



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO - MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK



Martina ČURIĆ, Tomislav STILINOVIĆ

---

ANALIZA INDEKSA NESTABILNOSTI ATMOSFERE NA  
TEMELJU RADIOSONDAŽA I DETEKCIJE MUNJA U  
HRVATSKOJ

---

Zagreb, 2014.

Ovaj rad izrađen je na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu, Geofizički odsjek, pod vodstvom doc. dr. sc. Maje Telišman Prtenjak i uz neposredno voditeljstvo Igora Kosa, mag. phys.-geophys. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2013./2014.

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
1.1	Motivacija . . . . .	1
1.2	Konvekcija i uvjetna nestabilnost . . . . .	2
1.3	Indeksi nestabilnosti . . . . .	2
1.3.1	Indeks podizanja, LI . . . . .	3
1.3.2	Konvektivna raspoloživa potencijalna energija, CAPE . . . . .	4
1.3.3	Energija inhibicije konvekcije, CIN . . . . .	4
1.3.4	K indeks . . . . .	5
1.3.5	Total Totals indeks, TT . . . . .	6
1.3.6	Showalter indeks, SI . . . . .	6
1.3.7	SWEAT indeks . . . . .	6
1.3.8	Bulk Richardsonov broj, BRN . . . . .	7
1.3.9	Indeks ukupne oborive vode, TPW . . . . .	7
1.3.10	Karakteristike atmosferskog graničnog sloja . . . . .	8
1.4	Naboj u kumulonimbusu i proces elektrifikacije . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Dosadašnja istraživanja u Hrvatskoj i svijetu</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Cilj rada</b>	<b>13</b>

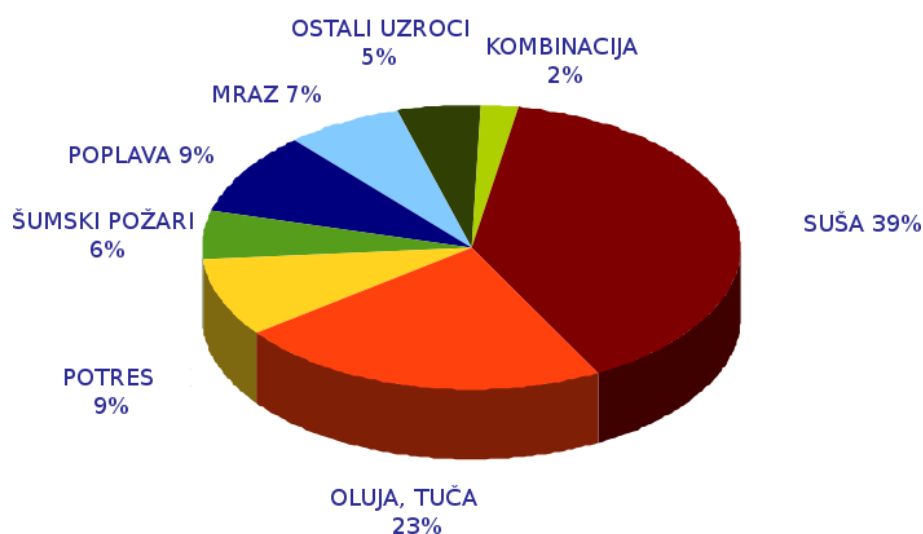
<b>4 Materijali i metode</b>	<b>14</b>
4.1 Radiosondažna mjerenja . . . . .	14
4.2 LINET . . . . .	15
4.3 Domena i pod-domene interesa . . . . .	16
<b>5 Rezultati i diskusija</b>	<b>18</b>
5.1 Karakteristike detektiranih munja u dvije odabrane regije . . . . .	18
5.2 Određivanje širine razreda odabranih indeksa nestabilnosti . . . . .	21
5.3 Analiza indeksa nestabilnosti atmosfere i prediktabilnost atmosfere . . . . .	23
5.3.1 Zadar-podnevna radiosondaža (12 UTC) . . . . .	23
5.3.2 Zagreb-podnevna radiosondaža (12 UTC) . . . . .	25
5.3.3 Zadar-ponoćna radiosondaža (00 UTC) . . . . .	29
5.3.4 Zagreb-ponoćna radiosondaža (00 UTC) . . . . .	33
5.3.5 Reprezentativnost sondaža . . . . .	34
<b>6 Zaključci</b>	<b>38</b>
<b>Zahvale</b>	<b>39</b>
<b>Literatura</b>	<b>40</b>
<b>Sažetak</b>	
<b>Summary</b>	
<b>Prilozi</b>	<b>i</b>
Prilog A . . . . .	i
Podne, 2009.-2013. Zagreb . . . . .	i
Podne, 2009.-2013. Zadar . . . . .	iii
Ponoć, 2009.-2013. Zagreb . . . . .	v
Ponoć, 2009.-2013. Zadar . . . . .	viii

Prilog B . . . . .	xi
--------------------	----

# 1 Uvod

## 1.1 Motivacija

Pojava konvekcije važan je proces u atmosferi koji može značajno utjecati na ljudski život i djelovanje budući da su posljedice konvekcije obilne oborine, tuča, olujni udari vjetra, pijavice, munje i dr. Velike ekonomske štete i prijetnje ljudskoj sigurnosti veliki su poticaj za istraživanje konvektivnih procesa i razvoj što točnije prognoze (slika 1.1). Razvoj konvektivne naoblake je relativno kratak proces zbog čega je teško prognozirati njegovu vremensku i prostornu domenu. Detekcija konvekcije moguća je na temelju radarskih i satelitskih podataka, podataka motrenja na postajama, podataka sondaža ili iz podataka o detekciji električnih pražnjenja (sijevanja), ali za sada još uvijek postoje određene poteškoće kod prikupljanja istih. U Hrvatskoj trenutno djeluju dva radara, na Bilogori i u Osijeku, ali oni ne pokrivaju područje Jadrana i veliki dio Like. Satelitski podaci u potpunosti pokrivaju cijelu površinu Hrvatske, ali mogu detektirati razvoj duboke konvekcije jedino u slučaju kada konvekcija nije prekrivena višom naoblakom. Motreni podaci o naoblaci i tipu oblaka u mreži postaja (automatskih i klimatoloških) mogu biti nedovoljno česti i nedovoljno gusti za detektiranje manjih konvektivnih sustava. Ra-



SLIKA 1.1: Štete uzrokovane prirodnim nepogodama u Hrvatskoj za razdoblje 1981.-2010. (Gajić-Čapka i sur., 2012).

diosondažna mjerenja u Hrvatskoj rade se samo na dvije postaje, Zagreb-Maksimir i Zadar-Zemunik i to samo dva puta dnevno. Jedna od trenutno najpouzdanijih metoda detekcije konvekcije je iz podataka o sijevanju, zato što se munje detektiraju jedino u konvektivnim oblacima, ali treba naglasiti da su podaci o detekciji munja dostupna tek u zadnjih nekoliko godina.

