozona i dnevnih promjena.
9	IR10.8	10.80	Termički infra-crveni kanali, tzv. "split-window" kanali. Kad se koriste zajedno to omogućuje smanjenje atmosferskih utjecaja na mjerene temperature površine tla i vrhova oblaka. Omogućuju praćenje oblaka, računanje atmosferskog vjetra, procjenu nestabilnosti.
10	IR12.0	12.00	
11	IR13.4	13.40	CO <sub>2</sub> kanal. Za procjenu nestabilnosti atmosfere, daje informaciju o temperaturi niže troposfere.
12	HRV		Širokopojasni (0.4 – 1.1 μm)

Rezolucija korištenih mjerena s *Meteosat 8* satelita je otprilike 3 km po pikselu (tj. 1 piksel  $\approx 3 \times 3$  km $^2$ ) u točki ispod satelita (König i de Coning, 2008). Rezolucija se smanjuje s povećanjem geografske širine, tako da nad Hrvatskom ona iznosi oko 4 km po pikselu. Treba napomenuti da je u grafičkom prikazu vrijednosti indeksa u točkama na geografskoj karti korištena njihova prosječna vrijednost na 3x3 piksela, što je ekvivalent površini od otprilike 12 x 12 km $^2$ . Za razliku od *Meteosat-9* satelita koji je operativni, *Meteosat-8* služi kao rezervni satelit, no istodobno radi u tzv. "rapid-scan" modu, odnosno snima zračenje sa Zemlje u razmacima od 5 minuta, ali samo za ograničeno područje Zemljinog diska (uključujući i područje interesa u ovom istraživanju). Za potrebe izračuna indeksa nestabilnosti dobivenih uz pomoć satelita koristi se 6 od 12 raspoloživih kanala; 3 termička infracrvena kanala (8.7, 10.8 i 12.0  $\mu\text{m}$ , u tablici 2), 2 infracrvena kanala u apsorpcijskim vrpcama vodene pare (6.2 i 7.3  $\mu\text{m}$ ) i jedan kanal u apsorpcijskoj vrpci CO<sub>2</sub> (13.4  $\mu\text{m}$ ).

## 2.2. Fizikalna metoda pretraživanja (engl. *Physical retrieval method, PRM*)

Postoje dvije različite metode za dobivanje atmosferskih parametara (temperatura, vlažnost zraka, itd.) uz pomoć SEVIRI podataka, odnosno MSG satelita. Jedna je tzv. 'fizikalna', a druga 'statistička' metoda (Fuhrhop i sur., 2000). Statistička metoda je bazirana na proučavanju statističke povezanosti između satelitskih mjerena i atmosferskih parametara. Te statističke poveznice sakupljaju se u 'regulacijsku bazu podataka' (engl. *training dataset*) koja je skup povjesnih, radiosondažnih i satelitskih podataka. Ta se baza nadalje koristi kao referenca za prognoziranje budućih korelacija između satelitskih podataka i odgovarajućih atmosferskih parametara, odnosno za dijagnozu nestabilnih stanja. Takva je metoda brža za prognoziranje, no obično daje slabije rezultate i ima jaku ovisnost o spomenutoj bazi podataka, te se kao takva u ovom radu neće koristiti.

PRM metodom nastoje se pronaći vertikalni profili temperature i vlažnosti, uz pomoć satelitskih mjerena radijacije Zemlje i njene atmosfere, a korištenjem tih profila dobiti traženi indeksi nestabilnosti. U tu svrhu koristi se tzv. 'inverzijska tehnika' (engl. *inversion technique*) pomoću koje se pokušavaju pronaći vertikalni profili temperature i vlažnosti zraka koji najbolje simuliraju zračenje snimljeno na vrhu atmosfere, odnosno satelitsku sliku (Rodgers, 1976). Postoji mnogo kombinacija vertikalnih profila temperature i vlage koji bi mogli dati istu radijacijsku sliku. Da bi se između više mogućih rješenja dobilo pravo, koristi se iteracijska shema. Ona se provodi tako da se najprije odredi početni pozadinski profil (engl. *first guess*), u našem slučaju iz 6-satne prognoze numeričkog modela Europskog centra za srednjoročne prognoze vremena (engl. *ECMWF*). Zatim se iz koraka u korak profil postupno modificira da bi se dobila radijacijska slika koja odgovara satelitskoj. Iteracijska shema se obično zaustavlja u onom koraku u kojem je srednje kvadratno odstupanje tzv. radijacijske temperature (engl. *brightness temperature*, T<sub>B</sub>) u 6 satelitskih kanala manje od 1,5 K (König i de Coning, 2008). Granična vrijednost odstupanja od 1,5 K nije fiksna nego se određuje prema potrebi i iskustvu. Također, maksimalan broj iteracijskih koraka je proizvoljan i poželjno je da bude što veći. No, obično je taj broj limitiran raspoloživim računalnim potencijalima, ali i samim smislim provođenja mnogo iteracija. U slučaju metode primjenjene u ovom radu broj iteracija limitiran je na pet uzastopnih koraka.

Kako bi se iz podataka o vrijednostima temperature i vlažnosti zraka na više izobarnih nivoa dobilo zračenje, odnosno radijacijska temperatura u na vrhu atmosfere, koristi se RTTOV model. RTTOV je model prijenosa zračenja koji simulira zračenje mjereno instrumentima na satelitu. Za zadane profile temperature i vlažnosti zraka uz informaciju o kutu zenita satelita, temperaturi i tlaku pri tlu te emisivnosti površine, RTTOV model računa zračenje na vrhu atmosfere u svakom od odabranih spektralnih područja (Eyre, 1991; Saunders i sur., 1999). Originalna satelitska mjerena moraju biti korigirana u svrhu anuliranja moguće sistemske razlike između njih i radijacijskog modela.

Općenito, fizikalna metoda matematički se opisuje pomoću standardne jednadžbe pretraživanja (engl. *standard retrieval equation*) (Ma i sur. 1999; Rodgers, 1976);

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_0 + (\mathbf{S}_x^{-1} + \mathbf{K}_n^T \mathbf{S}_\varepsilon \mathbf{K}_n)^{-1} \times \mathbf{K}_n^T \mathbf{S}_\varepsilon^{-1} [ \mathbf{K}_n^T \mathbf{S}_\varepsilon^{-1} (\mathbf{T}_B - \mathbf{T}_{B,n} + \mathbf{K}_n (\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_0)) ] \quad (9)$$

gdje je:

$\mathbf{x}$  - vektor s vrijednostima temperature i vlažnosti zraka iz vertikalnog profila

n - broj koraka iteracije

$T_B$  - promatrana radijacijska temperatura

$T_{B,n}$  - simulirana radijacijska temperatura za vertikalni profil u n-tom koraku iteracije

$\mathbf{S}_x$  - matrica korelacije *first guess* pogreške na dva nivoa (za pojedini parametar)

$\mathbf{K}_n$  - matrica težinske funkcije (promjena radijacijskog polja s promjenom atmosferskog profila)

$\mathbf{S}_\varepsilon$  - kovarijanca pogrešaka promatrane radijacijske temperature i radijacijskog modela

Vektor  $\mathbf{x}_n$  sadrži u sebi vrijednosti temperature i vlažnosti na  $k$  izobarnih ploha. Dodatna veličina je temperatura na Zemljinoj površini. Stoga je dimenzija ovog vektora jednaka  $2k+1$ . RTTOV radijacijski model ima maksimalno 43 nivoa (König, 2002), odnosno 43 vrijednosti temperature i vlažnosti zraka te temperaturu na Zemljinoj površini. Stoga vektor  $\mathbf{x}_n$  sadrži u sebi ukupno 87 podataka. Za nulti korak ( $n=0$ ) ove sheme postoji početni vektor  $\mathbf{x}_0$  koji zapravo predstavlja *first guess*, odnosno izlazne vrijednosti korištenog numeričkog modela. Pogreška šuma SEVIRI instrumenta u svih 6 spektralnih kanala sadržana je u matrici  $\mathbf{S}_\varepsilon$ , zajedno s nesigurnošću radijacijskog modela. Matrica  $\mathbf{K}_n$  generira se unutar RTTOV modela. Zbog potrebnog matematičkog opsega za širi opis preostalih vektora i matrica u izrazu (9) nećemo ulaziti u daljnju analizu svakog od njih (opsežnije u König, 2002).

Treba napomenuti da je nedostatak ovakve metode taj što rezultati u velikoj mjeri ovise o početnom pozadinskom profilu (*first guess-u*), odnosno profilu iz numeričkog modela, kao i to da postoji tendencija zadržavanja vrijednosti početnog profila (König, 2002). To znači da u nekim točkama *first guess* profil već ima vrijednosti parametara slične onima iz satelitskih opažanja (u okvirima tolerancije modela) pa se korekcija niti ne obavlja. S druge strane, model jako dobro alternira vrijednosti površinske temperature i profil vodene pare, osobito u nižim slojevima. Ako model ne zadržava vrijednosti *first guess-a* onda se to najviše odražava na modifikaciji ekstremnih vrijednosti i lokalnih gradijenata (König i de Coning, 2008). Također, postoje područja unutar domene u kojima fizikalna metoda ne konvergira rješenju unutar zadanog maksimalnog broja iteracijskih koraka (König, 2002). To su najčešće područja u kojima je prisutan nekakav oblik naoblake. Posljedica toga je da se željeni indeksi nestabilnosti mogu generirati samo

u područjima bez oblaka. Modelu se stoga dodaje maska oblaka, odnosno informacija o prekrivenosti dijelova domene oblacima. Pikseli koji su djelomično prekriveni oblacima, ovisno o stupnju prekrivenosti, ili ne konvergiraju rješenju ili pokazuju preveliku vlažnost zraka. Također, jedan od nedostataka je i taj da je potrebno računsko vrijeme kod fizikalne metode nešto dulje nego kod statističke.

### 2.3. Podaci i metode verifikacije

Za potrebe verifikacije u ovom radu korištene su četiri vrste podataka, dobivenih iz četiri različita izvora. Iz tih su podataka izvedene tri metode verifikacije koje zajedno daju opću ocjenu kvalitete i smislenosti operativne upotrebljivosti indeksa nestabilnosti izvedenih iz satelitskih mjerjenja. Prvi i najvažniji su podaci o vrijednostima četiriju indeksa nestabilnosti, opisanih u poglavlju 1.4. Podaci, dobiveni fizikalnom metodom opisanom u poglavlju 2.2, pribavljeni su iz EUMETSAT-ove baze podataka MPEF-a (od engl. *Meteorological Products Extraction Facility*). Podaci su dostupni u BUFR formatu (od engl. *Binary Universal Form for the Representation of meteorological data*) koji je službeni format Svjetske meteorološke organizacije. BUFR je binarni podatkovni format koji se koristi za pohranjivanje i distribuciju (uglavnom meteoroloških) podataka, a najvažnija mu je značajka da je samoopisan (engl. *self-descriptive*). To znači da u sebi sadrži sirove vrijednosti promatranih fizikalnih veličina kao i prateći opis tih vrijednosti (naziv, fizikalne jedinice, decimalna mjesta, kompresiju podataka, broj korištenih bitova, itd.). Sama datoteka se sastoji od šest pojedinačnih poglavlja, numeriranih od 0 do 5, koja sadrže sve spomenute informacije (prema <http://www.wmo.int/pages/prog/www/WDM/Guides/Guide-binary-1A.html#Chapter2>). Kad su u pitanju indeksi nestabilnosti, svakih 5 minuta dostupna je jedna BUFR datoteka koja u sebi sadrži vrijednosti sva četiri indeksa na mreži koja odgovara rezoluciji i vidnom polju *Meteosat-8* satelita. Iz tih datoteka su u ovom radu, pomoću fortranskog programa, izdvajene četiri nove datoteke od kojih svaka sadrži vrijednosti jednog od promatranih indeksa u *ASCII* formatu (za isti termin i u istim točkama mreže). Taj format je odabran radi lakše vizualizacije podatka.

#### 2.3.1. Verifikacija s obzirom na satelitske podatke

Druga vrsta podataka koji se koriste u verifikaciji su satelitske slike oblaka koje su u arhivi Državnog hidrometeorološkog zavoda pohranjene u HDF5 formatu. Ovaj format je također jedan od formata koji se koristi za spremanje velikih i kompleksnih podataka. Slike su izvorno dobivene pomoću *Meteosat-9* satelita, korištenjem infracrvenog kanala  $10.8 \mu\text{m}$  za dobivanje slike oblaka. Vremenska rezolucija satelitskih slika je 15 minuta.

Satelitske slike i polja vrijednosti indeksa nestabilnosti vizualizirani su paralelno za pojedine dane u razmacima od 15 minuta (ograničeno vremenskom rezolucijom satelitskih slika). Prostorna domena je sužena sa cijelog vidljivog Zemljinog diska na promatrano šire područje Hrvatske, omeđeno geografskim širinama  $41,45^\circ\text{N}$  i  $49,20^\circ\text{N}$ , te geografskim dužinama  $9,00^\circ\text{E}$  i  $21,10^\circ\text{E}$ . Vizualizacija je izvedena pomoću programa GrADS (engl. *The Grid Analysis and Display System*), koji je originalno osmišljen radi lakše manipulacije i vizualizacije geo-znanstvenih podataka (prema: <http://www.iges.org/grads/>). Ideja

je bila da se preko odgovarajuće satelitske slike u kanalu 10.8 µm (maska oblaka) crtaju vrijednosti indeksa nestabilnosti, tako da su vrijednostima indeksa pridružene odgovarajuće boje. Na taj način se dobila intuitivnija slika područja nestabilnosti kao i područja očekivanog razvoja konvektivne naoblake (primjer na slici 5).

Prva metoda verifikacije je vizualna usporedba raspodjele i intenziteta indeksa nestabilnosti i razvoja konvektivnih oblaka. Ovaj način verifikacije ujedno je vrlo koristan za dobivanje određenog ‘osjećaja’ za vremensku i prostornu raspodjelu indeksa nestabilnosti i njihove povezanosti s pojmom konvektivnog razvoja. Također, praćenjem promjena na uzastopnim slikama moguće je uočiti i prisutnost advekcije zračnih masa unutar domene, bez analize podataka o brzinama i smjerovima vjetra. Iz toga se mogu donijeti i stanoviti zaključci o početnim impulsima potrebnim za ‘okidanje’ konvekcije kao i o advekciji nestabilnog zraka u stabilna područja. Pri izradi rada, na ovakav vizualan način, promotreno je 50-ak situacija s razvojem konvektivne naoblake. Od svih analiziranih situacija odabранo je 5 najprezentativnijih za koje su satelitski indeksi nestabilnosti dodatno verificirani s obzirom na radiosondažne podatke i podatke o munjama.

Usporedbom indeksa nestabilnosti sa satelitskim slikama mogla se subjektivno promotriti uzročno-posljedična veza indeksa nestabilnosti i razvoja konvekcije, no to nije sasvim pouzdani način za dobivanje opljivih dokaza o korelaciji nestabilnosti i konvektivnih procesa. Iz tog razloga poseglo se i za drugim metodama verifikacije.

### 2.3.2. Verifikacija s obzirom na podatke o munjama

Munje ili električna pražnjenja su najčešće prateće pojave razvoja duboke mokre konvekcije (Avila i sur., 2010). Do njih dolazi pri razdvajaju pozitivnih i negativnih nosioca naboja uslijed snažnih turbulentnih, pretežno vertikalnih gibanja u tipičnom konvektivnom oblaku. Nosioci naboja mogu biti jezgre kondenzacije i sublimacije, kapi kiše, ledene čestice i snježni kristali. Kada se oni razdvoje, lokalno predstavljaju pozitivne ili negativne stanice ovisno o prevladavajućem naboju. Između njih s vremenom raste vrijednost električnog polja koje, nakon što premaši kritičnu vrijednost ( $> 1 \text{ MV/m}$ ), prisiljava naboje na gibanje pri čemu dolazi do iskrenja, odnosno munje. Prilikom iskrenja dolazi do akustične manifestacije (poznate pod nazivom grmljavina) i stvaranja elektromagnetskog polja vidljivog spektra (sijevanje) kao i onog nešto većih valnih duljina (radio-valovi). Upravo ti radio-valovi koriste se za detekciju munja unutar mjernih postaja europskog sustava za lociranje munja (skraćeno LINET) čiji su podaci korišteni u ovom radu (Betz i sur., 2007, 2009; Franc, 2008, Uglešić i sur., 2009).

Podaci o munjama dobiveni su dakle iz LINET mreže mjerjenja atmosferskih pražnjenja koja se sastoji od stotinjak senzora na velikom dijelu Europe, uključujući i Hrvatsku. Iako je u Hrvatskoj smješteno 6 senzora, od kojih jedan u blizini Zagreba te njih 5 na obalom dijelu (u blizini Rijeke, Zadra, Splita, Korčule i Dubrovnika) neka područja, kao npr. Slavonija, pokrivena su senzorima iz susjednih zemalja (Mađarska, Bosna i Hercegovina, Srbija i Italija). Svaki senzor ima radijus djelovanja od otprilike 100 km, unutar kojeg je u stanju optimalno detektirati broj munja, njihovu raspodjelu u prostoru i vremenu, amplitudu i predzname. Detekcija lokacije električnog pražnjenja izvodi se s točnošću od  $\pm 100 \text{ m}$  (Betz

i sur., 2009). Osjetljivost instrumenata za detekciju se postepeno smanjuju s udaljenošću (do  $\pm$  300 m nad Jadranom, Franc, osobna komunikacija) ukoliko se radijus djelovanja poveća do 300 km. Dostupni podaci o munjama pokrivali su područje od 10°E do 25°E, te od 35°N do 66°N, pokrivajući u potpunosti promatranu domenu izračunatih indeksa nestabilnosti.

Postoji vrlo dobra korelacija između mjesta i vremena pojave konvektivnih procesa i munja, kao i korelacija između intenziteta takvih procesa i broja, amplituda i visine munja. Stoga možemo zaključiti da su munje tzv. 'tragač' (engl. *tracer*) i pokazatelj opsega konvektivnih procesa. U skladu s tim, vrijednosti satelitskih indeksa nestabilnosti uspoređivane su sa parametrima vezanim uz munje, kao jedna od metoda njihove verifikacije.