Navedene poteškoće kod prikupljanja podataka o pred-konvektivnim i konvektivnim uvjetima otežavaju točnost prognoze nastanka konvektivnih sustava (osobito onih koje se javljaju u tzv. "čistom zraku"); odnosno njihovog praćenja. Ispitivanje povezanosti nestabilnosti atmosfere (na temelju njenog mjerenog vertikalnog profila) i detektiranih konvektivnih sustava (pomoću detekcije munja) doprinosi boljoj prognozi konvekcije osobito onih manjih, ponekad i vrlo opasnih, teško predvidivih sustava. S obzirom na navedeno, točna prognoza duboke mokre konvekcije (osobito one lokalnog tipa) i dalje predstavlja veliki izazov pa time i kontinuiranu motivaciju za njeno istraživanje (npr. Sherwood i sur., 2010).

## 1.2 Konvekcija i uvjetna nestabilnost

U meteorologiji pod konvekcijom najčešće podrazumijevamo vertikalna gibanja koja se javljaju u fluidu što rezultira turbulentnim miješanjem i prijenosom svojstava tog fluida, za razliku od advekcije koja je horizontalno gibanje fluida. Najčešće se promatra prijenos vlage i topline jer su upravo ta dva parametra potrebna za nastanak konvektivnih oblaka. Preduvjeti za nastanak konvektivnih oblaka su dovoljna količina vlage u zraku, uvjetno nestabilna atmosfera i pokretački mehanizam za inicijalizaciju konvektivnog razvoja (Pandžić, 2002).

Izvori nestabilnosti u atmosferi su senzibilna i latentna toplina, koje su produkti sunčevog zagrijavanja i isparavanja u donjoj troposferi. Senzibilna toplina i vodena para konvekcijom se prenose u više dijelove troposfere. Ako je neka čest zraka zasićena i toplija od okoliša nastavit će se dizati, a ako je nezasićena i hladnija od okoliša spuštati će se. Sve to se odvija uz uvjet da je čest bila početno pomaknuta iz ravnotežne mirne atmosfere. Ukoliko je vertikalni otklon česti dovoljno velik da dosegne razinu kondenzacije, čest može postati uvjetno nestabilna, a upravo je to uvjet za nastanak konvekcije.

## 1.3 Indeksi nestabilnosti

Indeksi nestabilnosti su pokazatelji stanja atmosfere pogodnih za nastanak i razvoj konvektivnih oblaka, sustava i popratnih pojava, a možemo ih izračunati pomoću jednostavnih algoritama koji se temelje na vertikalnim profilima određenih atmosferskih parametara u nekom trenutku. Za dobivanje vrijednosti većine indeksa nestabilnosti

koristimo vrijednosti parametara na diskretnim nivoima (najčešće na standardnim izobarnim plohama) koji su pogodni za prikazivanje određenog svojstva, a kod računanja ostalih indeksa nestabilnosti vrijednost se dobiva vertikalnom integracijom stupca zraka. Budući da su vrijednosti indeksa nestabilnosti povezane s vjerojatnošću pojave konvektivnog razvoja, moraju postojati granične vrijednosti indeksa koje određuju stabilno ili nestabilno stanje atmosfere. Te granične vrijednosti nisu fiksne nego ovise o sinoptičkim uvjetima, geografskom položaju, klimatskim uvjetima i promatranoj sezoni. U ovom poglavlju bit će opisani (a kasnije i korišteni) indeksi nestabilnosti (tablica 1.1) koji su dobri pokazatelji mogućeg razvoja konvekcije.

TABLICA 1.1: Indeksi nestabilnosti  
(<http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices.php>).

Hrvatski naziv	Engleski naziv	Kratica
Indeks podizanja	Lifted index	LI
Konvektivna raspoloživa potencijalna energija	Convective Available Potential Energy	CAPE
Energija inhibicije konvekcije	Convective Inhibition	CIN
K indeks	K index	K
<i>Total Totals</i> indeks	Total Totals index	TT
<i>Showalter</i> indeks	Showalter index	SI
<i>SWEAT</i> indeks	Severe Weather Threat Index	SWEAT
Bulk Richardsonov broj	Bulk Richardson's number	BRN
Indeks ukupne oborive vode	Total Precipitable Water	TPW

### 1.3.1 Indeks podizanja, LI

LI je definiran kao razlika temperature okolnog zraka na visini na kojoj je tlak 500 hPa ( $T_{500ok}$ ) i temperature koju bi čest imala kada bi se s početnog tlaka  $p$  i početne temperature  $T$  adijabatički digla na tlak od 500 hPa ( $T_{500č}$ ). Definiran je jednadžbom:

$$LI = T_{500ok} - T_{500č}, \quad (1.1)$$

gdje je

$$T_{500č} = T \left( \frac{500}{p} \right)^{\frac{R_m}{C_{pm}}}. \quad (1.2)$$

$R_m$  je specifična plinska konstanta vlažnog zraka, a  $C_{pm}$  je specifični toplinski kapacitet vlažnog zraka pri konstantnom tlaku. Kada je LI pozitivan, uvjeti u atmosferi su stabilni, a kada je negativan, uvjeti u atmosferi su nestabilni (tablica 1.2).



TABLICA 1.2: Vrijednosti LI ( $^{\circ}\text{C}$ ) za različite uvjete u atmosferi za razvoj slobodne konvekcije (<http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices.php>).

LI > 0	Stabilno, ali postoji mogućnost za slabu konvekciju za LI = 1-3 uz prisutno jako dizanje.
-3 < LI < 3	Granično nestabilno.
-6 < LI < -3	Umjereno nestabilno.
-9 < LI < -6	Jako nestabilno.
LI < -9	Ekstremno nestabilno.