Verifikacija se temelji na usporedbi jutarnjih vrijednosti indeksa nestabilnosti s razvojem konvektivne naoblake u kasnijem vremenskom razdoblju, detektirane brojem i parametrima munja. Svaki od četiri indeksa je promatran u jutarnjem periodu 05:00 – 09:00 UTC (06:00 – 10:00 CET) za vrijeme zimskog računanja vremena i 04:00 - 08:00 UTC (06:00 - 10:00 CEST) za ljetno razdoblje. U jutarnjim satima manje je vjerojatna prisutnost konvektivne naoblake, stoga je veće područje bez naoblake u kojem je moguće generirati indekse. Također je smisleno prognozirati konvekciju 6 do 9 sati unaprijed (König, 2008). Konvekcija se u pravilu javlja u popodnevnim satima pa je jutarnji period pogodan za promatranje stabilnosti atmosfere i njenog utjecaja na kasnije procese u njoj. Indeksi su vremenski usrednjeni u promatranom jutarnjem periodu za svaki piksel domene. Te vrijednosti su vizualizirane kao polje jutarnje nestabilnosti ('karta nestabilnosti'). Paralelno s time su točkicama označavana mjesta na kojima je došlo do pojave munja tijekom 10 popodnevnih sati (08:00 - 18:00 UTC ljeti, odnosno 09:00 – 19:00 CET za zimsko računanje vremena), što je rezultiralo 'kartom munja'. Vizualnom usporedbom tih dviju karata može se subjektivno detektirati korelacija između vrijednosti indeksa nestabilnosti i pojave munja, odnosno duboke mokre konvekcije. Isto tako su se intenziteti osrednjениh indeksa mogli uspoređivati s intenzitetima i amplitudama električnih pražnjenja, koji su objektivniji pokazatelj razmjera i intenziteta konvektivnih sustava. Vremena pojave konvekcije su promatrana na grafu ovisnosti broja munja o vremenu pojave.

### 2.3.3. Verifikacija s obzirom na radiosondažne podatke

Četvrtu skupinu podataka čine radiosondažni podaci dobiveni s internetske baze podataka Wyoming sveučilišta (vidi <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Preuzeti podaci su vrijednosti K, Li i TPW indeksa izračunati iz radiosondažnih mjerena temperature i vlažnosti zraka. Za promatrane datume korištene su radiosondaže u terminu 00:00 UTC i to za 10 odabranih postaja koje se nalaze unutar promatранe domene. Popis postaja, zajedno s njihovim identifikacijskim oznakama i geografskim koordinatama dan je u tablici 3.

*Tablica 3. Popis i specifikacije radiosondažnih postaja korištenih u verifikaciji*

Lokacija postaje	Oznaka postaje	Geo. širina	Geo. dužina
Muenchen	10868	48,24 °N	11,55 °E
Wien	11035	48,25 °N	16,36 °E
Poprad-Ganovce	11952	49,03 °N	20,31 °E
Milano	16080	4,43 °N	9,28 °E
Udine	16044	46,03 °N	13,18 °E
Zagreb	14240	45,81 °N	16,03 °E
Budapest	12843	47,43 °N	19,18 °E
St Pietro Capofiume	16144	44,65 °N	11,61 °E
Zadar	14430	44,10 °N	15,35 °E
Beograd	13275	44,76 °N	20,41 °E

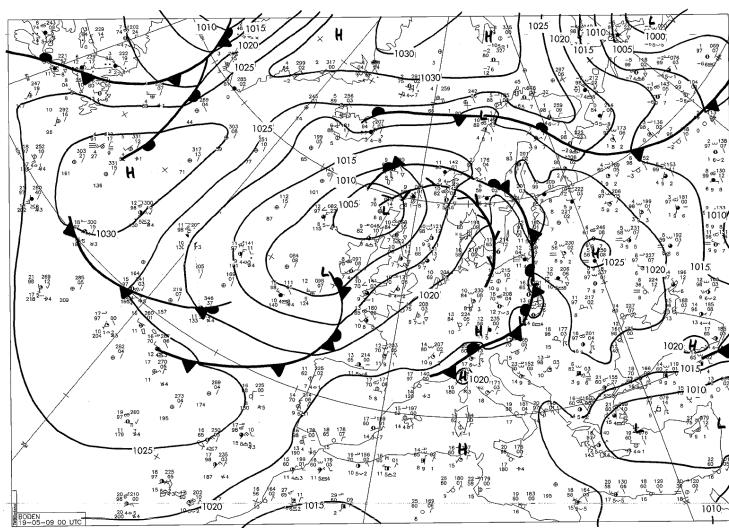
Želja je bila indekse dobivene iz radiosondažnih podataka usporediti sa satelitskim indeksima. Vrijednosti satelitskih indeksa uzete su u točkama koje se nalaze u najbliže radiosondažnim postajama. Usporedba je bila moguća za sve indekse osim KO indeksa zbog njegove slabe prostorne raspodjele (kao što je objašnjeno u 1.4.1). Radiosondažni indeksi, zbog svoje vjerodostojnosti u prikazivanju realnog stanja atmosfere, u ovom su slučaju uzeti kao referentni, tj. kao točne vrijednosti. Razlike vrijednosti dvaju različito generiranih indeksa su stoga pokazatelj točnosti izračuna satelitskih indeksa i mjera pouzdanosti indeksa u okolini određene postaje. Kako je riječ o broju od 10 postaja uspjela se izvesti i stanovita statistika razlike indeksa za svaki datum. Time su se mogli izvesti objektivniji zaključci ponajprije o pouzdanosti PRM metode.

### 3. REZULTATI VERIFIKACIJE

Situacije za detaljnu analizu izabrane su između 50 promotrenih slučajeva na temelju sinoptičke situacije, dostupnosti i kvalitete svih podataka kao i na temelju subjektivne procjene pogodnosti da se indeksi nestabilnosti verificiraju. Ovdje je bio fokus na nekoliko specifičnih slučajeva (engl. *case study*) koji su zanimljivi u pogledu konvekcije. Općenito se željelo promatrati termine u toplom dijelu godine kad je učestalost konvektivnog razvoja u 'čistom zraku' veća, i to za par različitih mjeseci. Nedavno rađena statistika učestalih tipova vremena i dominantnih režima strujanja (Mikuš, 2010) pokazala je da su najčešći tipovi vremena u danima s konvekcijom nad Hrvatskom: bezgradijentno polja tlaka zraka, ciklona i prednja strana doline. Takvi tipovi vremena praćeni su najčešće jugozapadnim strujanjem koje donosi topao i dovoljno vlažan zrak sa Sredozemlja, odnosno sjeveroistočnim ili sjeverozapadnim strujanjem koji advektiraju hladniji zrak sa sjevernog dijela europskog kontinenta. Obrađena je i jedna zimska situacija kako bi se dao primjer ponašanja indeksa i u hladnom dijelu godine.

Za pojedini slučaj najprije se prikazuje pripadajuća sinoptička situacija, a zatim se vrši analiza satelitskih indeksa nestabilnosti s obzirom na njihov vremenski razvoj (u tri različita termina; jutarnje vrijednosti indeksa, početak konvekcije i puni razvoj konvekcije). Također se radi usporedba usrednjениh vrijednosti indeksa s raspodjelom munja, njihovim amplitudama i intenzitetima. Konačno, objektivna je verifikacija napravljena uz pomoć radiosondažnih mjerena.

#### 3.1. Primjer A: 19. svibnja 2009.

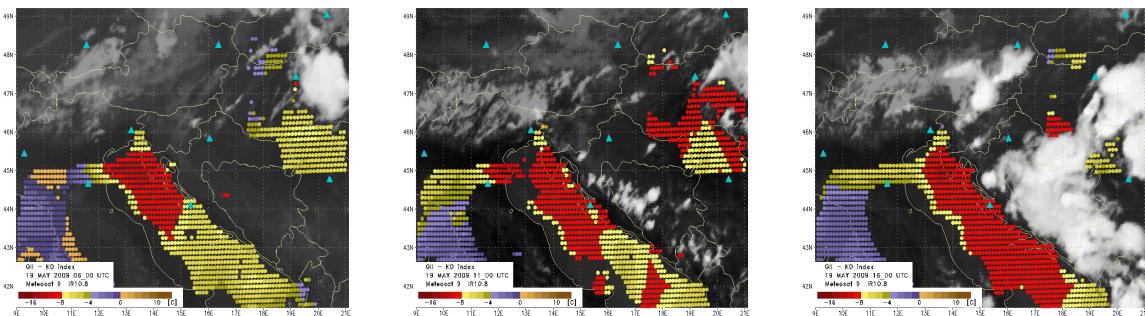


**Slika 4.** Sinoptička situacija 19. svibnja 2009. u 00:00 UTC (izvor: *Europäischer Wetterbericht, Deutscher Wetterdienst*).

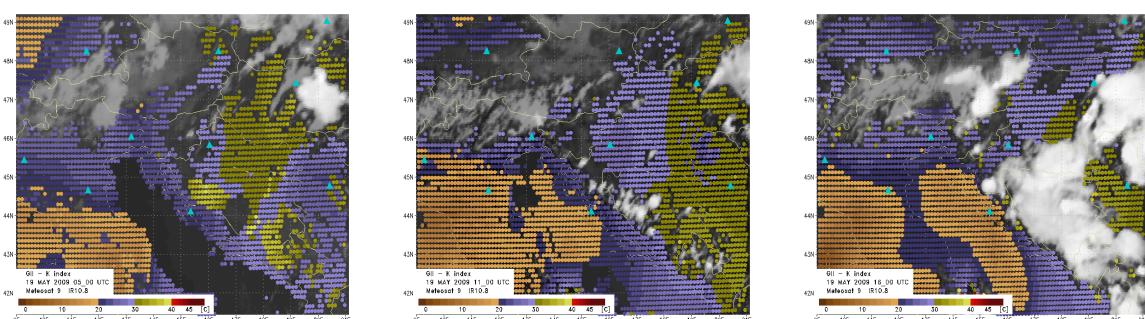
Sinoptička situacija 19. svibnja 2009. (slika 4) na području naše domene obilježena je bezgradijentnim poljem malo povиšenog tlaka zraka. Stanje je to u kojem očekujemo suhu i stabilnu situaciju, odnosno 'čisti zrak' pogodan za naša razmatranja. Takvu sliku remeti samo premeštanje linije nestabilnosti na

sjeverozapadnom području domene. Po visini je bio izražen termobarički greben praćen visinskim jugozapadnim strujanjem iznad Alpa. Iznad Jadrana i Apenina dolazi do zakretanja jugozapadnog strujanja prema jugoistoku.

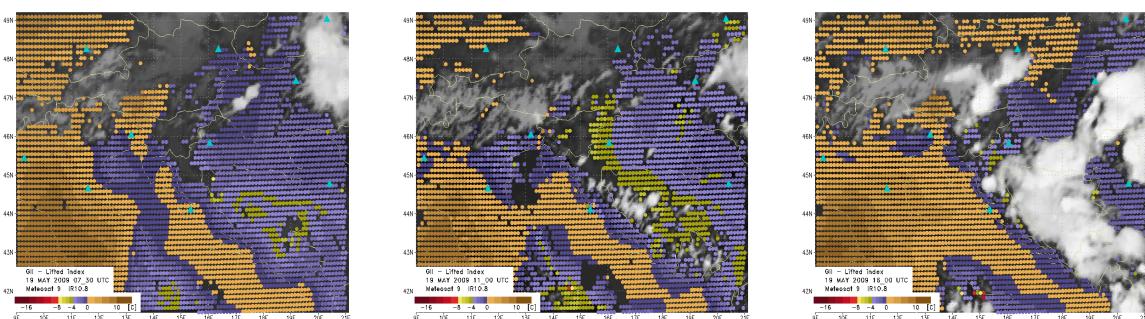
a)



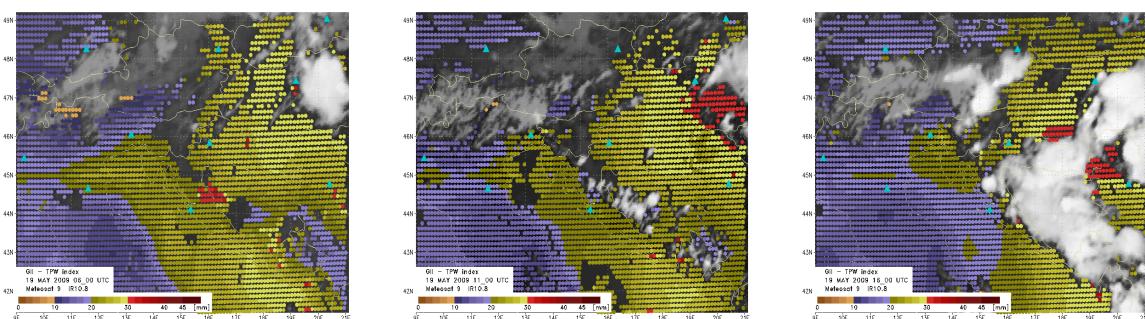
b)



c)



d)



**Slika 5.** Raspodjela KO (a), K (b), LI (c) i TPW (d) indeksa u 3 različita termina: ujutro (lijevo, od 05:00 do 07:30 UTC), sredinom dana (sredina, 11:00 UTC) i poslijepodne (desno, 16:00 UTC) tijekom 19. svibnja 2009. Plavim trokuticima označeni su položaji promatranih radiosondažnih postaja. Za prikaz svih indeksa nestabilnosti u jutarnjim satima koriste se najreprezentativniji termini.

Na slici 5 moguće je promotriti prostornu i vremensku raspodjelu satelitskih indeksa nestabilnosti za odabrani slučaj, kao i naoblaku na satelitskim slikama. Najprije pogledajmo polja KO indeksa, slika 5a. Na gornjim prikazima vidljivo je već prije spomenuto svojstvo, odnosno nedostatak tog indeksa. Naime, KO indeks generiran je samo na topografski nižim područjima (sliv rijeke Po, morske površine i panonski dijelovi Hrvatske, Mađarske i Srbije). Isto tako, vrijednosti indeksa su poprilično nesuvise s obzirom na razvoj konvekcije u ovom, kao i u drugim promatranim terminima. Iz toga razloga u daljnjoj analizi taj indeks neće biti razmatran.

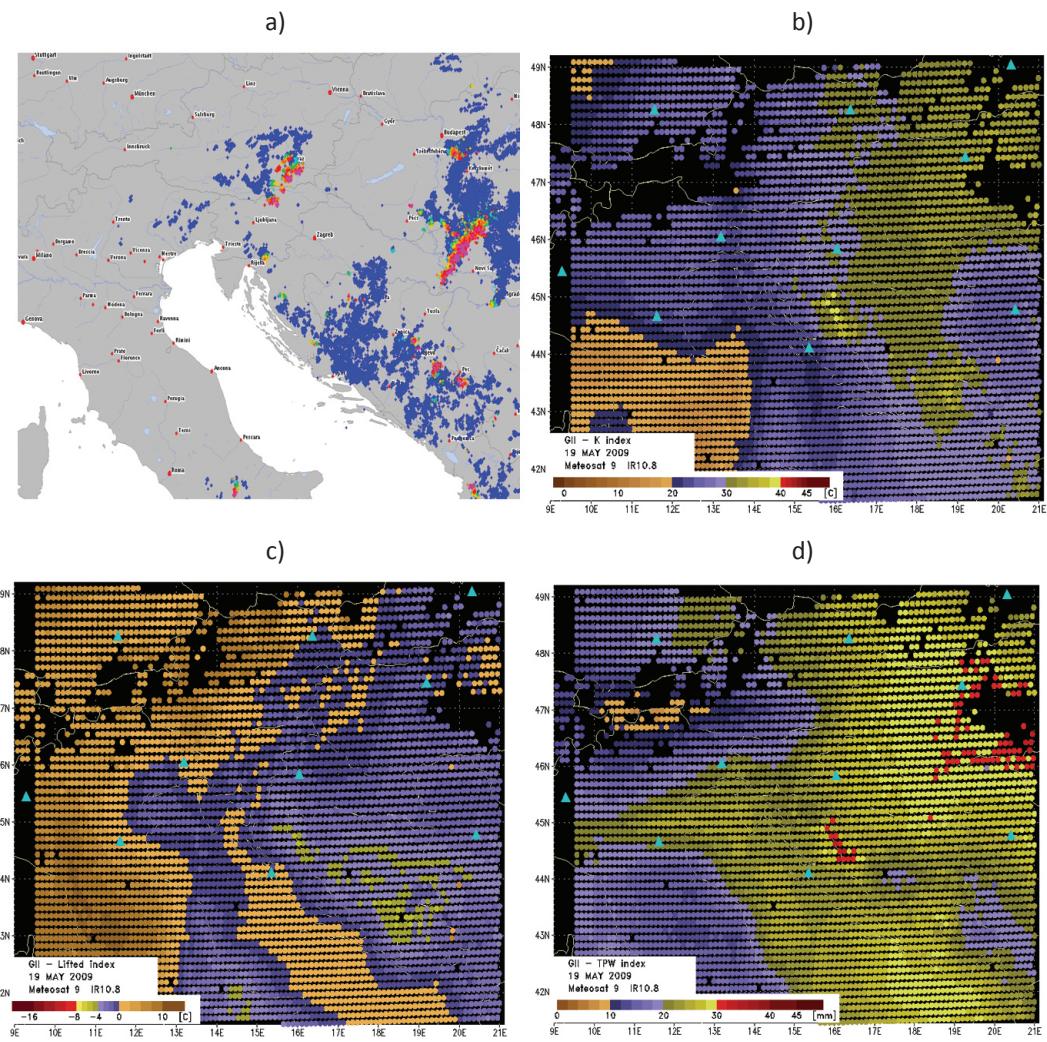
Preostala tri indeksa (K, LI, TPW) su pokazala dobra svojstva u prikazu nestabilnosti. Vidljivo je da se konvekcija razvila na području zapadne granice Bosne i Hercegovine, na širem graničnom području Mađarske i Srbije, kao i na dijelu južne Austrije. Na tim područjima svi indeksi pokazali su povećanu nestabilnost, u većoj ili manjoj mjeri. Za razliku od K i TPW indeksa, LI indeks je pokazao znatniju nestabilnost samo u zapadnjim dijelovima Bosne i Hercegovine.