### 1.3.2 Konvektivna raspoloživa potencijalna energija, CAPE

CAPE predstavlja količinu raspoložive energije koju čest ima na raspolaganju za vertikalno ubrzanje zbog uzgona. Definira se kao:

$$\text{CAPE} = g \int_{z_{\text{LFC}}}^{z_{\text{LNB}}} \frac{T_p - T_e}{T_e} dz, \quad (1.3)$$

gdje je  $g$  ubrzanje sile teže,  $z_{\text{LFC}}$  visina slobodne konvekcije,  $z_{\text{LNB}}$  visina razine neutralnog uzgona,  $T_p$  temperatura česti i  $T_e$  temperatura okoliša. CAPE daje mjeru maksimalne moguće kinetičke energije koju može imati nestabilna čest, a možemo ju prikazati kao površinu između temperature okoline i temperature česti od razine slobodne konvekcije (LFC) do razine neutralnog uzgona (LNB) (slika 1.2). Koncept CAPE-a vrlo je koristan u izvantropskim širinama, dok u tropskim krajevima nije od velike koristi zbog drugačijih mehanizama duboke mokre konvekcije kao što su latentna toplina, tipovi strujanja, itd. (Grisogono i Belušić, 2008). U slučaju nestabilne atmosfere CAPE može varirati od nekoliko stotina do nekoliko tisuća J/kg (tablica 1.3). Najveće zabilježene vrijednosti CAPE-a dosežu i do 7000 J/kg.

TABLICA 1.3: Vrijednosti CAPE-a (J/kg) za različite uvjete u atmosferi za razvoj slobodne konvekcije (<http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices.php>).

CAPE < 0	Stabilno.
0 < CAPE < 1000	Granično nestabilno.
1000 < CAPE < 2500	Umjereno nestabilno.
2500 < CAPE < 3500	Jako nestabilno.
CAPE > 3500	Ekstremno nestabilno.

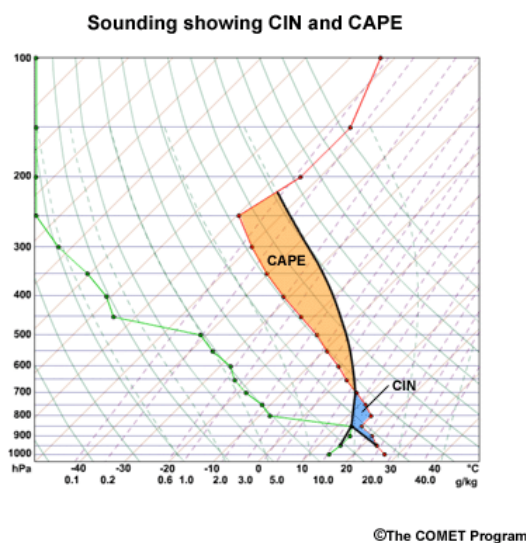
### 1.3.3 Energija inhibicije konvekcije, CIN

CIN je energija potrebna da se čest zraka adijabatički digne uvis iz početnog položaja do razine slobodne konvekcije. U slučaju velike energije inhibicije konvekcije neće doći do razvoja duboke konvekcije, unatoč tome što drugi uvjeti mogu biti vrlo povoljni za

razvoj konvekcije. CIN se definira kao:

$$\text{CIN} = g \int_{z_A}^{z_{\text{LFC}}} \frac{T_p - T_e}{T_e} dz, \quad (1.4)$$

gdje je  $z_A$  visina površine Zemlje iznad morske razine,  $z_{\text{LFC}}$  visina razine slobodne konvekcije,  $T_p$  temperatura česti,  $T_e$  temperatura okoliša i  $g$  ubrzanje sile teže. CIN možemo prikazati kao površinu između temperature okoline i temperature česti od površine Zemlje do razine slobodne konvekcije (LFC) (slika 1.2). Što su vrijednosti CIN-a manje forsiranje potrebno da se čest podigne na LFC je slabije, odnosno konvekcija je jača.



SLIKA 1.2: Prikaz CAPE-a i CIN-a na termodinamičkom dijagramu. Zelena linija predstavlja temperaturu rosišta, crvena linija temperaturu okoline, a crna linija temperaturu česti (<http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/skewt/cin.htm>).

### 1.3.4 K indeks

K indeks je mjera potencijala za razvoj grmljavinskog nevremena koja se temelji na vertikalnoj stopi promjene temperature, sadržaju vlage u nižoj troposferi i visini vlažnog sloja te je dobar indikator nestabilnosti u zračnoj masi. Definiran je kao:

$$K = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700}), \quad (1.5)$$

gdje su  $T_{850}$ ,  $T_{700}$  i  $T_{500}$  temperature zraka na izobarnim plohama 850, 700 i 500 hPa, a  $Td_{850}$  i  $Td_{700}$  temperature rosišta na 850 i 700 hPa, gdje su vrijednosti temperatura izražene u °C. Prvi član označava stopu ohlađivanja dok se drugi i treći član odnose na vlažnost između 850 i 700 hPa i pod velikim su utjecajem deficita rosišta na 700 hPa. Nestabilnost atmosfere raste s većom vrijednošću K indeksa, a općenito se uzima da je granična vrijednost između stabilnosti i nestabilnosti 20°C (tablica 1.4).

TABLICA 1.4: Vrijednosti K indeksa ( $^{\circ}\text{C}$ ) za različite uvjete u atmosferi za razvoj slobodne konvekcije (<http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices.php>).

$K < 20$	Stabilno.
$20 < K < 30$	Moguće grmljavinsko nevirijeme.
$K > 30$	Velika vjerojatnost za grmljavinsko nevirijeme.
$K = 40$	Najbolji potencijal za grmljavinsko nevirijeme.

### 1.3.5 Total Totals indeks, TT

TT indeks koristi se za određivanje područja u kojima je moguć razvoj grmljavinskog nevremena. TT je definiran kao:

$$TT = T_{850} + Td_{850} - 2T_{500}, \quad (1.6)$$

$T_{850}$  i  $T_{500}$  su temperature na 850 i 500 hPa, a  $Td_{850}$  rosište na 850 hPa. TT indeks ima različite vrijednosti pragova za različita geografska područja, a pragovi koji se koriste nad područjem umjerenih širina prikazani su u tablici 1.5.

TABLICA 1.5: Vrijednosti TT indeksa ( $^{\circ}\text{C}$ ) za različite uvjete u atmosferi za razvoj slobodne konvekcije (<http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices.php>).

$TT < 45$	Stabilno.
$45 < TT < 50$	Slab potencijal za nevirijeme.
$50 < TT < 55$	Mogući potencijal za nevirijeme.
$55 < TT < 60$	Veliki potencijal za nevirijeme.

### 1.3.6 Showalter indeks, SI

SI također je dobar za predviđanje konvektivnih nestabilnosti u atmosferi. Definiran je kao:

$$SI = T_{500ok} - T_{500\check{c}}, \quad (1.7)$$

gdje je  $T_{500ok}$  temperatura okoline na 500 hPa, a  $T_{500\check{c}}$  temperatura česti na 500 hPa. Mana mu je što temperatura na 500 hPa nije nužno reprezentativna za uvjete u prizemnom sloju. U tablici 1.6 su prikazane vrijednosti SI indeksa za različite uvjete u atmosferi za razvoj slobodne konvekcije.