Ako se promotri definicija LI indeksa moguće je zaključiti da je granična vrijednost od  $0^{\circ}\text{C}$  fizikalno jedina smislena, stoga ne nebi trebala biti mijenjana. Objasnjenje za gore spomenuto pretjerano ukazivanje na nestabilnosti treba stoga potražiti u sistematskoj pogrešci. Naime, u definiciji LI indeksa koristi se čest podignuta s površine Zemlje. Pod pojmom površine Zemlje model smatra prosječna svojstva atmosfere u prvih 100hPa visine. Kako je prije napomenuto, model najviše od svih korigira vrijednosti vlažnosti zraka i površinske temperature dobivene iz kratkoročne prognoze. Kako bi se proširio utjecaj promjene površinske temperature na sve ostale vrijednosti temperatura vertikalnih nivoa unutar prvih 100 hPa (koje se dovoljno ili nimalo ne mijenjaju), u EUMETSAT-ov model su im dodalne određene težine. Težinski faktori su dakle pod utjecajem površinske temperature, što je fizikalno smisleno ako znamo da postoji određena pozitivna korelacija između temperatura u bliskim slojevima atmosfere. Uočena pogreška nastaje iz razloga što su spomenute težine općenito pretjerano zadane te u konačnici daju preniske vrijednosti LI indeksa (*Dr. M. König, osobna komunikacija*).

Termini za prikaz jutarnjih polja indeksa nestabilnosti odabrani su tako da indeksi u tim vremenima najbolje prikazuju nestabilna područja na kojima će kasnije doći do razvoja konvekcije. Vremenski period između indikacije nestabilnosti i pojave konvekcije je kod svih indeksa pet sati, dok je do punog razvoja konvekcije došlo nakon desetak sati. Moguće je primijetiti da su se indeksi, do trenutka kada je započela konvekcija, intenzivirali te se u tom trenutku moglo bolje prognozirati nestabilnost i vjerojatnost za daljnji razvoj konvekcije u večernjim satima. Ta činjenica bi mogla ukazivati na potrebu i opravdanost praćenja indeksa tijekom cijelog dana, a ne samo u jutarnjim satima.

U promatranom primjeru sjeverozapadna područja domene još su od jutarnjih sati bila prekrivena niskim i srednjim oblacima, stoga nepogodna za prognoziranje. Indeksi su pokazali i dobru indikaciju stabilnih područja na jugozapadnom dijelu promatrane domene, s intenzitetima uglavnom ispod graničnih vrijednosti za pojedini indeks.

Sljedeća slika 6 prikazuje usporedbu usrednjih vrijednosti indeksa u razdoblju od 04:00 UTC do 08:00 UTC i pojave munja od 08:00 UTC do 18:00 UTC. Boja točkica koje označavaju pojavu munje je ovisna o vremenu pojavljivanja unutar posljednjih sat vremena promatranja. Za vrijeme prije posljednjih sat vremena sve točkice su iste plave boje.

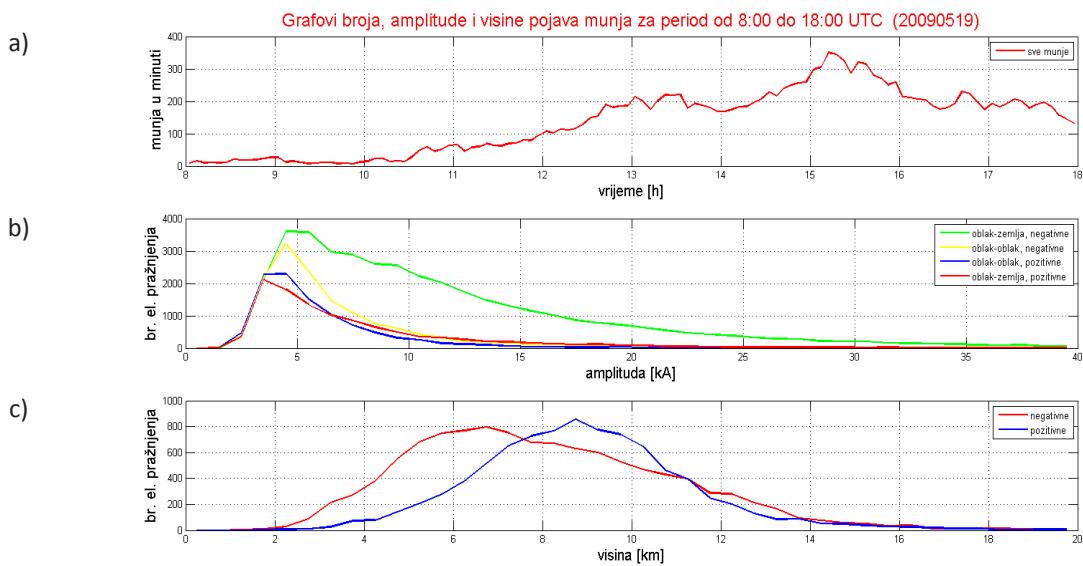


**Slika 6.** Raspodjela munja (a) u razdoblju 08:00 - 18:00 UTC i prostorna raspodjela vremenski usrednjениh vrijednosti K (b), LI (c) i TPW (d) indeksa između 04:00 UTC i 08:00 UTC za 19. svibnja 2009.

Promatrajući usrednjene indekse zornje se vide mesta na kojima je svaki od indeksa indicirao nestabilnost. Također su uočljiva i područja maksimuma svakog indeksa koja istovremeno pokazuju najveću nestabilnost na uskom području sjeverozapadnog dijela BiH. Naslici 6a, u području sjeveroistočne Italije i južne Austrije, moguće je vidjeti da je došlo do pojave malo manjeg broja električnih pražnjenja. Na nestabilnost u tom području ukazuje najviše K indeks (slika 6b), dok se iz ostala dva indeksa razvoj konvekcije na tom području ne bi mogao prognozirati. To se posebno odnosi na TPW indeks koji na bliskom području ima lokalni minimum (slika 6d). Podaci o munjama pokazali su konvektivnu aktivnost i jugoistočno od Rima, na što bolje ukazuje LI indeks (s pomakom prema istoku), te lošije i K indeks. Treba primjetiti da su svi indeksi imali vrijednosti veće od granične na puno širem području od onog gdje je zapravo i došlo do razvoja konvekcije, što bi moglo upućivati na to da su granične vrijednosti pogrešno postavljene. Okvirna korekcija graničnih vrijednosti bi za K indeks bila +10°C, za LI indeks -4°C i za TPW indeks i do +20 mm oborive vode. Treba napomenuti da je korekcija za TPW indeks procjenjena relativno na prikaz indeksa u bojama, gdje je pretpostavljeno da smeđa područja predstavljaju stabilnu

atmosferu (vrijednosti TPW indeksa ispod 10 mm). Ukupni broj od 81 890 svih detektiranih električnih pražnjenja u promatranom razdoblju ukazuje na to da je konvektivna aktivnost tijekom toga dana bila vrlo intenzivna (najintenzivnija u usporedbi s ostalim promatranim slučajevima).

Zanimljivo je primjetiti i to da u području Alpa, koje pripada širem području zapadne Austrije, nema generiranih vrijednosti K indeksa. Naime, za izračun ovog indeksa koriste se vrijednosti na izobarnoj plohi 850 hPa koja tom području nije raspoloživa zbog visine terena. Također, vidljiv je i pomak detektiranih munja prema sjeveroistoku u odnosu na mjesto na kojem su indeksi ukazivali na nestabilnost. Uzrok tome je spomenuta prevladavajuća advekcija zračnih masa u istom tom smjeru.

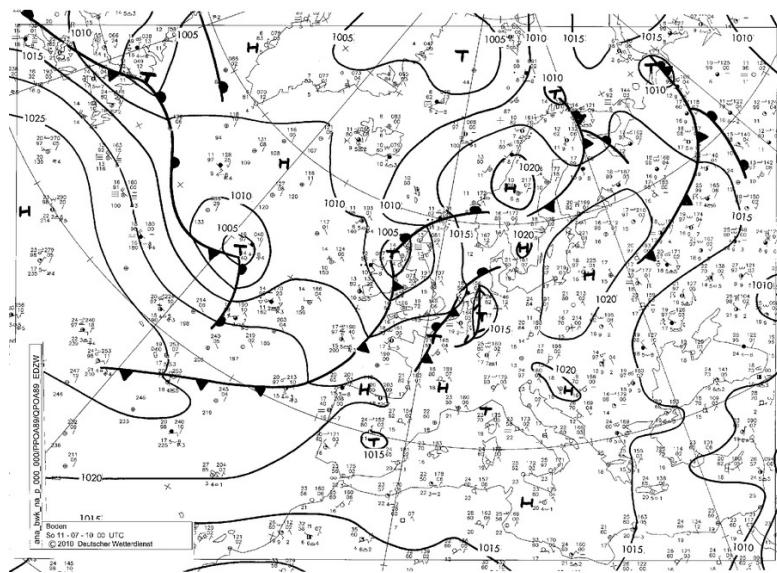


**Slika 7.** Karakteristike električnih pražnjenja za 19. svibnja 2009. broj munja (a), amplitude za pojedine tipove električnih pražnjenja (b), visina na kojoj je zabilježeno električno pražnjenje (c).

Iz grafova na slici 7 moguće je vidjeti karakteristike munja na promatranom području u odabranom danu. Za pokazatelje intenziteta konvektivnih oblaka uzete su amplitude i visine električnih pražnjenja. Kako se u ovom radu ne analiziraju svojstva konvektivnih sistema ti grafovi služe samo kao okvirni pokazatelj jačine konvekcije. Vremena pojavljivanja munja su u ovom slučaju pokazala da je maksimum razvoja konvekcije bio između 15:00 i 16:00 UTC. To znači da indeksi prognoziraju nestabilnost do 8 i više sati unaprijed. Maksimumi amplituda pozitivnih električnih pražnjenja (<5 kA) su manji od maksimuma amplituda negativnih električnog pražnjenja ( $\geq 5$  kA). Takav odnos amplituda je u suprotnosti s onime što su uočili Rivas Soriano i sur. (2005) nad Iberijskim poluotokom. Autori smatraju da unatoč većoj osjetljivosti instrumenta na pozitivno pražnjenje, ona su u prosjeku rjeđa ali i obično mnogo destruktivnija zbog većeg intenziteta. Zanimljivo je i to što se negativna električna pražnjenja dominantno događaju na manjim visinama vezano uz početnu fazu razvoja konvekcije. Dublji vertikalni razvoj oblaka praćen je većim brojem pozitivnih električnih pražnjenja. Takva visinska raspodjela u skladu je s hipotezom da tipovi pražnjenja ovise o volumenu oblaka (Rivas Soriano i sur., 2005).

### 3.2. Primjer B: 11. srpnja 2010.

Sinoptička situacija, na slici 8, na promatranoj domeni slična je onoj u prethodno promatranom terminu, u poglavlju 3.1. I ovdje je veći dio Europe bio pod utjecajem bezgradijentnog polja malo povišenog tlaka zraka. Po visini je u jugozapadnoj visinskoj struji pritjecao vrlo topao zrak. Uz vrlo slabu naoblaku situacija je bila pogodna za vrlo toplo i vruće vrijeme, a samim time i za razvoj termički uvjetovane konvekcije. Nje bilo znatnije advekcijske zračne masa tijekom cijelog dana.

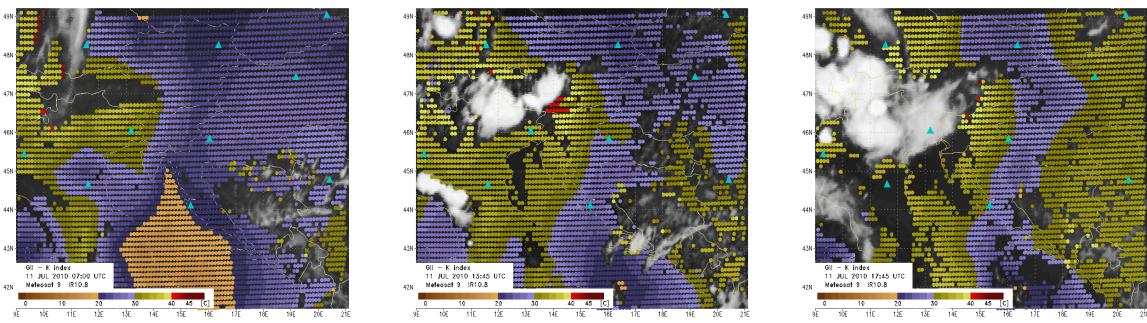


**Slika 8.** Sinoptička situacija 11. srpnja 2010. u 00:00 UTC (izvor: Europaïscher Wetterbericht, Deutscher Wetterdienst).

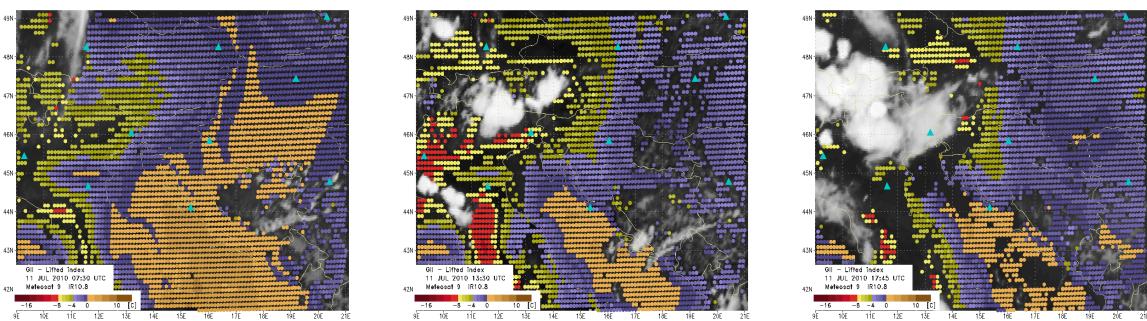
TPW indeks (slika 9c), već u ranim jutarnjim satima indicira iznimnu nestabilnost na širem području sjeverne Italije, kao i nešto manju nestabilnost u graničnom području Hrvatske, Srbije i Mađarske. Sličnu situaciju pokazuju i druga dva indeksa, uz iznimku LI indeksa koji nad Srbijom ne pokazuje nestabilnost. To vrijedi i za područje BiH. Takva predikcija LI indeksa je u konačnici ispala točnija jer je na istočnoj polovici domene tijekom cijelog dana situacija bila stabilna. LI indeks je također iznimno dobro prognozirao mjesto i raspodjelu nastanka nestabilnosti istočno od sjeverozapadne obale Italije, nešto malo lošije i K indeks.

Za prikaz početka razvoja konvekcije je odabran je termin 13:30 UTC, dok je puni razvoj prikazan terminom 17:45 UTC. Na prikazima indeksa u zadnjem terminu (17:45 UTC) moguće je primijetiti da je već došlo do raspada konvektivnog sustava uz sjevernu obalu Italije. U isto vrijeme, nešto sjevernije, nad Alpama, nastaju tri nove konvektivne stanice koje su se održale do kasnijih večernjih sati. Iako svi indeksi ukazuju na intenziviranje nestabilnosti u istočnim krajevima, do razvoja konvekcije nad tim područjima nije došlo, što je vidljivo i na slici 9.

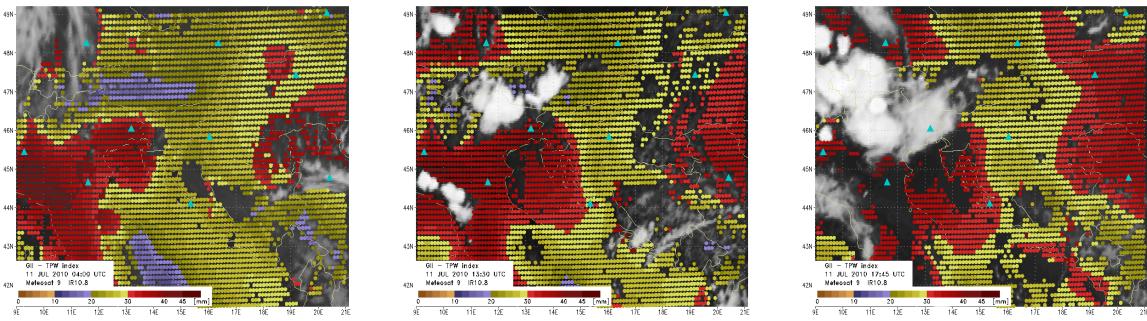
a)



b)

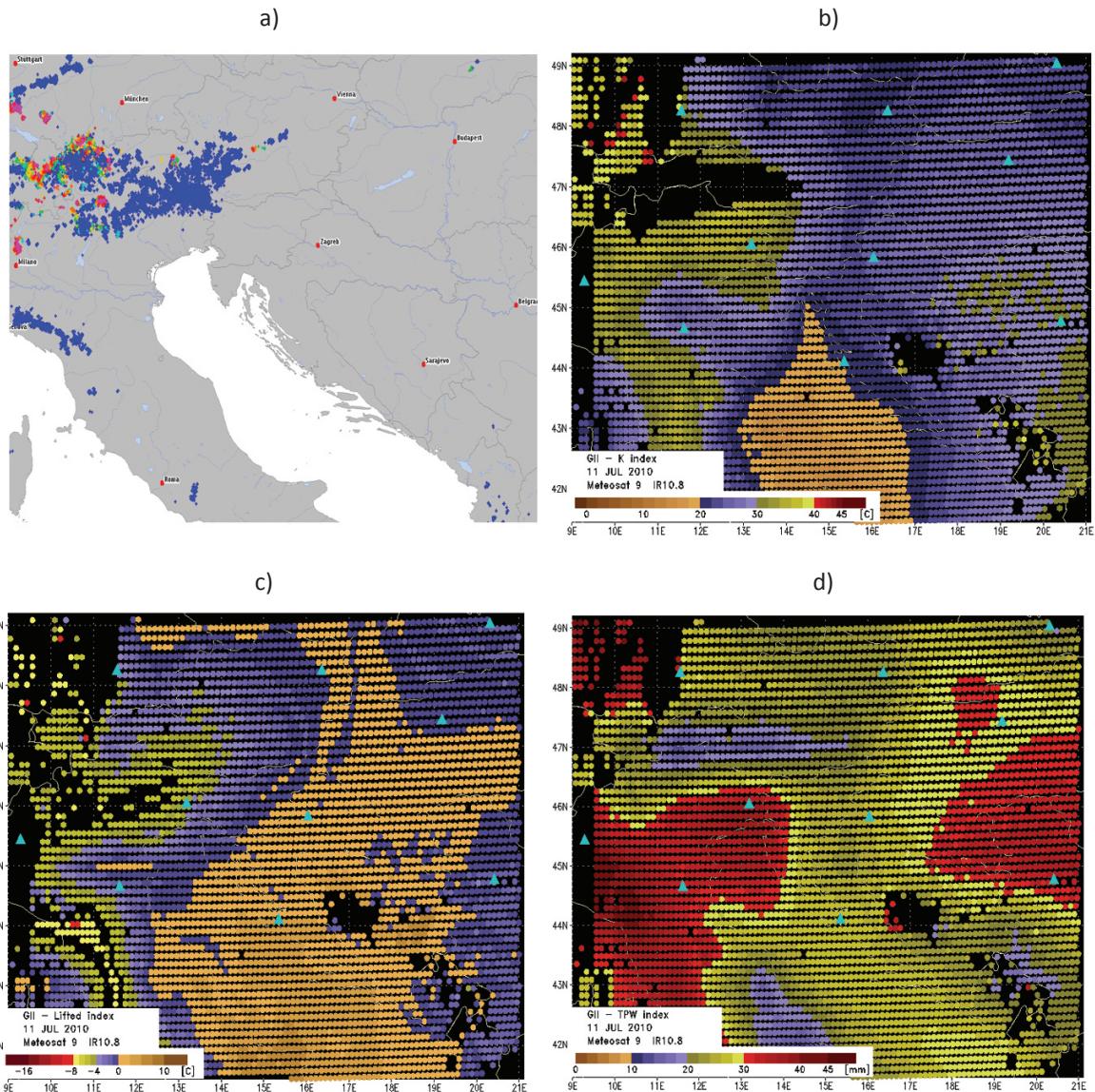


c)



**Slika 9.** Raspodjela K (a), LI (b) i TPW (c) indeksa u 3 različita termina: ujutro (lijevo, od 04:00 do 07:30 UTC ), sredinom dana (sredina, 13:30 UTC ) i poslijepodne (desno, 17:45 UTC ) tijekom 11. srpnja 2010. Plavim trokutićima označeni su položaji promatralih radiosondažnih postaja. Za prikaz svih indeksa nestabilnosti u jutarnjim satima koriste se najreprezentativniji termini.