### 1.3.7 SWEAT indeks

SWEAT indeks je mjera potencijala za razvoj konvekcije. U SWEAT-u se kombinira nekoliko parametara: rosište na 850 hPa, nestabilnost (TT indeks), brzine vjetra na

TABLICA 1.6: Vrijednosti SI indeksa ( $^{\circ}\text{C}$ ) za različite uvjete u atmosferi za razvoj slobodne konvekcije (<http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices.php>).

$\text{SI} > 0$	Stabilno, ali je moguća slaba konvekcija za $\text{SI} = 1-2$ .
$0 > \text{SI} > -3$	Umjereno nestabilno – vjerojatno grmljavinsko nevrijeme.
$-4 > \text{SI} > -6$	Jako nestabilno – mogućnost jačeg grmljavinskog nevremena.
$\text{SI} < -6$	Ekstremno nestabilno – mogućnost vrlo jakog grmljavinskog nevremena.

nižoj i srednjoj razini (850 i 500 hPa) i advekcija toplog zraka između 850 i 500 hPa. Svrha ovog indeksa je povezivanje kinematičkih i termodinamičkih informacija u jedan indeks, a definiran je jednadžbom:

$$\text{SWEAT} = 12Td_{850} + 20(\text{TT} - 49) + 2f8 + f5 + 125(S + 0.2) \quad (1.8)$$

gdje  $f8$  i  $f5$  predstavljaju vjetar na 850 i 500 hPa u čvorovima, TT je Total Totals indeks, a  $S$  je opisan jednadžbom  $S = \sin(\text{smjer vjetra na 500 hPa} - \text{smjer vjetra na 850 hPa})$ . Za vrijednosti SWEAT indeksa između 250 i 300 postoji potencijal za nevrijeme ako je prisutno snažno dizanje zraka, za vrijednosti veće od 300 postoji veliki potencijal za grmljavinsko nevrijeme, a kada je SWEAT veći od 400 postoji potencijal za nastanak tornada.

### 1.3.8 Bulk Richardsonov broj, BRN

BRN je dobar indikator tipova konvekcije. On uključuje CAPE i vertikalno smicanje horizontalnog vjetra, što su dobri faktori u određivanju nastanka, razvoja i položaja nevremena. BRN je definiran kao:

$$\text{BRN} = \frac{\text{CAPE}}{0.5U^2} \quad (1.9)$$

gdje je  $U$  mjera vertikalnog smicanja vjetra u sloju od 0 do 6 km. U tablici 1.7 vidimo granične vrijednosti BRN-a za različite uvjete u atmosferi.

### 1.3.9 Indeks ukupne oborive vode, TPW

TPW dobivamo integracijom količine vlage u promatranom stupcu zraka. Izražava se u milimetrima vodenog stupca koji bi se dobio na jediničnoj površini kada bi se sva vodena para u stupcu atmosfere kondenzirala. Količina vodene pare u atmosferi je, uz nestabilnost atmosfere i postojanje procesa koji uzrokuju dizanje zraka, važan čimbenik u procesu nastanka i daljnjeg razvoja duboke konvekcije. TPW indeks se u umjerenim

TABLICA 1.7: Vrijednosti BRN za različite uvjete u atmosferi  
(<http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices.php>).

BRN < 10	Jako vertikalno smicanje vjetra i slab CAPE; smicanje vjetra može biti prejako za slabi uzgon i ne dolazi do razvoja konvektivnih uzlaznih struja, međutim, uz veliko forsiranje može doći do razvoja nevremena.
10 < BRN < 45	Povezan s razvojem superćelija.
BRN > 50	Relativno slabo vertikalno smicanje i jak CAPE; mogući je razvoj multićelijske oluje.

širinama kreće od 0 mm do 45 mm. Za ovaj indeks nemamo određenu graničnu vrijednost između stabilnosti i nestabilnosti, međutim, vrijednost manja od 10 mm ukazuje na suhu atmosferu u kojoj ne očekujemo nastanak konvekcije.

### 1.3.10 Karakteristike atmosferskog graničnog sloja

Već je spomenuto da je količina vlažnosti atmosfere jedan od tri ključna faktora za nastanak konvekcije. Osim njenog udjela u sredini troposfere, važnu ulogu igra i količina vlažnosti u najnižem atmosferskom graničnom sloju (AGS), osobito ako je sinoptičko forsiranje slabije. Tada se razvija sustav lokalne cirkulacije vjetra koji često stvara prizemne zone konvergencije i lokalno dizanje zraka putem međudjelovanja lokalnih fronti. U tim uvjetima količina vlažnosti u AGS-u ima važnu ulogu u generiranju konvekcije, a usko je povezana s temperaturom zraka u AGS-u. Stoga je korisno pratiti karakteristike potencijane temperature<sup>1</sup> usrednjene u najnižih 500 m unutar AGS-a (*eng.* (mean mixed layer theta) i usrednjenog omjera mješanja  $r$  (*eng.* mean mixed mixing ratio)<sup>2</sup> u istom sloju.

## 1.4 Naboj u kumulonimbusu i proces elektrifikacije

Konvektivni oblaci koji će biti analizirani u ovom radu su kumulonimbusi (Cb). Kumulonimbus je oblak velikog vertikalnog razvoja (slika 1.3). Nastaje kao posljedica termala koji vertikalno prenose vodenu paru u više slojeve troposfere i donje slojeve stratosfere. Osnovna građevna jedinica Cb-a je konvektivna stanica, što je područje relativno jakih uzlaznih struja. Olujne Cb stanice mogu proizvesti obilne kiše koje uzrokuju poplave, povezane su s jakim udarima vjetra, pojavom munja, a u ekstremnim slučajevima i razvojem tornada. Većina konvektivnih stanica nestane nakon približno 20 minuta, ali ako postoji dovoljno topline i vlage u atmosferi vrlo brzo mogu nastati nove stanice. To

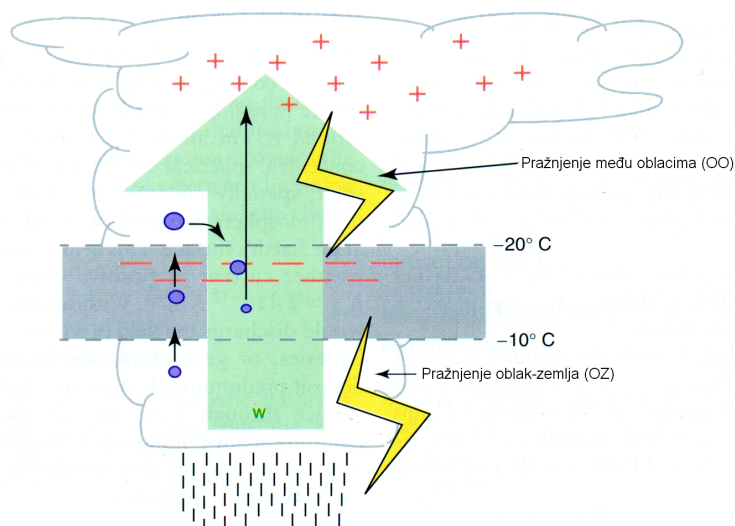
<sup>1</sup>Temperatura  $\Theta$ (K) koju bi imala čest zraka kad bi se adijabatičkim procesom dovela na tlak od 1000 hPa