Ovaj primjer ujedno je najpogodniji za prikaz jednog od spomenutih nedostatka PRM modela koji se odnosi na generiranje pretjerane količine vlage neposredno uz područja prekrivena oblacima. To je uočljivo iz slike 9 (sredina i desno), kod svih indeksa. Za TPW indeks je očito da će u takvoj situaciji pokazivati veće vrijednosti, odnosno nestabilniju atmosferu. Kod LI indeksa poveznica s povećanom nestabilnosti je ta da će temperatura uzdignute česti na 500 hPa, uslijed povećane vlažnosti (mokra adijabata), imati veću temperaturu od okoline pa će i sam indeks biti negativniji. Za K indeks povećanje nestabilnosti proizlazi iz činjenice da su pri većim količinama vlage i temperature rosišta veće, što posljedično znači i veće vrijednosti indeksa.

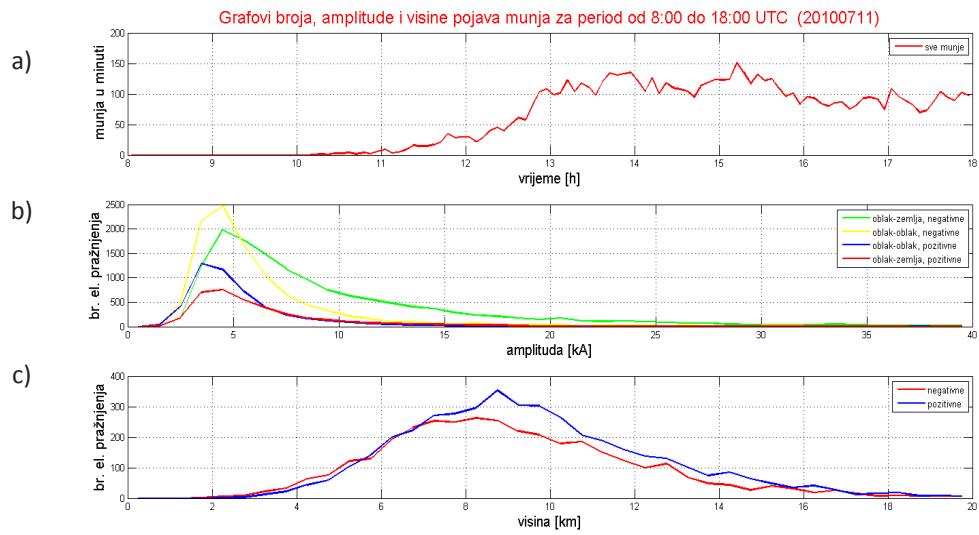


**Slika 10.** Raspodjela munja (a) u razdoblju 08:00 - 18:00 UTC i prostorna raspodjela vremenski usrednjениh vrijednosti K (b), LI (c) i TPW (d) indeksa između 04:00 UTC i 08:00 UTC za 11. srpnja 2010.

Kako je već spomenuto, a vidljivo i iz raspodjele usrednjih jutarnjih indeksa (slika 10), da su vrijednosti indeksa nestabilnosti u jutarnjim satima u ovom slučaju vrlo dobro indicirale uvjete za razvoj konvektivne naoblake na širem području sjeverne Italije, dok je samo LI predvidio stabilnu situaciju na istočnoj polovici promatrane domene. Pokazana je i prije spomenuta točnost procjene samog razvoja konvekcije od strane LI indeksa uz sjevernu obalu Italije. Za područje BiH iz prikaza pojava munja vidljivo je da oblaci na slici 9 (sredina) nisu kovektivnog tipa, odnosno da na tom području nije bilo električnih pražnjenja. Zanimljivo je primijetiti i niske vrijednosti TPW indeksa na području jugozapadne Austrije na kojem je vidljiv veći broj munja. Također su svi indeksi ukazivali na nestabilnost na mnogo većem području nego što je područje na kojem je došlo do razvoja konvektivnih sustava. To i u ovom slučaju ukazuje na potrebu korekcije graničnih vrijednosti (koja bi bila slična kao i u primjeru A), odnosno samog modela, u svrhu jasnije prognoze.

Na graničnom području Austrije, Italije i Švicarske i u ovom je primjeru uočljiv nedostatak vrijednosti indeksa. Uzrok je, kao i u prethodnom primjeru, nepostojanje izobarne plohe 850 hPa zbog visine Alpa

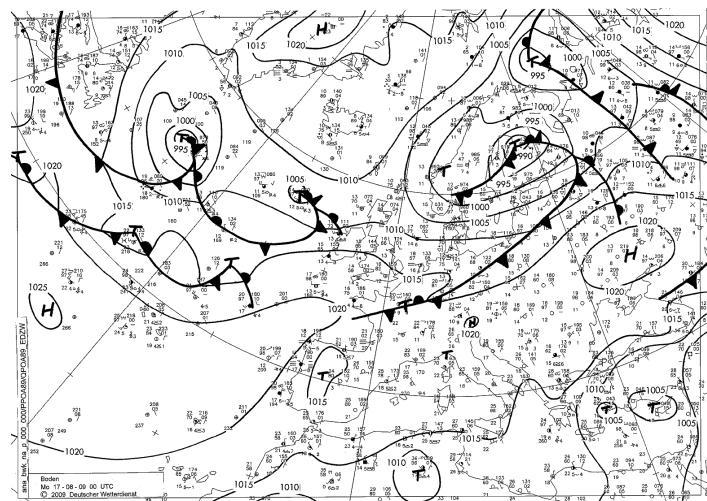
u tom području. Vrijednosti TPW indeksa osrednjene za jutarnje termine su u ovom promatranom primjeru bile vrlo visoke, s maksimalnih 45 mm oborive vode.



**Slika 11.** Karakteristike električnih pražnjenja za 11. srpnja 2009.: broj munja (a), amplituda za pojedine tipove električnih pražnjenja b), visina na kojoj je zabilježeno električno pražnjenje (c).

Iz grafova na slici 11 vidljivo je da su intenziteti i visine pojava munja, kao i njihova raspodjela slični onima za prethodni primjer (19. svibnja 2009.). Konvekcija je počela oko 10:00 UTC dok je jači razvoj uslijedio tri sata nakon toga. Razvoj konvekcije nastavio se i nakon našeg perioda promatranja, no moguće je zaključiti da su indeksi nestabilnosti indicirali razvoj konvekcije čak do 10 sati unaprijed. Vezano uz vertikalni razvoj oblaka nad visokom topografijom (Alpama), u ovom slučaju male su razlike u visinama na kojima su zabilježeni najveći broj pozitivnih i negativnih pražnjenja. Ukupni broj detektiranih munja na cijeloj domeni u promatranom periodu je 35 908.

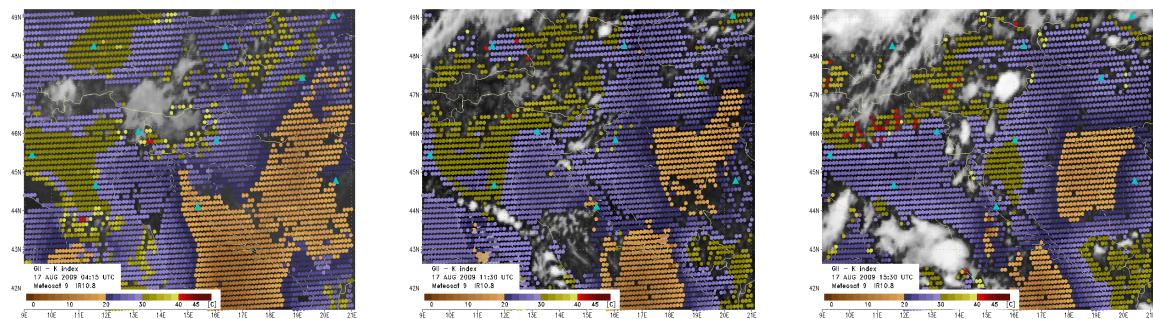
### 3.3. Primjer C: 17. kolovoza 2009.



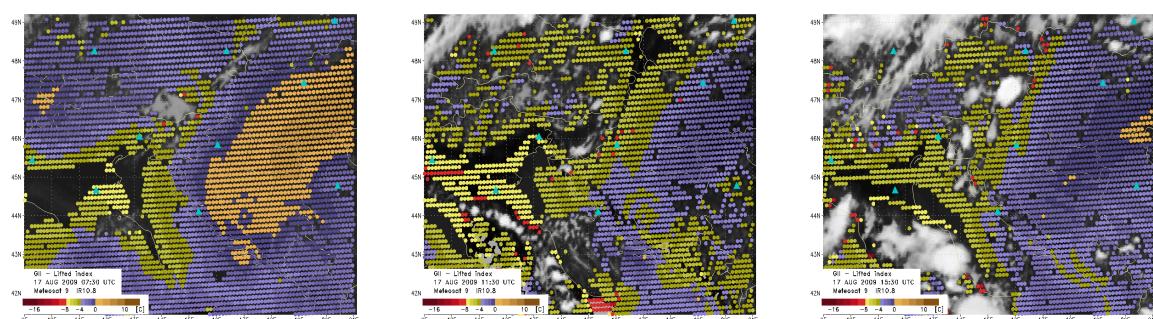
**Slika 12.** Sinoptička situacija 17. kolovoza 2009. u 00:00 UTC (izvor: *Europäischer Wetterbericht, Deutscher Wetterdienst*).

Područje srednje Europe i u ovom je slučaju bilo pod utjecajem bezgradijentnog polja malo povišenog tlaka zraka (slika 12). U višim slojevima atmosfere bilo je izražen termobarički greben kao i jugozapadno strujanje vrlo povoljno za razvoj konvekcije. U nižim slojevima izraženije je bilo strujanje u južnom smjeru. Sa sjeverozapada se tijekom dana približavala hladna fronta koja je pred kraj dana imala veći utjecaj na konvekciju u domeni promatranja. U jutarnjim satima bilo je pretežno vedro, a temperatura je tijekom dana na području Hrvatske dosezala iznadprosječne vrijednosti.

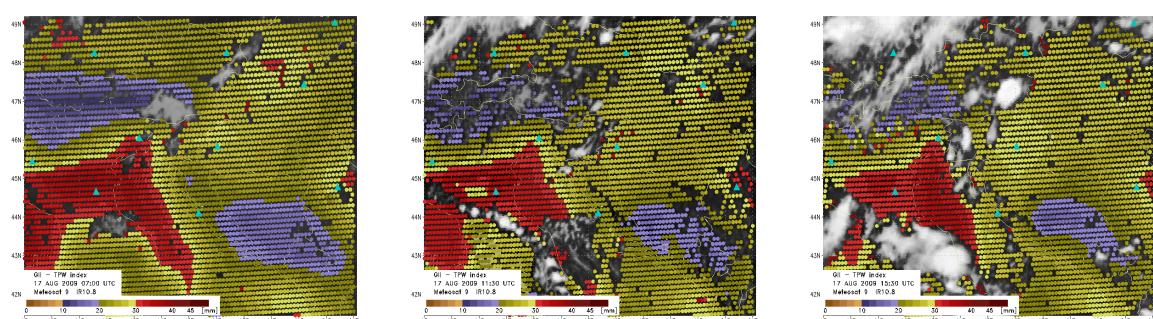
a)



b)



c)

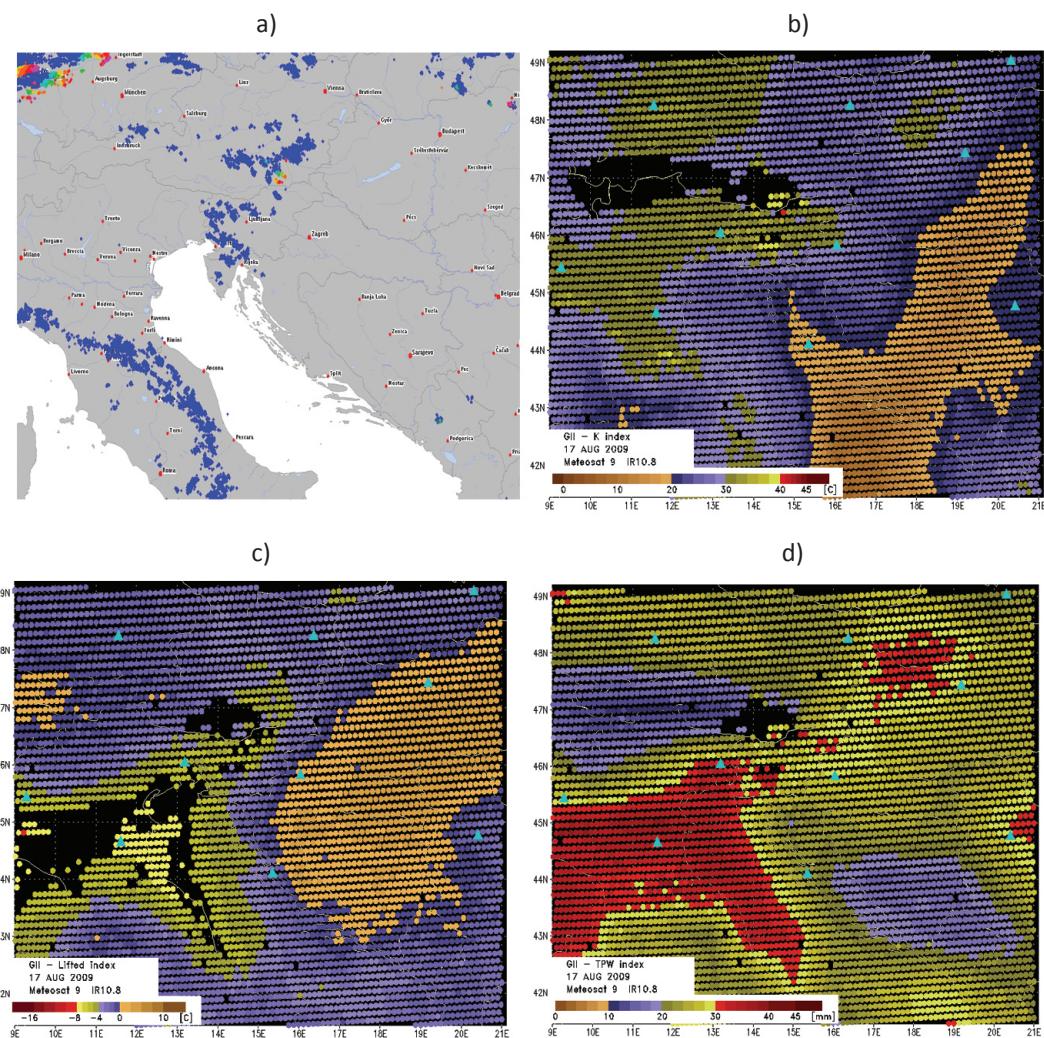


**Slika 13.** Raspodjela K (a), LI (b) i TPW (c) indeksa u 3 različita termina: ujutro (lijevo, od 04:15 do 07:30 UTC), sredinom dana (sredina, 11:30 UTC) i poslijepodne (desno, 15:30 UTC) tijekom 17. kolovoza 2009. Plavim trokutićima označeni su položaji promatranih radiosondažnih postaja. Za prikaz svih indeksa nestabilnosti, u jutarnjim satima koriste se najreprezentativniji termini.