<sup>2</sup>Omjer mase vodene pare  $m_v$  i mase suhog zraka  $m_d$  u vlažnoj česti zraka čija je masa  $m_m = m_v + m_d$



SLIKA 1.3: Bočni prikaz kumulonimbusa (Cb) u njegovoj zreloj fazi (<http://science-edu.larc.nasa.gov/SC00L/images/Cb10.jpg>).

može uzrokovati oluje koje traju po nekoliko sati. Cb mogu prouzročiti i opasne zimske oluje koje su karakterizirane munjama i pljuskovima snijega. Električno pražnjenje, tj. munja je brza redistribucija električnog naboja u Cb ili između Cb i njegovog okruženja. Električni naboji u Cb induciraju se na elementima oblaka (jezgre kondenzacije, jezgre sublimacije, kapi kiše, ledene čestice i kristali). Shematizirani prikaz idealizirane raspodjele naboja unutar oblaka vidimo na slici 1.4. Kružići predstavljaju hidrometeore koji se u naletu vjetrova gibaju uvis ili, ako su teži, padaju te se pritom sudaraju s manjim česticama. Gravitacijsko razdvajanje lakših, pozitivno nabijenih čestica i težih negativno nabijenih čestica dovodi do raspodjele naboja. Nabijene čestice naboja istog predznaka u oblaku su prostorno odvojene neutralnim zrakom koji je loš vodič elektriciteta. Zbog turbulencije dolazi do pomicanja pojedinih čestica i područja istoimenog naboja unutar



SLIKA 1.4: Shematski prikaz naboja unutar oblaka (Holton, 2002).

oblaka pa dolazi do mijenjanja jakosti električnog polja. Kada vrijednost električnog polja prijede kritičnu vrijednost od 1 MV/m dolazi do izbijanja električne iskre, tj. do pojave munje. Postoje četiri tipa električnog izboja: unutar istog oblaka, između dva oblaka, između oblaka i okolnog zraka i između oblaka i tla (Uman, 2001). Prva tri tipa nazivamo pražnjenje među oblacima (OO), dok četvrti tip koji dolazi do tla nazivamo pražnjenje oblak-zemlja (OZ).

## 2 Dosadašnja istraživanja u Hrvatskoj i svijetu

Na istraživanju duboke konvekcije radi se intenzivno duži niz godina (npr. Cotton i sur., 2011). Neka istraživanja pokušala su povezati nestabilne uvjete atmosfere i mogućnost prognoze opasnih pojava na temelju radiosondažnih profila. Groenemeijer i van Delden (2007) su ispitivali uspješnost indeksa dobivenih sondažom u prognozi tuče i tornada na području Nizozemske. Između ostalog su uočili da je tuča velikog zrna ( $> 3$  mm) povezana s većim vrijednostima CAPE-a koje nadilaze prosječne vrijednosti za oluje. Istovremeno je prisutno i jače smicanje u prvih 6 km čije daljnje povećanje ne utječe na povećanje zrna tuče. U slučaju tornada pokazalo se da CAPE nije bio značajan prediktor konvekcije jer se njegove vrijednosti nisu razlikovale od onih u olujama koje nisu bile praćene pojavom tornada.

Pineda i sur. (2010) su na temelju objektivne metode (metode glavnih komponenata) analizirali tipove vremena kada se pojavljivalo sijevanje iznad Katalonije (Španjolska). U razdoblju 2003.-2007., koristeći podatke prizemnog polja tlaka na mreži od  $1^\circ \times 1^\circ$  svakih šest sati dobili su devet najčešćih vremenskih tipova kada su se detektirala električna pražnjenja. Svrstali su ih u tri osnovne grupe: one koji se odnose na sinoptičke sustave i prolazak fronti, one koji su povezani s mezoskalnim sustavima i termički induciranom konvekcijom i one koji su posljedica sunčevog zagrijavanja i lokalne cirkulacije. Analiza atmosferskih indeksa nestabilnosti (CAPE, LI) nije ukazala na neke tipične vrijednosti za svaki pojedini tip vremena.

Manzato (2003) je u svojoj studiji izradio klimatologiju konvektivnih indeksa nestabilnosti koje vrijede za Udine (Italija). Pri tome je koristilo 5050 radiosondažnih podataka za topli dio godine u razdoblju od 1995. do 2001. Mjera za odabir konvektivnog dana bila je pojava munja OZ tipa (barem tri pražnjenja u šest sati) na temelju čega je definirao parametar broja munja. Radio je korelacije između parametra broja munja i 30-ak indeksa nestabilnosti (između ostalih i većine u tablici 1.1), te je uočio veću primjenjivost/upotrebljivost K indeksa kada je u pitanju bila prognoza "intenziteta" konvekcije. Također je naglasio da se posebna pažnja mora posvetiti nekim parametrima koji uključuju vjetar.

Nakon instalacije senzora za praćenje električnih pražnjenja na području Hrvatske, domaći



znanstvenici također posvećuju sve više pažnje ovoj problematici. Istovremeno novi tip mjerenja dopušta određenu usporedbu s dosad prevladavajućom klimatologijom grmljavine, odnosno broja grmljavinskih dana (npr. Penzar i sur., 2001; Zaninović i sur., 2008). Mikuš i sur. (2012) izrađuju klimatologiju sijevanja (konvektivne aktivnosti) duž čitave Hrvatske koja je bila podijeljena na šest geografskih regija, a četverogodišnje razdoblje 2006.-2009. je ukazalo da postoje neke osnovne razlike u godišnjem hodu munja između kopnenog i primorskog dijela Hrvatske. U unutrašnjosti, konvektivna aktivnost je intenzivnija ljeti i u poslijepodne, dok je noćna konvekcija češća nad Jadranom s manjim varijacijama tijekom ljeta i zime, a područje sjevernog Jadrana pokazalo se kao jedno od najkonvektivnijih u Hrvatskoj. Također je na temelju mjerenja munja određen povoljan tip vremena (prevladavaju ciklone i bezgradijentno prizemno polje tlaka) i dominantan režim strujanja (SW, NW, NE).