Sva tri satelitska indeksa nestabilnosti u jutarnjim satima pokazuju konzistentnost predikcije nestabilnosti na širem području sjeverne Italije. Maksimumi nestabilnosti kod LI i TPW indeksa

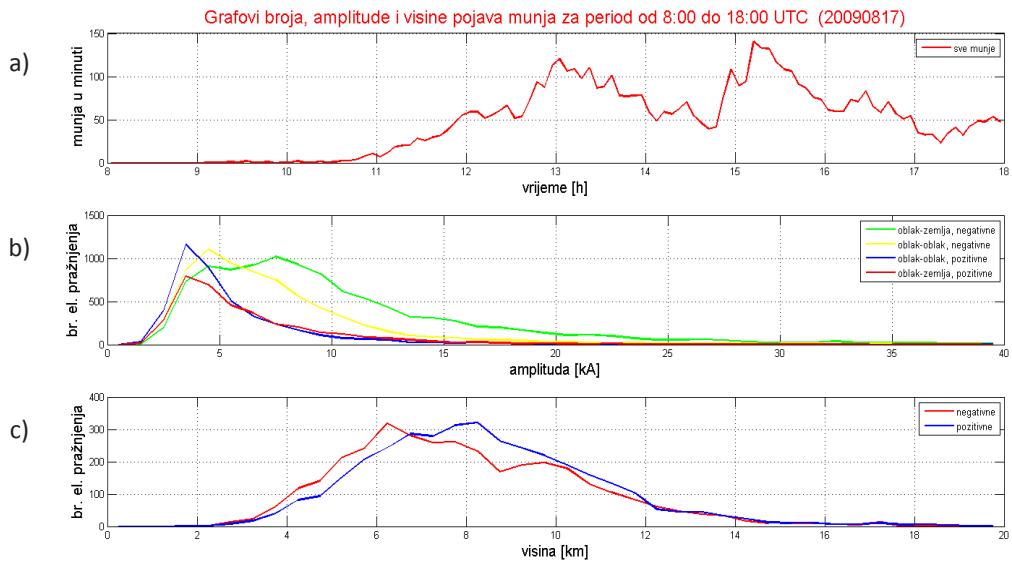
pomaknuti su nešto istočnije (iznad Jadranskog mora) u odnosu na mjesto na kojem se kasnije pojavila konvekcija, a njihova prostorna raspodjela prikazuje nestabilnosti gotovo je identična. Ona se na tom području manifestirala u velikom broju pojedinačnih konvjetivnih ćelija na orografski višim predjelima duž Apenina. Nešto manju konzistentnost u prikazu stabilnog područja indeksi su pokazali u srednjem istočnom dijelu domene promatranja. Slično vrijedi i za prikaz nestabilnosti na području od Istre, Slovenije i južnih dijelova Austrije. Najslabija procijena je bila za istočne dijelove Slovačke kao i za područje Crne Gore. Oblaci vidljivi na samom sjeverozapadu domene vezani su uz hladnu frontu koja se premješta prema istoku te ih kao takve nećemo analizirati. Ipak, moguće je ustvrditi da je ta fronta utjecala na nestabilnost u području ispred sebe, odnosno na stvaranje promatrane konvekcije.

Kao i u prethodnim slučajevima u jutarnjim satima samo je mali dio domene bio prekriven niskim oblacima tako da je izračun satelitskih indeksa nestabilnosti bio moguć na većem dijelu domene. Početak razvoja oblaka prikazan je slikama u 11:30 UTC (slika 13, sredina), dok se na kronološki posljednjim prikazima u 15:30 UTC (slika 13, desno) uočava potpuno razvijena konvekcija na spomenutim nestabilnim područjima. Nešto kasnije doći će i do intenzifikacije konvekcije na sjeverozapadnom dijelu domene.



**Slika 14.** Raspodjela munja (a) u razdoblju 08:00 - 18:00 UTC i prostorna raspodjela vremenski usrednjjenih vrijednosti K (b), LI (c) i TPW (d) indeksa između 04:00 UTC i 08:00 UTC za 17. kolovoza 2009.

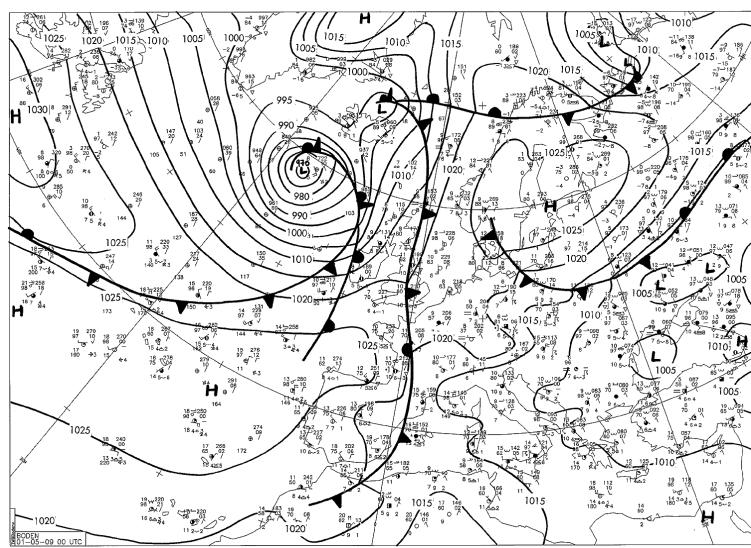
Usrednjavanjem indeksa dobivena je potpunija slika nestabilnosti. Najveću nestabilnost indeksi su indicirali duž Apenina, gdje je kasnije i došlo do razvoja konvektivnih oblaka, na što ukazuje raspodjela munja na slici 14a. Na tom prikazu, po boji oznaka munja, vidljivo je i to da se konvekcija na samom sjeverozapadu domene najkasnije razvila. Promatrujući gornje prikaze moguće je zaključiti da je za ovaj datum K indeks najbolje indicirao nestabilnost, ne toliko svojim intenzitetom koliko područjem gdje je ukazivao na nestabilnost. I u ovom slučaju prisutan je problem graničnih vrijednosti pojedinih indeksa, što je bilo vidljivo i u prethodnim slučajevima (sa sličnim potrebnim korekcijama tih vrijednosti kao i u primjerima A i B). Isto tako uočljiv je i nedostatak generiranja K indeksa na području Alpa oko granice Austrije, Italije i Švicarske, zbog visoke topografije.



**Slika 15.** Karakteristike električnih pražnjenja za 17. kolovoza 2009.: broj munja (a), amplitudo za pojedine tipove električnih pražnjenja b), visina na kojoj je zabilježeno električno pražnjenje (c).

Vremenski niz ukupnog broja munja u domeni ukazuje na dva prevladavajuća, vremenski različita, konvektivna ciklusa (slika 15). Ranijeg, koji je započeo oko 11:00 UTC i bio najaktivniji oko 13 UTC (15 CEST) nad vrhovima planina, te onog kasnijeg vezanog ponajprije uz hladnu frontu. Najveći broj električnih pražnjenja (osobito onih pozitivnih) zabilježen je na nešto nižim visinama (na otprilike 6-8 km) u odnosu na predhodne primjere, što bi mogao biti pokazatelj prisutnosti konvekcije nešto slabijeg intenziteta, dok se raspodjela amplituda bitno ne razlikuje. Uspoređujući satelitske slike oblaka i prikaz pojava munja moguće je zaključiti da su se konvektivni sustavi održali do otprilike 18:00 UTC, ako se pritom izostavi konvekcija uzrokovana premještanjem fronte preko SZ područja. Tu je opet vidljiva opravdanost prognoziranja pomoću usrednjjenih indeksa do 10 h unaprijed. Ukupni broj detektiranih munja na cijeloj domeni u promatranom periodu je 27 618.

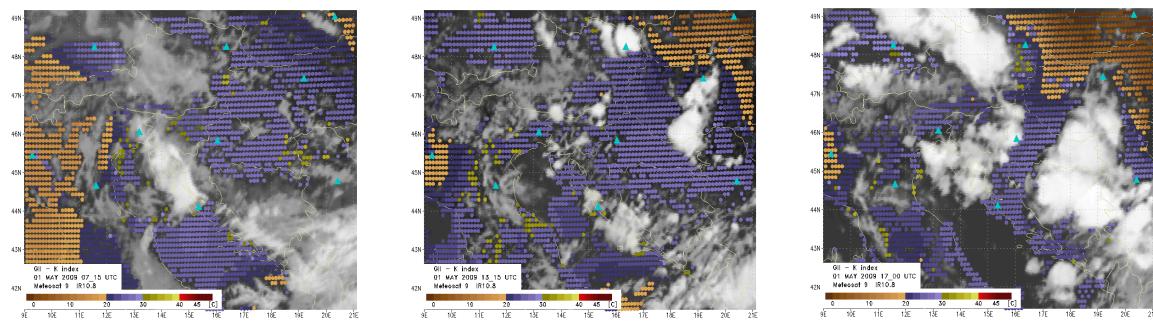
### 3.4. Primjer D: 1. svibanja 2009.



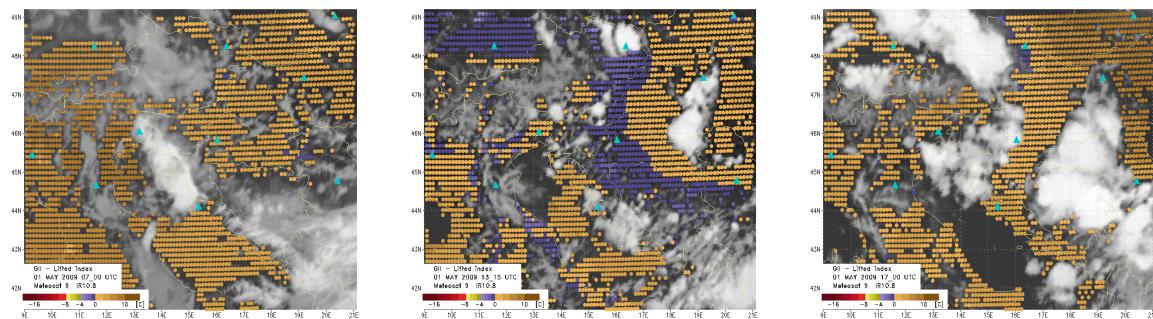
Slika 16. Sinoptička situacija 01. svibnja 2009. u 00:00 UTC (izvor: *Europäischer Wetterbericht, Deutscher Wetterdienst*).

U ovom je primjeru nad područjem istočne Europe i Crnog mora bilo je središte ciklone koja je imala utjecaj i na našu domenu promatrana (slika 16). Hrvatska se nalazi pod utjecajem njenog stražnjeg dijela. Sa zapada je istovremeno bio izražen utjecaj azorske, a sa sjevera sjeverno-europske anticiklone. Priljev hladnijeg kontinentalnog zraka uzrokovao je sjeveroistočnim strujanjem na granici spomenutih baričkih sustava na istoku i sjeveru. Takvi uvjeti također su povoljni za razvoj konvekcije (Mikuš, 2010).

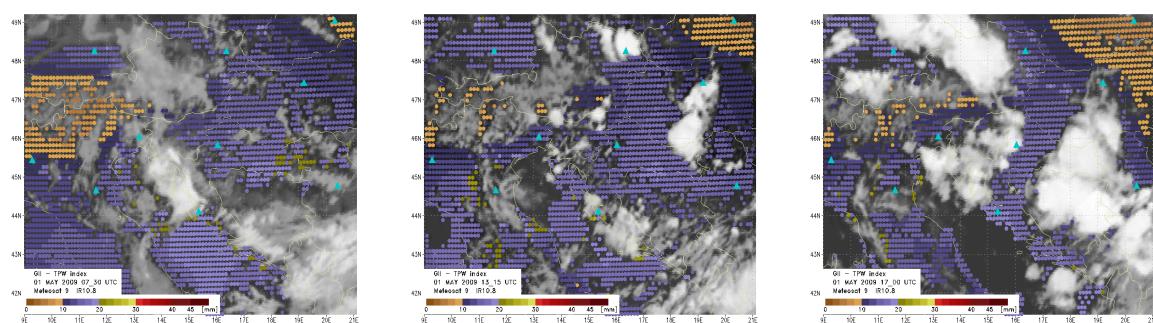
a)



b)



c)



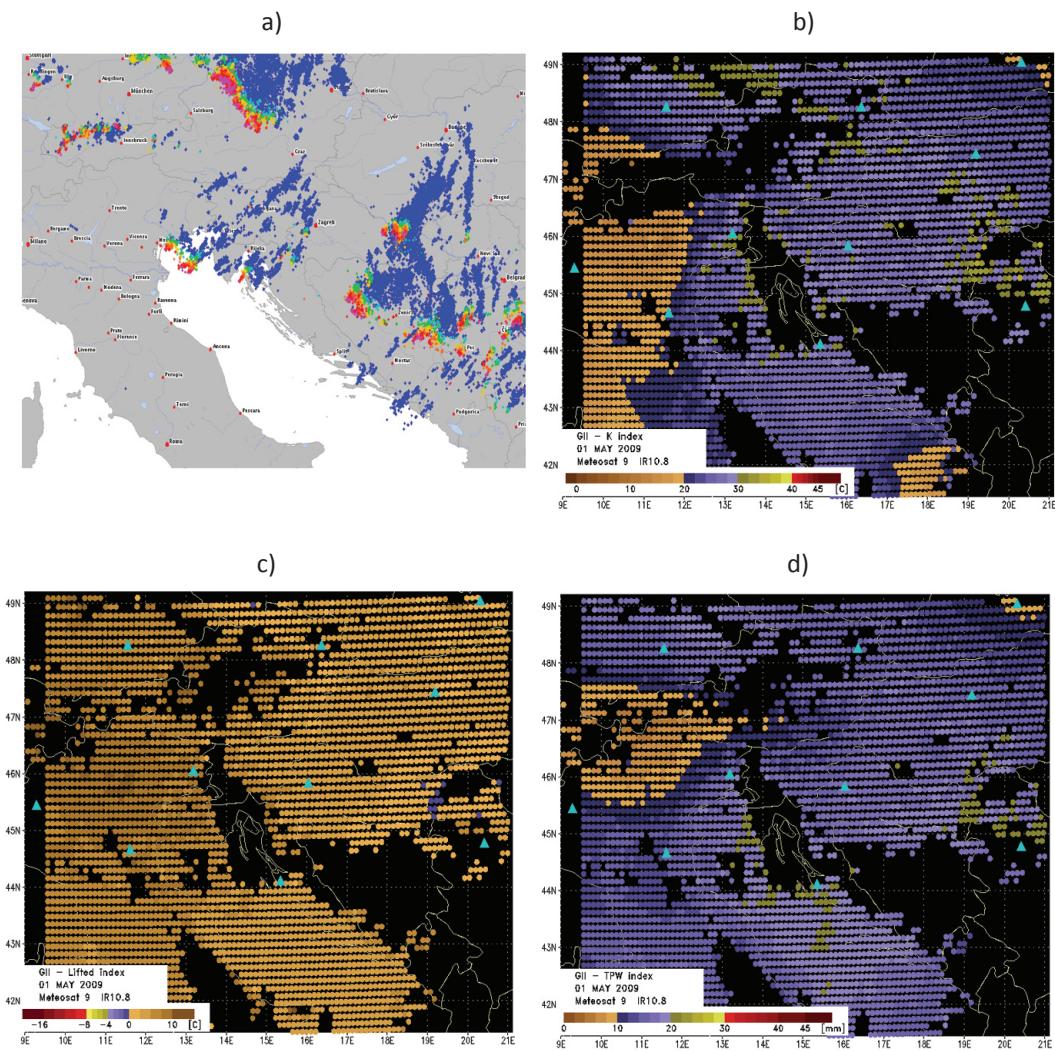
**Slika 17.** Raspodjela K (a), LI (b) i TPW (c) indeksa u 3 različita termina: ujutro (lijevo, od 07:00 do 07:30 UTC), sredinom dana (sredina, 13:15 UTC) i poslijepodne (desno, 17:00 UTC) tijekom 01. svibnja 2009. Plavim trokutićima označeni su položaji promatralih radiosondažnih postaja. Za prikaz svih indeksa nestabilnosti, u jutarnjim satima koriste se najreprezentativniji termini.

Već u jutarnjim satima nad domenom je bilo mnogo srednjih i visokih oblaka, čime je područje na kojim su se mogli izračunati satelitski indeksi nestabilnosti bilo smanjeno (slika 17). Jutarnje vrijednosti svih indeksa ukazivale su na stabilnu situaciju, osobito na zapadu i samom sjeveroistoku domene. Iako su vrijednosti K i TPW indeksa na većem dijelu promatranog područja bile iznad graničnih vrijednosti za nastanak konvekcije, one nisu bile jako visoke. Ako se uzme u obzir da takve vrijednosti u predhodno promatranim slučajevima nisu bile povezane s razvojem konvektivnih oblaka, odnosno da smo zaključili da su granične vrijednosti prenisko postavljene, u ovom bi se slučaju moglo zaključiti da do pojave kovekcije neće doći. Ipak, na prikazima u 13:15 UTC vidljivo je da se konvekcija počela razvijati, ponajviše na području Istre, Slovenije, sjeveroistoka i jugoistoka Austrije kao i središnje Mađarske i

dijelu Srbije. Na dijelu zapadne BiH i južnim dijelovima Hrvatske prisutni su visoko razvijeni oblaci nastali prvenstveno uslijed anabatičke advekcije zračne mase u SI strujanju preko orografije Dinarida. Takve nam pojave nisu zanimljive.

U 13:15 UTC indeksi su ukazivali na pojačanu nestabilnost u istočnim dijelovima domene. Međutim, u tim predjelima ni u kasnijim trenucima nije došlo do razvoja konvekcije. Jedino je LI indeks intenzivnije ukazivao na povećanu nestabilnost u središnjim dijelovima domene u kojima je kasnije i došlo do intenziviranja već postojećih konvektivnih stanica. Istovremeno, na samom sjeveroistoku indeksi pokazuju jačanje stabilnosti.

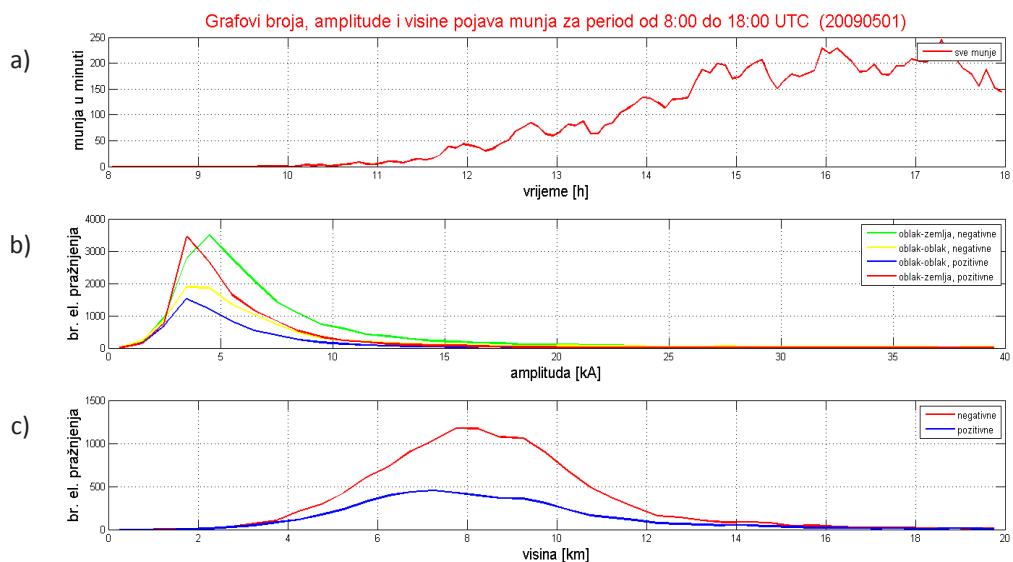
Na prikazu u 17:00 UTC (slika 17, desno) vidljiv je puni razvoj konvekcije. Visoki oblaci su advektirani prema jugozapadu pod utjecajem sjeveroistočnog strujanja. Ubrzo nakon toga konvekcija počinje gubiti na svojem intenzitetu.



**Slika 18.** Raspodjela munja (a) u razdoblju 08:00 - 18:00 UTC i prostorna raspodjela vremenski usrednjениh vrijednosti K (b), LI (c) i TPW (d) između 04:00 UTC i 08:00 UTC za 01. svibnja 2009.

Na usrednjenim prikazima indeksi pokazuju nešto bolju prognozu nestabilnosti (slika 18) od pojedinačnih termina (slika 17, lijevo). Razlog je taj što su vrijednosti indeksa u ranim jutarnjim satima bile nešto veće. Iako je možda neočekivano da indeksi generirani u ranijim jutarnjim terminima bolje

prognoziraju nestabilnost nego oni u kasnijim, moguće je da dnevni razvoj graničnog sloja 'kvari' konceptualnu primjenu indeksa. Pojačanu nestabilnost K i TPW indeksi pokazivali su na području Vojvodine i u sjeveroistočnim dijelovima Austrije. Vidljivo je i iz podataka o položaju munja (slika 18a) da je na prvom spomenutom području bilo slabog razvoja konvekcije dok je na drugom razvoj bio izraženiji. Također, ta dva indeksa su ukazivala neopravdano na nestabilnost na širem području sjevernog Jadrana. LI indeks pokazuje stabilnost na cijelom području promatranja s vrijednostima koje su u samo nekoliko piksela manje od  $0^{\circ}\text{C}$ , što je također neopravdano. K indeks opet pokazuje nemogućnost generiranja vrijednosti zbog visoke topografije područja Alpa oko granice Austrije, Italije i Švicarske. Prema bojama u raspodjeli munja vidljiv je i smjer advekcijske konvektivne sustava prema jugozapadu. Problem krivo postavljenih graničnih vrijednosti indeksa nestabilnosti ovdje nije posebno izražen.

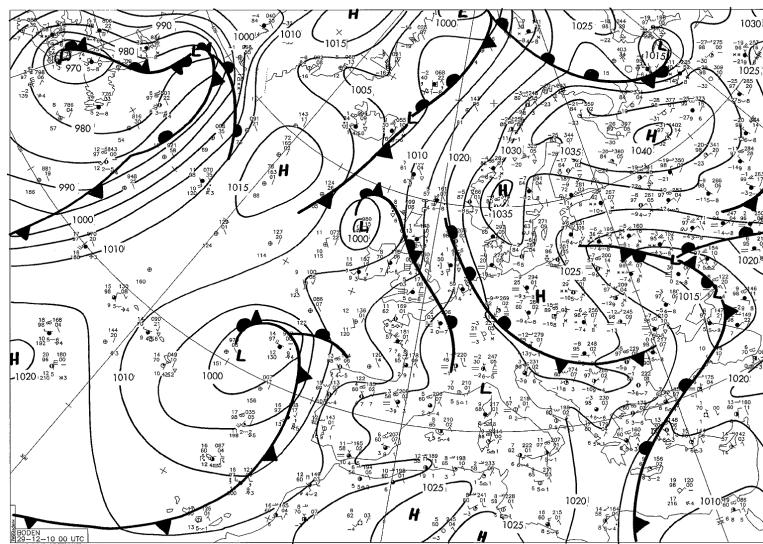


**Slika 19.** Karakteristike električnih pražnjenja za 01. svibnja 2009.: broj munja (a), amplitude za pojedine tipove električnih pražnjenja b), visina na kojoj je zabilježeno električno pražnjenje (c).

Raspodjele amplituda i visina pojave električnih pražnjenja razlikuju se u određenoj mjeri od prijašnjih slučajeva. Vidljivo je da je konvektivna aktivnost započela ranije, već oko 10:00 UTC. Puni razvoj konvekcija je imala oko 16:00 UTC. Kako općenito za ovaj slučaj indeksi nestabilnosti nisu indicirali nestabilnost teško je zaključivati o tome da li su unutar nekog perioda uspjeli prognozirati konvektivne događaje. Ukupan broj detektiranih munja na promatranoj domeni je 53 717.

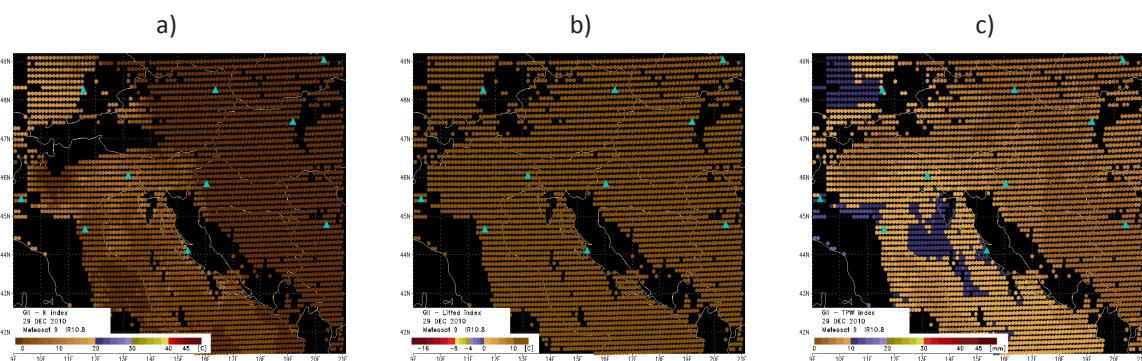
Ako se uzme u obzir da su najveću nestabilnost indeksi pokazivali na rubnim područjima oblaka, gdje se i očekuje anomalija indeksa uslijed spomenutog pretjeranog generiranja vlage od strane PRM modela, moguće je zaključiti da ovaj primjer ukazuje na to da postoje situacije u kojima satelitski indeksi nestabilnosti krivo 'prognoziraju' konvektivne sisteme. Ovako loše rezultate verifikacije u ovom primjeru moguće je možda pripisati sinoptičkoj situaciji različitoj od one u prethodna tri primjera, uplivom hladnog zraka i većim intenzitetom naoblake. No, za čvršće dokaze trebalo bi promotriti i više sličnih slučajeva.

### 3.5. Primjer E: 29. prosinca 2010.



**Slika 20.** Sinoptička situacija 29. prosinca 2010. u 00:00 UTC (izvor: *Europäischer Wetterbericht, Deutscher Wetterdienst*).

Za razliku od situacija u toploj dijelu godine, prikazanih u prethodna četiri primjera, u ovom će primjeru biti analizirana jedna zimska situacija. Sinoptička karta na slici 20 pokazuje prisustvo prizemnih centara niskog tlaka iznad Atlantika te iznad sjeveroistočne Europe. Visinske karte (nisu prikazane) potvrđuju postojanje duboke ciklone s centrom iznad sjeveroistočne Europe. Domena promatranja nalazi pod utjecajem plitkog ogranka anticiklone sa sjevera Europe i stražnjeg dijela kontinentalne ciklone praćene sjeverozapadnog visinskog strujanjem.



**Slika 21.** Prostorna raspodjela vremenski usrednjih vrijednosti  $K$  (b),  $LI$  (c) i  $TPW$  (d) indeksa između 04:00 UTC i 08:00 UTC za 29. prosinca 2010.

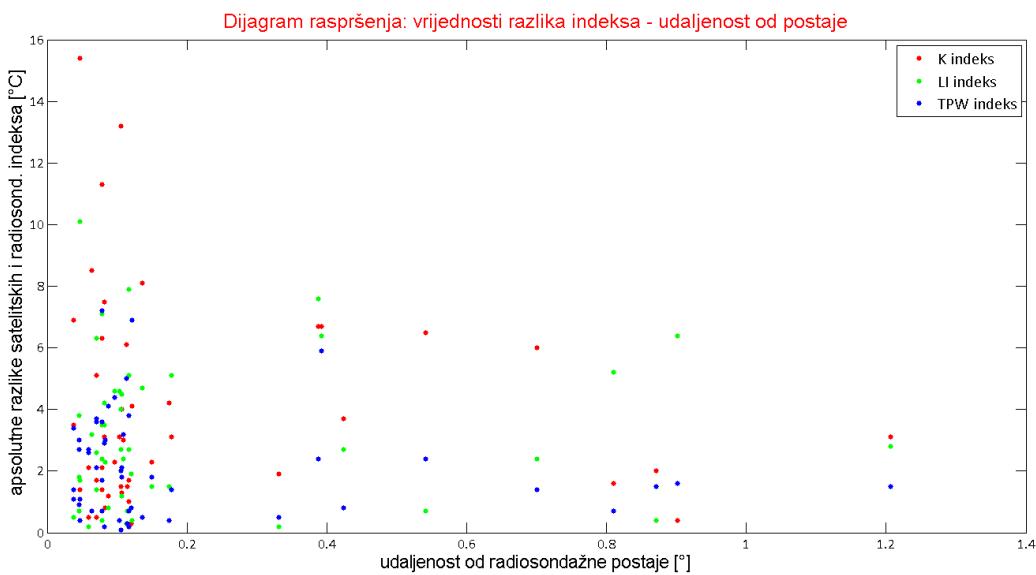
Tijekom cijelog dana vrijednosti indeksa nisu se značajnije mijenjale, a do konvekcije nije došlo niti na jednom mjestu unutar cijele domene (slika 21). To dokazuje i pregled LINET podataka o munjama koji je pokazao da se tijekom cijelog dana nije dogodilo niti jedno električno pražnjenje (stoga karta električnih pražnjenja nije niti prikazana). Iz tog razloga se ne prikazuje vremenski tijek razvoja indeksa i naoblake, koja je pretežno bila srednja i niska.

Prikazi usrednjениh vrijednosti indeksa nestabilnosti ukazuju na vrlo visoku stopu stabilnosti u cijeloj domeni, što je u suglasju s prije rečenim o nedostatku pojava munja (slika 21). Zbog konstantne pokrivenosti oblacima u jutarnjim satima, na nekim dijelovima domene nema generiranih indeksa. Kao i u svim prijašnjim primjerima K indeks nije generiran na spomenutom području Alpa, na graničnom području Austrije, Italije i Švicarske. Vrlo visoki stupanj stabilnosti potkrepljuju i ekstremno niske, odnosno u slučaju LI indeksa visoke vrijednosti indeksa u pojedinim trenucima. Tako je K indeks imao minimum od -30°C, LI indeks maksimum od 30°C, a TPW indeks minimum od samo 3 mm oborive vode. Na velikim područjima domene prikazana je uniformna raspodjela indeksa (posebno LI). To proizlazi iz činjenice da se grafičkim prikazom nisu mogli prikazati gradijente u poljima indeksa jer su ispod, odnosno iznad određenih vrijednosti svi pikseli označavani istom bojom. Kako su to vrlo niske, odnosno visoke vrijednosti kada govorimo o LI indeksu, takav nedostatak nije od posebnog značaja za prognozu nestabilnosti. Dakle, osim TPW indeksa za koji se u pravilu ne može reći da ima određenu graničnu vrijednost (zbog toga jer daje informaciju samo o vlažnosti atmosfere), indeksi ne prelaze granične vrijednosti i stoga sasvim opravdano ukazuju na iznimnu stabilnost atmosfere.

### 3.6. Radiosondažna verifikacija

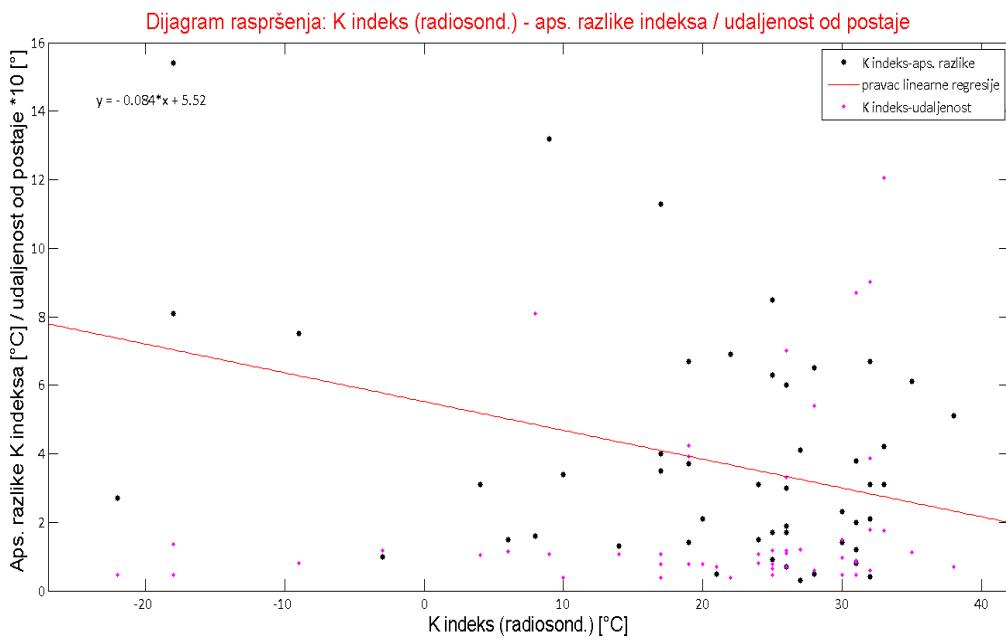
Kao što je već rečeno, iz radiosondažnih mjerjenja na 10 postaja (vidi Tab. 3) za svaki od gore promatranih situacija dobivene su vrijednosti K, LI i TPW indeksa. U tu svrhu korištene su radiosondaže u 00:00 UTC iz razloga što se željelo promotriti 'mirniju' atmosferu kao i zbog toga što je u noćnim satima u pravilu prisutno manje naoblake, što znači da je veća površina na kojoj se mogu generirati satelitski indeksi. Na taj način dobiveno je ukupno 50 vrijednosti za svaki indeks. One su u svrhu objektivne verifikacije uspoređivane s vrijednostima satelitskih indeksa u istom trenutku, i to onih koji se nalaze najbliže radiosondažnim postajama. Treba naglasiti da se ovom vrstom verifikacije željela ispitati točnost satelitskih indeksa, odnosno valjanost PRM metode.

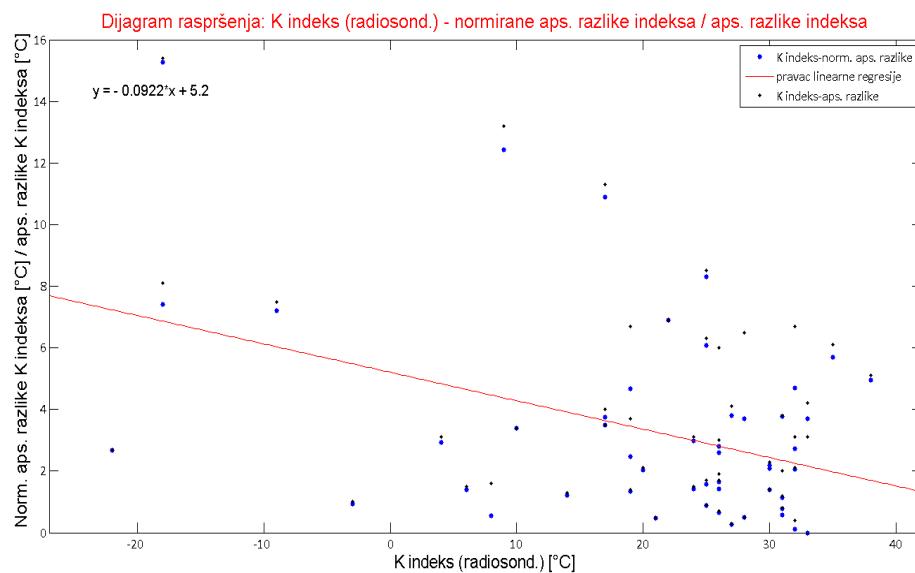
Referentni uzorak u verifikaciji su radiosondažni indeksi, za koje se prepostavlja da su točni, odnosno da prikazuju stvarno stanje atmosfere. Ostale su prepostavke da točnost izračuna satelitskih indeksa ne ovisi o geografskom položaju te da nema vremenske i prostorne korelacije između istovrsnih indeksa, odnosno da su postaje dovoljno udaljene i da je period između dva sondiranja atmosfere dovoljno dug. Tako je dobiven skup od 50 realizacija nezavisne slučajne varijable (radiosondažni indeksi) i 50 realizacija zavisne slučajne varijable (satelitski indeksi), između kojih će se provjeravati oblik povezanosti i stupanj korelacije. Posljednja prepostavka je da su satelitski indeksi uzorkovani u točkama radiosondažnih postaja, premda zbog nemogućnosti generiranja indeksa u svim točkama to u pravilu nije točno, na što nam ukazuje i slika 22.



**Slika 22.** Dijagram raspršenja apsolutnih razlika vrijednosti radiosondažnih i satelitskih indeksa (u  $^{\circ}\text{C}$ ) i udaljenosti mjesta uzorkovanja satelitskih indeksa od položaja radiosondažnih postaja (u geografskim stupnjevima).

Iz slike 22 vidimo da se većina uzorkovanih satelitskih indeksa nalaze u blizini radiosondažnih postaja (čemu se i teži), premda postoje satelitski indeksi koji su odabrani na udaljenostima većim do 130 km od postaje. Isto tako je moguće ‘prostim okom’ zaključiti da ne postoji znakovita korelacija i trend između veličina u dijagramu raspršenja, iako bi bilo intuitivno za očekivati da sa povećanjem udaljenosti rastu i razlike u vrijednostima satelitskih i radiosondažnih indeksa.