Smiljanić (2011) je pokušao odrediti granične vrijednosti (ranojutarnjih) indeksa nestabilnosti ( $K0^1$ , K, LI, TPW) dobivenih iz satelita koji bi upozorili na pojavu konvekcije. Pokazalo se da je  $K0$  loš parametar (jer sadrži u svojoj definiciji vrijednosti s 1000 hPa plohe koje nad planinskim područjima ne postoje). Ostali parametri osobito K i LI davali su puno bolje prognoze pojave konvekcije u "čistom zraku". Analizu je nastavio Bahorić (2012) ispitujući statističku vezu između satelitskih indeksa nestabilnosti u jutarnjim satima i pojavu munja u popodnevnim satima. Cilj je bio napraviti kombinirani indeks na bazi K, LI, i TPW indeksa kao jedinstvene prognostičke mjere konvekcije, ali s obzirom na relativno malen uzorak, kombinirani indeks je imao ograničenu primjenu.

---

<sup>1</sup> $K0 = 0.5[(\Theta_{e500} + \Theta_{e700}) - (\Theta_{e850} + \Theta_{e1000})]$ , gdje su  $\Theta_{e1000}$ ,  $\Theta_{e850}$ ,  $\Theta_{e700}$  i  $\Theta_{e500}$  ekvivalentne potencijalne temperature na izobarnim plohama 1000, 850, 700 i 500 hPa.

## 3 Cilj rada

Jedan od najvećih izazova s kojima se susreću meteorolozi današnjice je pojava konvekcije. Prognoistički modeli nerijetko ne prepoznaju, ili nedovoljno točno prognoziraju konvektivne procese i vremenske prilike koje oni donose. Važno je napomenuti da indeksi nestabilnosti opisuju tzv. pred-konvektivne uvjete te time nude mogućnost (bolje) prognoze konvekcije. Stoga je cilj ovog rada:

- (i) povezati indekse nestabilnosti iz radiosondažnih podataka sa stvarnom pojavom konvekcije nad područjem Hrvatske,
- (ii) pokušati odrediti granične vrijednosti pojedinog indeksa nestabilnosti iznad koje bi vjerojatnost uspješne prognoze konvekcije bila zadovoljavajuća,
- (iii) uočiti neke geografske specifičnosti pojave konvekcije na Jadranu i u kopnenom dijelu Hrvatske. Ukoliko se pokaže postojanje takve povezanosti, ona bi ukazala na mogućnost razvoja određenih metoda u svakodnevnoj operativnoj prognozi s ciljem pravovremenog uočavanja mogućih nepovoljnih uvjeta kako bi mogli pravovremeno intervenirati i pokušati umanjiti moguće štete.

## 4 Materijali i metode

U ovom radu proučavani su dani s konvektivnom aktivnošću na području Zagreba i Zadra za razdoblje od 1. siječnja 2009. do 31. prosinca 2013. godine. Za potrebe rada korišteni su podaci radiosondažnih postaja Zagreb ( $45^{\circ}49'N$ ,  $16^{\circ}02'E$ , 123 m) i Zadar ( $44^{\circ}07'N$ ,  $15^{\circ}22'E$ , 88 m), te podaci o sijevanju koje smo dobili iz sustava LINET (Betz i sur., 2009). Svi promatrani podaci obrađeni su pomoću programskog paketa MATLAB.

### 4.1 Radiosondažna mjerenja

Radiosondažna mjerenja u Hrvatskoj vrše se na dvije postaje: Zagreb - Maksimir i Zadar – Zemunik (slika 4.1), a mjerenja se odvijaju dva puta dnevno i to u 12 i 00 h po UTC. Podaci radiosondažnih mjerenja u sebi sadrže informacije s razina na kojima pojedini meteorološki elementi znatnije odstupaju od linearnosti (signifikantne razine), te određenih standardnih izobarnih ploha kao što su: 1000, 925, 850, 700, 500 hPa itd. Podaci radiosondažnih mjerenja preuzeti su s internetske stranice Sveučilišta u Wyomingu (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>), a za potrebe rada

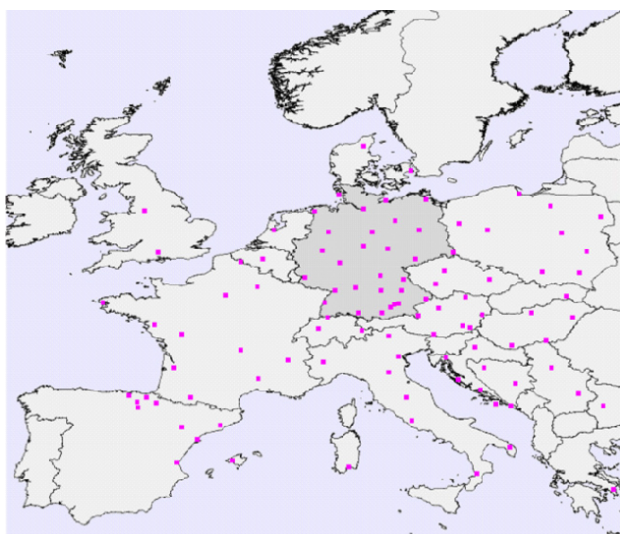


SLIKA 4.1: Potpuno automatizirani radiosondažni sustav na postaji Zadar-Zemunik (DHMZ, 2008).

korišteni su podaci o indeksima nestabilnosti (tablica 1.1), potencijalnoj temperaturi usrednjenom u najnižih 500 m unutar AGS-a i usrednjenom omjeru mješanja.

## 4.2 LINET

LINET (<https://www.nowcast.de/en/company.html>) je europski sustav za lociranje munja razvijen u Njemačkoj, gdje je instalirano 30 senzora, a ostali senzori, njih oko stotinjak, nalaze se u gotovo svim ostalim europskim državama (slika 4.2). U Hrvatskoj je do sada instalirano šest senzora i to u Dubrovniku, Splitu, Rijeci, Zagrebu, Zadru i Blatu na Korčuli. Osim njih, za detekciju na području Hrvatske koriste se i senzori locirani u susjednim zemljama, dva u Bosni i Hercegovini, dva u Srbiji, pet u Mađarskoj, sedam u Austriji i osam u Italiji. Preporučeno je da razmak između senzora ne bude manji od 200 km, ali oni su u stanju registrirati pražnjenja udaljena i 800 km od senzora (uz točnost lokacije od 100 m, Betz i sur., 2009). Sam sustav u mogućnosti je detektirati sve četiri vrste pražnjenja, a za potrebe ovog rada, koristili smo podatke o ukupnom pražnjenju, koje je jednako sumi svih ranije navedenih komponenti. Podaci koje smo dobili na raspolaganje ustupljeni su od strane Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ), a obuhvaćali su područje između 41-49° sjeverne geografske širine i 8-20.5° istočne geografske dužine. Datoteka s podacima (slika 4.3) sadržava informaciju o točnoj lokaciji, odnosno geografskoj duljini i širini pražnjenja (kolone 1 i 2), zatim informaciju o datumu i godini (kolona tri), točnom vremenu pražnjenja prikazanom u UTC-u s korakom od jedne minute (kolona 4), tipu pražnjenja (kolona 5; 1 označava pražnjenje tipa OZ, a 2 pražnjenje tipa OO), polaritetu munje i amplitudi struje izraženoj u kA (kolona 6), visini munje za pražnjenje tipa OO izraženoj u km (kolona 7) te pogrešci lokacije izraženoj u kilometrima (kolona 8).



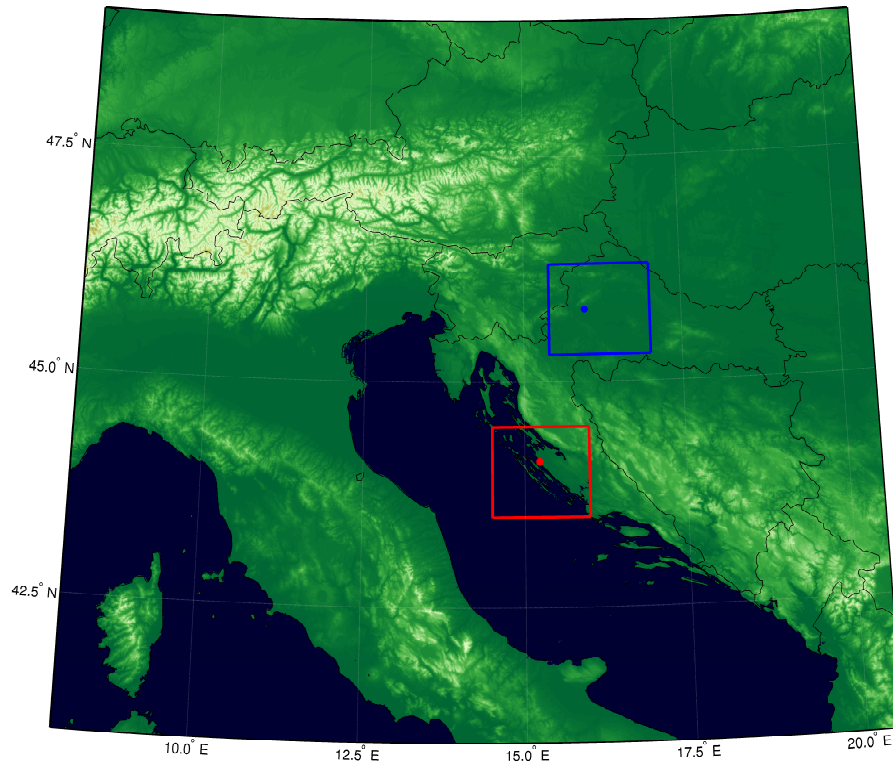
SLIKA 4.2: Mapa LINET senzora u Europi (Uglešić i sur., 2009).

40.1916	10.4695	20110201	0107	1	-64.4	0.0	0.060
41.8924	14.9628	20110201	0109	1	8.1	0.0	2.468
40.3058	10.4162	20110201	0128	2	-34.1	0.0	0.065
40.3128	10.4249	20110201	0128	1	-20.5	0.0	0.062
40.3192	10.4119	20110201	0129	2	22.6	0.0	0.080
40.3155	10.4005	20110201	0129	1	-30.3	0.0	0.092
40.3122	10.4001	20110201	0129	1	-16.4	0.0	0.093
40.2832	10.3682	20110201	0137	1	162.6	0.0	0.188
40.2780	10.3652	20110201	0137	1	-23.0	0.0	0.065
40.2618	10.3598	20110201	0137	1	19.4	0.0	0.063

SLIKA 4.3: Prikaz podatkovne datoteke za detekciju električnog pražnjenja. Prva i druga kolona sadržavaju informaciju o točnoj lokaciji (geografska duljina i širina) pražnjenja, treća kolona označava datum i godinu, kolona četiri predstavlja točno vrijeme pražnjenja prikazano u UTC-u s korakom od jedne minute, kolona 5 daje informaciju o tipu pražnjenja (1 - pražnjenje tipa OZ; 2 - pražnjenje tipa OO), polaritet munje i amplituda struje izražena u kA nalaze se u koloni šest, visina munje za pražnjenje tipa OO izražena u km nalazi se u koloni sedam, dok je u posljednjoj, koloni osam, prikazana pogreška lokacije izraženu u kilometrima.

### 4.3 Domena i pod-domene interesa

Prema preporuci Svjetske meteorološke organizacije, smatra se da radiosondažni profili daju razumnu informaciju o vertikalnoj strukturi atmosfere u radijusu od 300 km. Međutim, iako profili iznad 850 hPa mogu predstavljati atmosferske uvjete šireg područja, pa čak i na udaljenostima  $\sim 150$  km od točke mjerenja, ukoliko se radiosondaža izvodi iznad kompleksne orografije, donji dio profila može biti pod velikim utjecajem lokalnog terena. Time je reprezentativnost radiosondaže na većem području donekle ograničena; osobito u slučaju kada je utjecaj velike skale malen, a konvekcija je uzrokovana lokalnim faktorima. Zbog relativno rijetkog uzorkovanja (dva puta dnevno) treba imati u vidu i promjenu vremenskih uvjeta koji se događaju u intervalu od 12 sati, a koji nisu poznati. Zbog toga smo odredili reprezentativna područja za promatrane sondaže, kako bi eliminirali pražnjenja koja su se dogodila predaleko od promatranog područja. Za Zagreb je odabrano reprezentativno područje od  $15.4-17.0^{\circ}\text{E}$  i  $45.3-46.3^{\circ}\text{N}$ , a za Zadar  $14.5-16.0^{\circ}\text{E}$  i  $43.5-44.5^{\circ}\text{N}$ . Ova područja odabrana su proizvoljno, a prikaz ukupne domene za koju su bili dostupni podaci, te odabrana reprezentativna područja vidimo na slici 4.4. Reprezentativna područja u vremenskoj domeni također su odabrana proizvoljno, a za potrebe ovog rada promatrali smo periode od jednog sata prije te 10 sati nakon obavljanja samog radiosondažnog mjerenja. Odnosno, za sondažu u 12 UTC, promatrano je vremensko razdoblje između 11 i 22 UTC, dok je za sondažu u 00 UTC promatrani period bio između 23 i 10 UTC. Od ovako reduciranih podataka za električno pražnjenje bilo je potrebno definirati što ćemo proglasiti kao konvektivni dan, a odlučeno je da će se za isti proglasiti svi dani u kojem je unutar jednog sata bilo pet ili više pražnjenja. Navedena strategija odabira bila je malo stroža od one koju je predložio Manzato (2007) gdje je korišten prag od tri pražnjenja unutar 6 sati.