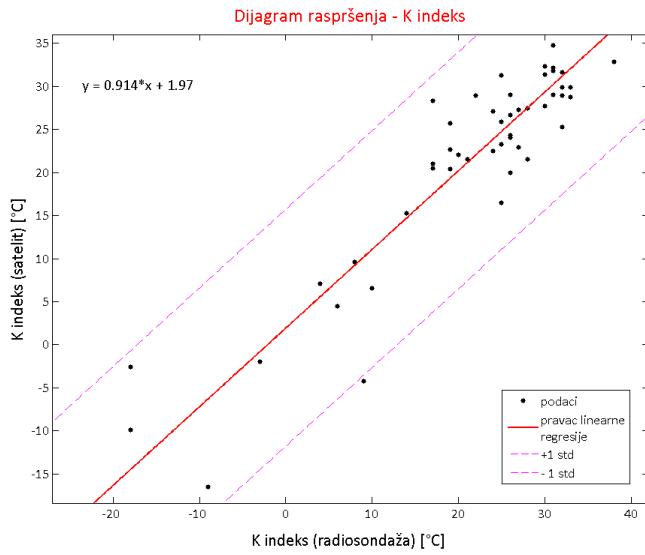




**Slika 23.** Dijagram raspršenja radiosondažnih vrijednosti K indeksa i razlike između radiosondažnih i satelitskih vrijednosti istog indeksa (a), normirani dijagram raspršenja iz a) (b)

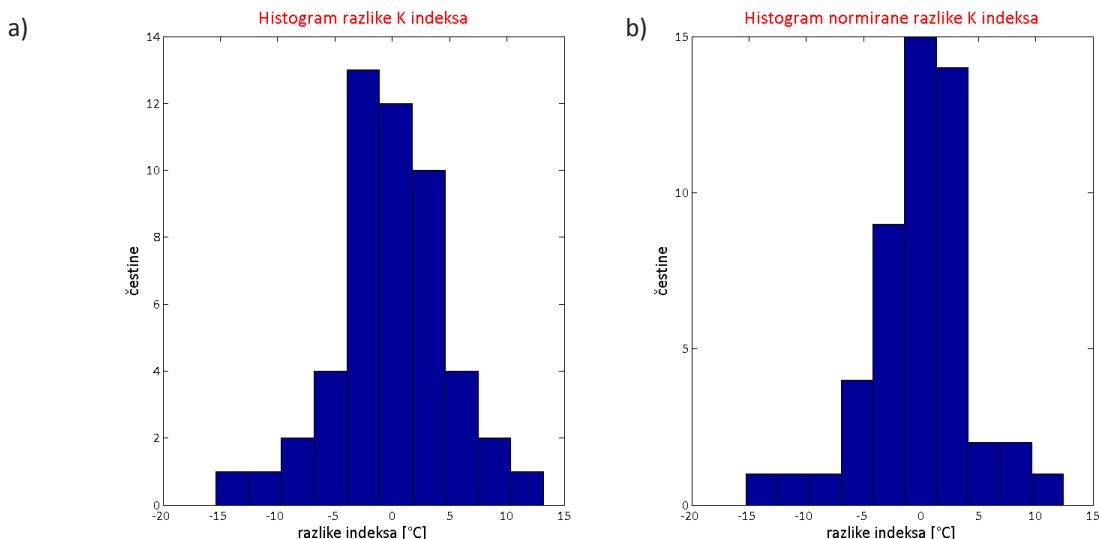
Na sljedećem prikazu (slika 23a i 23b) prikazan je pokušaj grube korekcije, odnosno normiranja apsolutnih razlika satelitskih i radiosondažnih indeksa (što je mjera pogreške generiranja satelitskih indeksa) s obzirom na udaljenost pripadnih satelitskih indeksa od radiosondažnih postaja. Normiranje je napravljeno tako da su razlike satelitskih i radiosondažnih indeksa množene sa faktorom normiranih udaljenosti (najveća udaljenost ima faktor 0, najmanja 1). Na taj se način pokušao smanjiti utjecaj pogreške u razlici indeksa uzrokovane netočnim prostornim uzorkovanjem satelitskih indeksa, pod pretpostavkom da što je udaljenost veća s njom raste i razlika indeksa. Ovaj preliminarni pokušaj dao je stanovito poboljšanje rezultata (slika 23b), što se da zaključiti ako se promotri koliko se smanjila razlika indeksa (razlika između crnih i plavih točkica). Na istoj slici prikazani su i pravci linearne regresije između vrijednosti radiosondažnih indeksa i razlike radiosondažnih i satelitskih indeksa. Oni ukazuju na to da za vrijednosti indeksa povezane s nestabilnom atmosferom postoje manje pogreške izračuna satelitskih indeksa, što je u pravilu vrlo poželjno. No treba napomenuti da su uzorci u spomenutoj statističkoj analizi vrlo mali i da gore navedene zaključke treba uzeti s oprezom. Prikaz korekcije je učinjen na uzorku K indeksa, no slični zaključci vrijede i za LI i TPW indeks, što ovdje neće biti prikazano.

### 3.6.1. Radiosondažna verifikacija - K indeks



**Slika 24.** Dijagram raspršenja između radiosondažnih i satelitskih vrijednosti K indeksa, sa granicama jedne standardne devijacije radiosondažnih indeksa, pripadnim pravom linearne regresije i njenom jednadžbom.

Iz jednadžbe regresije je jasno vidljivo da je koeficijent smjera vrlo blizak jedinici (0.914) što ukazuje na jaki pozitivni trend radiosondažnih i satelitskih indeksa (slika 24). Tu činjenicu potvrđuje i visoka pozitivna vrijednost koeficijenta korelacije između ta dva skupa (0.934). Zbog nepravilne raspodjele K indeksa signifikantnost koeficijenta korelacije je testirana *Monte Carlo* metodom u poglavlju 3.6.4, a pokazala je značajnost u vrlo velikom postotku. Iz slike 24 može se primjetiti da je većina podataka po iznosu veća od 20°C, odnosno iznad granične vrijednosti stabilnosti za K indeks. Ovo je opravdano činjenicom da je u 4 od 5 promatranih primjera bilo zamjetnog razvoja konvekcije. To se podudara sa zaključkom kojeg je izveo Manzato (2003) za sjeveroistočni dio Italije (njegova slika 9), gdje se aktivna konvekcija pojavljuje obično za K indeks iznad 20 °C.



**Slika 25.** Histogram razlike radiosondažnih i satelitskih K indeksa (a) i histogram normirane razlike radiosondažnih i satelitskih K indeksa (b)

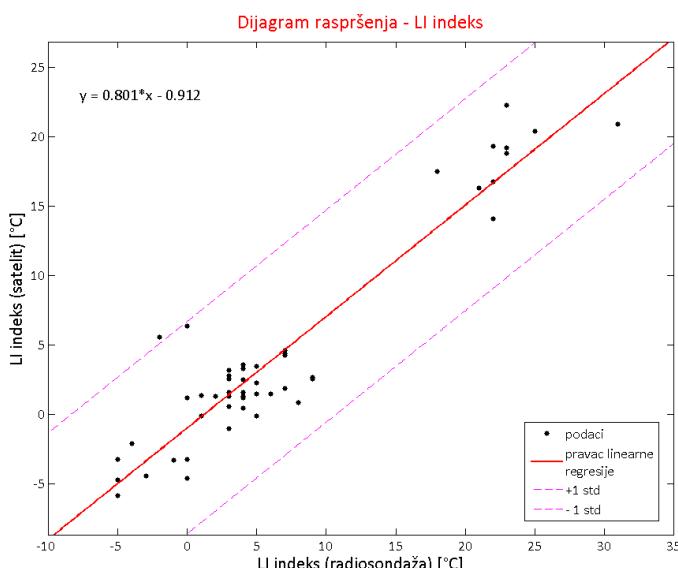
**Tablica 4.** Statistički parametri razlike radiosondažnih i satelitskih K indeksa

minimum [°C]	maksimum [°C]	median [°C]	srednjak [°C]	stand. devijacija [°C]
<b>-15.4000</b>	<b>13.2000</b>	<b>-0.6000</b>	<b>-0.2160</b>	<b>5.0651</b>

Iz slike 25a i tablice 4 vidljivo je da su razlike indeksa približno normalno raspodijeljene oko srednjaka, koji je vrlo blizak nuli. Idealna bi situacija bila kada bi srednjak zaista imao vrijednost nula. Na slici 25b normirani histogram pokazuje nešto veću koncentriranost podataka oko srednjaka, odnosno poželjno smanjenje poluširine raspodjele u odnosu na nenormiranu raspodjelu.

Iz svega priloženog moguće je zaključiti da satelitski generirani K indeksi vrlo dobro prikazuju stvarno stanje stabilnosti atmosfere. Isto tako rezultati ukazuju na opravdanost normiranja indeksa s obzirom na udaljenost od radiosondažnih postaja.

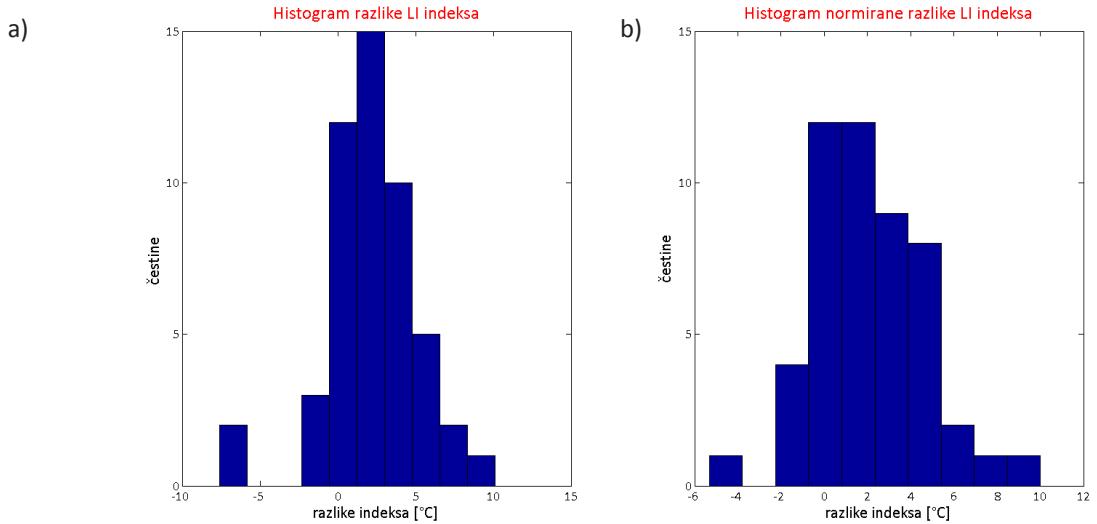
### 3.6.2. Radiosondažna verifikacija - LI indeks



**Slika 26.** Dijagram raspršenja između radiosondažnih i satelitskih vrijednosti LI indeksa, s granicama jedne standardne devijacije radiosondažnih indeksa, pripadnim pravcem linearne regresije i njenom jednadžbom.

Slika 26 pokazuje vrijednosti LI indeksa grupiranih u dvije skupine podataka. Grupa sa relativno visokim vrijednostima pripada promatranom primjeru 29. prosinca 2010., kada je bila prisutna vrlo stabilna situacija. Druga grupa podatak prikazuje primjere s izraženom konvekcijom. Treba primijetiti da je tu većina vrijednosti indeksa veća od nule, što u obrađenim primjerima nije bio slučaj. Razlog za ovo neslaganje leži u činjenici da su ovdje vrijednosti LI indeksa promatrane u 00:00 UTC, kad je atmosfera znatno stabilnija nego kasnije tijekom dana.

Koeficijent smjera primijenjene linearne regresije (0.801) ukazuje na nešto slabiji pozitivni trend porasta satelitskih u odnosu na radiosondažne indekse, nego što je to bio slučaj kod K indeksa. Međutim, sama korelacija tih podataka je nešto veća te iznosi 0.942. Također je Monte Carlo metodom dokazana značajnost tog koeficijenta.



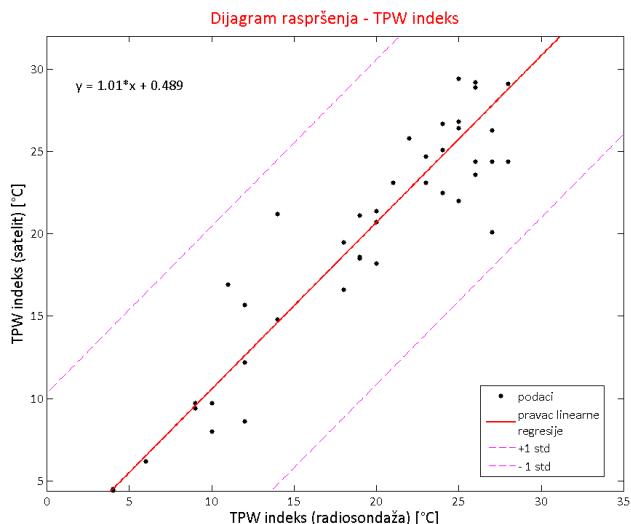
**Slika 27.** Histogram razlike radiosondažnih i satelitskih LI indeksa (a) i histogram normirane razlike radiosondažnih i satelitskih LI indeksa (b)

**Tablica 5.** Statistički parametri razlike radiosondažnih i satelitskih LI indeksa

minimum [°C]	maksimum [°C]	median [°C]	srednjak [°C]	stand. devijacija [°C]
<b>-7.6000</b>	<b>10.1000</b>	<b>2.4000</b>	<b>2.2540</b>	<b>3.1196</b>

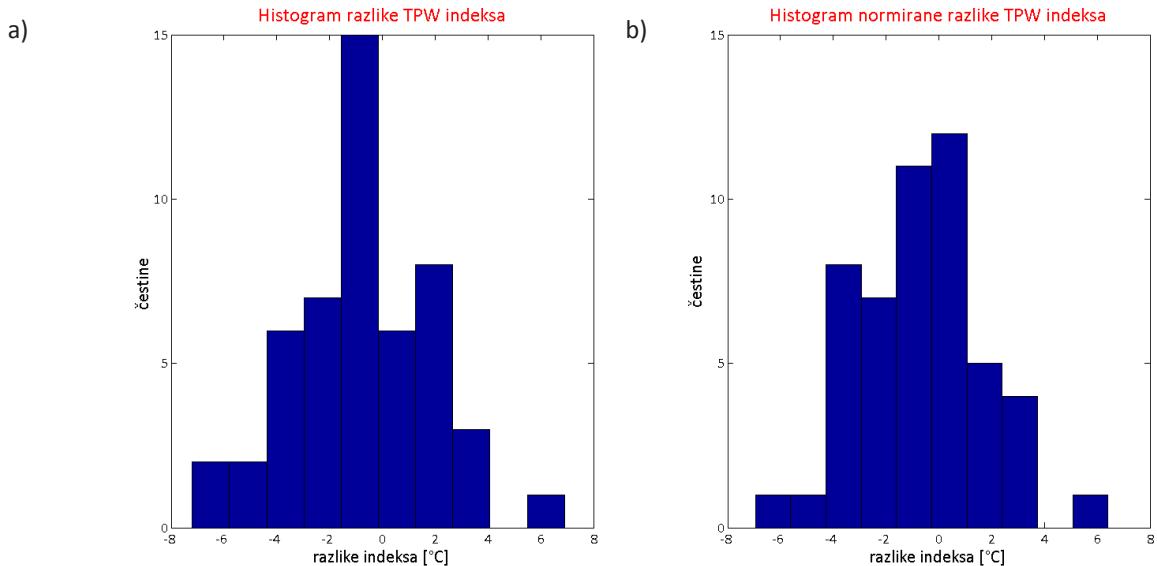
Histogram razlike indeksa (odnosno, pogreške satelitskih indeksa) pokazuje približno normalnu raspodjelu vrijednosti (slika 27a). Srednjak i medijan su znatnije pomaknuti od nule što nije dobar pokazatelj točnosti PRM modela, ali je standardna devijacija nešto manja nego kod K indeksa (tablica 5). Može se primjetiti i to da normiranjem (slika 27b) na udaljenost od postaje nije dobiven željeni učinak na smanjenje poluširine raspodjele, čak je došlo do suprotnog efekta. Ali generalno se može reći da su rezultati za LI indeks zadovoljavajući.

### 3.6.3. Radiosondažna verifikacija - TPW indeks



**Slika 28.** Dijagram raspršenja između radiosondažnih i satelitskih vrijednosti TPW indeksa, sa granicama jedne standardne devijacije radiosondažnih indeksa, pripadnim pravom linearne regresije i njenom jednadžbom.

Vrijednosti TPW indeksa na slici 26 niže su nego na promatranim prikazima nestabilnosti u poglavlju 2. Uzrok tome je i ovdje uzorkovanje u 00:00 UTC, kad je atmosfera hladnija pa posljedično zaprima manje količine vode. Koeficijent smjera kod TPW indeksa (1.010) je najbolji od sva tri promatrana. Također se na slici 26 može uočiti mala raspršenost podataka oko pravca linearne regresije, što ukazuje na vrlo visoki koeficijent korelacije, koji iznosi 0.963. Značajnost koeficijenta korelacije je također dokazana *Monte Carlo* metodom.



Slika 29. Histogram razlike radiosondažnih i satelitskih TPW indeksa (a) i histogram normirane razlike radiosondažnih i satelitskih TPW indeksa (b)

Tablica 6. Statistički parametri razlike radiosondažnih i satelitskih TPW indeksa

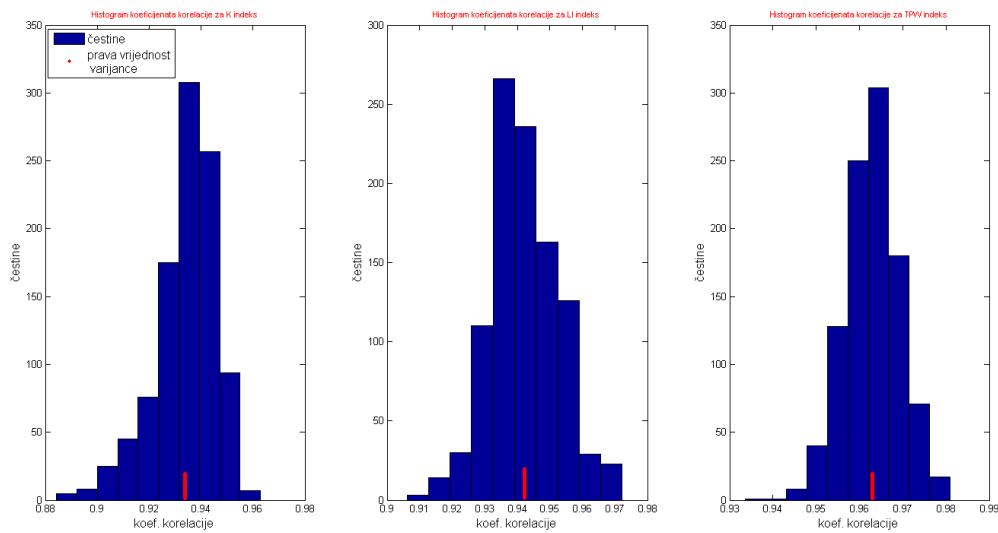
minimum [°C]	maksimum [°C]	median [°C]	srednjak [°C]	stand. devijacija [°C]
<b>-7.2000</b>	<b>6.9000</b>	<b>-0.7000</b>	<b>-0.7340</b>	<b>2.6587</b>

Iz slike 29a i tablice 6 vidljiva je približno normalna raspodjela razlike indeksa, sa srednjakom i medijanom malo (manje od 1°C) pomaknutim prema negativnim razlikama. Standardna devijacija je za TPW indeks manja nego kod ostala dva, isto vrijedi i za raspon podataka. Iz slike 29b uočljivo je da se normiranjem uzorka na udaljenost od radiosondažnih postaja dobilo poželjno smanjenje poluširine raspodjele, odnosno manja raspršenost uzorka. Ako se ovi zaključci usporede sa zaključcima dobivenim iz linearne regresije vidimo da je generiranje satelitskog TPW indeksa pokazalo najmanju pogrešku (u odnosu na ostala dva indeksa). To bi moglo upućivati na činjenicu da se PRM metodom bolje mogu prikazati koncentracije vodene pare u atmosferi nego vertikalni profili temperature.

### 3.6.4. Testiranje značajnosti Monte Carlo metodom

Zbog otežanog pridjeljivanja teorijske raspodjele promatranim uzorcima, odnosno vrijednostima satelitskih i radiosondažnih indeksa, pojавio se problem primjene odgovarajućeg statističkog testa

za provjeru značajnosti kovarijance. Iz toga se razloga ovdje posegnulo za tzv. *Monte Carlo* metodom koja se bazira na ponavljanju nasumičnog uzorkovanja osnovnog skupa. Konkretno, od 50 vrijednosti satelitskih i 50 vrijednosti radiosondažnih indeksa, za pojedini indeks, nasumično se izabire 40 vrijednosti. Uvjet je da parovi vrijednosti pripadaju istoj radiosondažnoj postaji. Između dobivena dva skupa od 40 vrijednosti indeksa izračunava se koeficijent korelaciije. Postupak se ponavlja 1000 puta tako da se dobije 1000 koeficijenata korelaciije koje se prikazuje histogramom (slika 30).



**Slika 30.** Histogrami varijanci dobivenih Monte Carlo metodom za  $K$  indeks (a),  $LI$  indeks (b) i  $TPW$  indeks (c).

Histogrami ukazuju na približno normalnu raspodjelu koeficijenata korelacije. Crvenom linijom na histogramima su markirane vrijednosti stvarnih koeficijenata korelacije čije su značajnosti ovom metodom trebale biti testirane. I bez egzaktnog određivanja nivoa značajnosti, vizualnim pregledom histograma i relativnog položaja testirane kovarijance, možemo zaključiti da su kovarijance signifikantne i to za vrlo usku područja prihvaćanja.

## 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu pokušali su se verificirati globalni indeksi nestabilnosti (K, KO, LI i TPW indeks). Indeksi su dobiveni sintezom kratkoročne prognoze i satelitskih mjerena, uz pomoć PRM metode. Želja je bila verificirati indekse u danima pogodnima za razvoj duboke, mokre konvekcije u 'čistom zraku'. Ovakva vrsta procesa u atmosferi, odnosno troposferi, češća je u topnjem dijelu godine, uvjetovana termičkim uvjetima te količinom vlažnosti zraka u atmosferi. U tu svrhu je stoga odabrano pet slučajeva (od A do E) od kojih četiri odabrana dana pripadaju topnjem dijelu godine (A-D), dok jedan primjer (E) prikazuje stabilnu zimsku situaciju bez uočenih konvektivnih zbivanja. Svi slučajevi se odvijaju u povoljnim sinoptičkim uvjetima za konvekciju; bilo u prizemnom bezgradijentnom polju ili u cikloni praćeni visinskim jugozapadnim, sjeveroistočnim ili sjeverozapadnim strujanjem.

Na temelju verifikacije uočeno je da se KO indeks pokazao lošim za prognoziranje konvekcije i to iz dva razloga. Prvi je taj što indeks nije pokazivao tipične vrijednosti koje se mogu povezati sa realnim stanjem nestabilnosti u atmosferi. Te vrijednosti su u svim slučajevima bile pretjerane (preniske), ukazujući na jaku nestabilnost. Pomicanjem granične vrijednosti s 0 °C mogla se poboljšati procjena potencijalne konvektivne aktivnosti. Drugi veći nedostatak je nemogućnost generiranja KO indeksa na velikom dijelu domene promatranja zbog izostanka izobarne plohe 1000 hPa. Sličan problem pojavio se i s određivanjem K indeksa na mjestima gdje nema izobarne plohe veće ili jednake 850 hPa (izraženo na području Alpa).

Promatrajući kombinirane prikaze intenziteta indeksa i satelitski detektirane naoblake u tri različita dnevna termina treba uočiti da se jutarnja raspodjela intenziteta indeksa (od 04:00 UTC do 08:00 UTC), za promatrane primjere A, B i C vrlo dobro poklapa s mjestima nastanka konvektivne naoblake. Pojava i područje konvekcije potvrđeno je pojmom električnih pražnjenja. Raspodjela vrijednosti indeksa u trenutku nastanka konvekcije ukazala je na povećanje nestabilnosti na mjestima na kojima je došlo do konvekcije i/ili na nova područja nestabilnosti na kojima se kasnije pojavila konvekcija. To pokazuje korisnost praćenja raspodjele indeksa tijekom cijelog dana. U zimskom slučaju (E), vrijednosti indeksa su bile takve da su ukazivale na iznimnu stabilnost (posebno K i LI indeks), što je bilo u suglasju s odsustvom električnog pražnjenja u promatranoj domeni.

Lošija korelacija između intenziteta triju indeksa u jutarnjim satima i nastanka konvekcije u poslijepodnevnim satima (s naglaskom na LI indeks) uočena je u primjeru D. Najveću nestabilnost indeksi su pokazali na rubnim područjima oblaka, gdje se anomalija indeksa uslijed spomenutog pretjeranog generirana vlažnosti od strane PRM modela i očekivala. Ovaj primjer pokazuje da postoje situacije kada globalni indeksi nestabilnosti krivo 'prognoziraju' konvektivne sustave.

Razlike koje se mogu uočiti u mjestu prikaza nestabilnosti od strane indeksa i mjesta manifestacije konvekcije moguće su zbog pogreške u samom generiranju indeksa, ali i zbog advekcijske zračnih masa prevladavajućim strujanjem zraka (kao npr. u primjeru A). Sama vrijednosti indeksa su ukazivale na potencijalnu konvekciju na puno širem području od područja gdje se konvekcija detektirala, premda su lokalni maksimumi dobro ukazivali na mjesta pojave konvekcije. Tu se pokazuje potreba za smanjenjem graničnih vrijednosti kod K i TPW indeksa, odnosno povećanjem iste kod LI indeksa. Okvirna korekcija granične vrijednosti bi za K indeks bila  $+10^{\circ}\text{C}$ , LI indeks  $-4^{\circ}\text{C}$  i TPW indeks  $+20 \text{ mm oborive vode}$ . U primjeru B može se zamijetiti i negativno svojstvo RPM modela koji daje veće koncentracije vlažnosti zraka u blizini oblaka, što se manifestira povećanom nestabilnosti u sva tri relevantna indeksa. Treba napomenuti da na mjestima gdje imamo naoblaku nemamo generirane indekse.

Prikazi vremena pojave, intenziteta i visina na kojima su se detektirale munje (npr. slika 7) pokazali su da konvekcija svoj razvoj započinje 2 do 3 sata nakon što su na nju ukazivali usrednjeni indeksi. Puni razvoj konvekcije je uslijedio 5 do 10 sati kasnije, čime je omogućena ‘prognoza’ konvekcije od 2 do 10 sati unaprijed. Unatoč manjim razlikama u intenzitetu i visini detekcije munja (osobito u odnosu na polaritet) kod promatranih primjera, najveći broj munja ima vrijednosti intenziteta oko 4 kA na visinama od 6 do 10 km.

Pomoću indeksa nestabilnosti izračunatih iz podataka radiosondažnih mjerena na 10 postaja unutar domene promatranja, koji su prihvaćeni kao stvarni pokazatelji stanja u atmosferi, proveden je pokušaj objektivne verifikacije satelitskih indeksa. Promatrajući indekse u pet navedenih primjera dobiven je uzorak od 50 vrijednosti jednih i drugih indeksa u 00:00 UTC. Crtanjem dijagrama raspršenja između podataka radiosondažnih indeksa (nezavisna slučajna varijabla) i satelitskih indeksa (zavisna slučajna varijabla), za pojedini indeks (K, LI i TPW), i primjenom linearne regresije dobiveni su koeficijenti smjera vrlo bliski jedinicima ( $0.914$ ,  $0.801$  i  $1.010$ , redom). Vrlo visoke su bile i vrijednosti koeficijenata korelacije između dva skupa podataka ( $0.934$ ,  $0.942$  i  $0.963$ , redom). Visok nivo značajnosti dokazao se *Monte Carlo* metodom. Iz osnovnih statističkih parametara i histograma razlika radiosondažnih i satelitskih podataka može se zaključiti da razlike imaju približno normalu raspodjelu sa srednjacima koji ne odstupaju znatno od nule i standardnim devijacijama od maksimalnih 5 jedinica (u slučaju K indeksa). Najpoželjniji koeficijent smjera, koeficijent korelacije, srednjak i standardnu devijaciju razlike indeksa ima TPW indeks, za koji se može zaključiti da se generira s najmanjom pogreškom unutar PRM modela. Za ostala dva testirana indeksa (K i LI) isti model je pokazao manje uspješne, ali ipak vrlo dobre rezultate generiranja indeksa. To može upućivati na činjenicu da PRM model bolje prikazuje sadržaj vodene pare u atmosferi nego vertikalne profile temperature.

Iako bazirani na malom broju slučajeva može se zaključiti da su se satelitski indeksi nestabilnosti nad širim područjem Hrvatske pokazali korisnima u dijagnozi stabilnosti, odnosno nestabilnosti atmosfere. Sa svojom velikom prostornom i vremenskom rezolucijom prognostičarima mogu pružiti korisne informacije za prognozu konvektivnih sustava do 10 sati unaprijed. U tu svrhu formiranje jednog univerzalnog indeksa, koji bi sadržavao otežane vrijednosti svakog od ovdje korištenih indeksa nestabilnosti (sukladno njegovoj pouzdanosti), znatno bi unaprijedilo izradu što kvalitetnije svakodnevne prognoze.

## 5. LITERATURA

1. Anonymous: <http://www.srh.noaa.gov/ffc/?n=gloss2>
2. Anonymous: <http://www.wmo.int/pages/prog/www/WDM/Guides/Guide-binary-1A.html#Chapter2>
3. Anonymous: <http://www.iges.org/grads/>
4. 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.
5. 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, 2009.
6. 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, 2007.
7. 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.
8. Doswell, C. A. III (2001): Severe convective storms - an overview. Meteorological Monograph 28:27, AMS, 69 str.
9. Eyre J. R. (1991): A fast radiative transfer model for satellite sounding systems. ECMWF Research Dept. Tech. Memo. 176 (available from the librarian at ECMWF).
10. Franc B. (2008): Primjena geoinformacijskog sustava za analizu atmosferskog pražnjenja. Diplomski rad, FER, Sveučilište u Zagrebu, 59 str.
11. 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.

12. Galway J. G. (1956): The lifted index as a predictor of latent instability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **37**, 528–529.
13. Grisogono B., Belušić D. (2008): *Uvod u mezoskalnu meteorologiju i atmosfersku turbulenciju*. Geofizički odsjek, PMF, Sveučilište u Zagrebu, 14-18 str.
14. 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.
15. König M. (2002): Atmospheric Instability Parameters Derived from MSG SEVIRI Observations. Technical Memorandum No. 9, Programme Development Department, EUMETSAT.
16. Kurz M. (1993): Severe thunderstorms over western Germany—A case-study of the weather situation on 20 August 1992. *Meteorological Magazine*, **122**, 177–188.
17. Ma X.L., Schmit T.J., Smith W.L. (1999): A nonlinear physical retrieval algorithm – its application to the GOES-8/9 sounder. *Journal of Applied Meteorology*, **38**, 501-513.
18. Manzato A, (2003): A climatology of instability indices derived from Friuli Venezia Giulia soundings, using three different methods. *Atmospheric Research*, **67-68**, 417-454.
19. Mikuš P. (2010): Određivanje dominantnih tipova vremena i režima strujanja za vrijeme konvektivne aktivnosti nad Hrvatskom. Diplomski rad, PMF, Sveučilište u Zagrebu, 54 str.
20. 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 pp.
21. Rivas Soriano L., De Pablo F., Tomas C. (2005). Ten-year study of cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, **67** (16), 1632–1639.
22. Rodgers C.D. (1976): Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **14**, 609-624.
23. Saunders R.W., Matricardi M., Brunel P. (1999): An Improved Fast Radiative Transfer Model for Assimilation of Satellite Radiance Observations. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, **125**, 1407-1425.
24. Schmetz J., Pili P., Tjemkes S., Just D., Kerkmann J., Rota S., Ratier A. (2002): An introduction to Meteosat Second Generation (MSG). *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83**, 977–992.
25. Uglešić I., Milardić V., Milešević B., Franc B., Filipović-Grčić B. (2009): Uspostava sustava za lociranje munja u Hrvatskoj, Hrvatski ogrank međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sustave – CIGRÉ, 9. savjetovanje HRO CIGRÉ Cavtat, 8. - 12. studenoga 2009.

## 6. SAŽETAK

Duboka, mokra konvekcija koja nastaje u ‘čistom zraku’ jedna je od gotovo svakodnevnih pojava u atmosferi naših geografskim širinama, a i drugdje. Ovakva vrsta procesa češća je u toplijem dijelu godine, iz razloga što je termički uvjetovana i što toplijji zrak može prihvati veće količine vodene pare. Za razliku od npr. frontalne konvekcije, nastanak konvekcije u čistom zraku teže je prognozirati. To su situacije kada je u jutarnjim satima prisutna ‘mirna’ atmosfera, a već nekoliko sati poslije dolazi do intenzivnog razvoja konvektivnih oblaka koji su, između ostalog, uzrok mnogih šteta. Stoga je u radu promatrano četiri indeksa nestabilnosti (K, KO, LI i TPW) čije vrijednosti mogu vrlo dobro ukazivati na područja u atmosferi pogodna za razvoj konvekcije. Želja je bila napraviti njihovu verifikaciju za šire područje Hrvatske. Indeksi su dobiveni sintezom kratkoročne prognoze i satelitskih mjerjenja, uz pomoć tzv. PRM metode. Kao takvi imaju znatno bolju prostornu i vremensku rezoluciju (u usporedbi s npr. radiosondažnim mjerjenjima), a obuhvaćaju velika područja (veća od npr. radarskih mjerjenja). Konkretno, u ovom radu prostorna rezolucija indeksa je  $3 \times 3$  piksela, a vremenska 15 minuta. Verifikacija svih indeksa je napravljena za četiri ljetna dana i jedan za dan u hladnom dijelu godine.

Na temelju verifikacije uočeno je da se KO indeks pokazao lošim za prognoziranje konvekcije. Jedan od razloga je izostanak izobarne plohe 1000 hPa. Sličan problem pojavio se i kod generiranja K indeksa na mjestima gdje nema izobarne plohe veće ili jednake 850 hPa (izraženo na području Alpa).

Promatrajući kombinirane prikaze intenziteta indeksa i satelitski detektirane naoblake u tri različita dnevna termina treba napomenuti da se jutarnja raspodjela intenziteta indeksa (od 04:00 UTC do 08:00 UTC), za većinu promatranih dana vrlo dobro poklapa s mjestima nastanka konvektivnih oblaka. Pojava i područje konvekcije potvrđeno je pojmom električnih pražnjenja. Prikazi vremena pojave, intenziteta i visina na kojima su se detektirale munje pokazali su da konvekcija svoj razvoj započinje 2 do 3 sata nakon što su na nju ukazivali usrednjeni indeksi. Puni razvoj konvekcije je uslijedio 5 do 10 sati kasnije, čime je omogućena ‘prognoza’ konvekcije od 2 do 10 sati unaprijed. Raspodjela vrijednosti indeksa u trenutku nastanka konvekcije ukazala je na povećanje nestabilnosti na mjestima na kojima je došlo do konvekcije i/ili na nova područja nestabilnosti na kojima se kasnije pojavila konvekcija.

Razlike koje su se mogle povremeno uočiti u mjestu prikaza nestabilnosti od strane indeksa i mjesta manifestacije konvekcije javljale su se zbog pogrešaka u samom generiranju indeksa, ali i zbog advekcije zračnih masa prevladavajućim strujanjem zraka. Rezultati su ukazali na potrebu za smanjenjem graničnih vrijednosti kod K i TPW indeksa, odnosno povećanjem iste kod LI indeksa. Okvirna korekcija granične vrijednosti bi za K indeks bila  $+10^{\circ}\text{C}$ , LI indeks  $-4^{\circ}\text{C}$  i TPW indeks  $+20 \text{ mm}$  oborive vode.