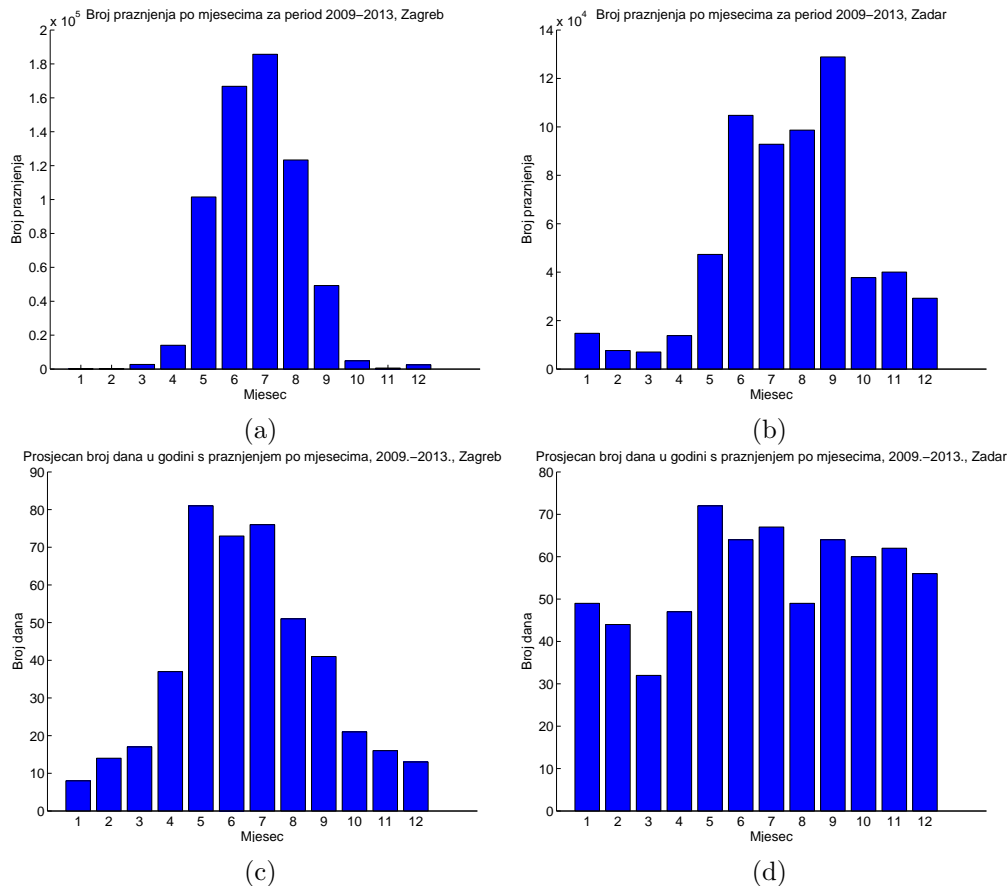
SLIKA 4.4: Prikaz domene s dostupnim LINET podacima uz promatrane pod-domene; plavi pravokutnik predstavlja reprezentativno područje oko Zagreba, a crveni oko Zadra. Plava i crvena točka označavaju radiosondažne postaje Zagreb i Zadar.

U radu smo promatrali dva seta podataka, prvi koji je sadržavao sve sondaže dostupne za promatrano razdoblje i drugi koji je sadržavao podatke samo za one dane koje smo proglasili konvektivnima. Cilj je bio uočiti određene korelacije između pojave dana s munjama i iznosa odabranih indeksa. Oba definirana seta podataka promatrat će se putem histograma što bi trebalo omogućiti procjenu korelacije. Cilj je uočiti kritične vrijednosti indeksa nakon kojih udio dana s munjama prelazi 60% udjela u setu podataka s ukupnim brojem dana. Kritične vrijednosti trebale bi dati odgovor na pitanje koji indeks je pouzdan u prognozi konvekcije. Ukoliko 60% nije optimalna mjera za određivanje granične vrijednosti ovisno o indeksu ona će se modificirati.

## 5 Rezultati i diskusija

### 5.1 Karakteristike detektiranih munja u dvije odabrane regije

Analiza električnog pražnjenja pokazala je ukupno 651561 slučaja registriranih udara u 666 dana, iznad reprezentativnih područja za Zagreb u odabranom petogodišnjem razdoblju. Za isto razdoblje u Zadru detektiran je nešto manji broj slučajeva, ukupno 622740 udara munja u 448 dana. Udari munja se ne događaju u pravilnim razmacima i nisu pravilno raspoređeni unutar godine, što možemo vidjeti na prikaznom godišnjem (slika 5.1) i dnevnom (slika 5.2) hodu. Najveći broj pražnjenja (kao mjera intenziteta) javlja se očekivano u ljetnim mjesecima, jer je ljeti zrak nestabilniji, a to pogoduje konvekciji. U zimskim mjesecima je broj pražnjenja značajno niži, a uzrok tome mogu biti česti stacionarni anticiklonalni sustavi praćeni maglom i niskim temperaturama (Zanić i sur., 2008). Maksimum broja pražnjenja za Zagreb dogodio se u srpnju koji je u prosjeku najtopliji mjesec u godini. Odmah nakon toga slijedi lipanj s nešto manjim brojem ukupnog pražnjenja. Raspodjelu broja pražnjenja po mjesecima usporedili smo s brojem dana s električnim pražnjenjem po mjesecima što predstavlja učestalost pojave. Velik broj dana s električnim pražnjenjem zabilježen je u periodu od svibnja do srpnja s maksimumom u svibnju. Rezultat se ponešto razlikuje od klimatologije dana s munjama koje su dobili Mikuš i sur. (2012) za kopnenu Hrvatsku čiji su rezultati ukazali na lipanj kao najkonvektivniji mjesec. Međutim, klimatologija učestalosti “konvektivnih” dana za sjeverozapadnu Hrvatsku od 2006-2009. pokazuje samo manje varijacije od svibnja do kolovoza. Uočene razlike proizlaze iz različitih analiziranih razdoblja, drugačijih prostornih domena i ponešto različitih definicija konvektivnog dana. Zanimljivo je uočiti da je u svibnju u kojem je zabilježeno najviše dana s munjama nema i najviše električnog pražnjenja. Broj pražnjenja (gustoća udara) vezan je uz samu strukturu (visinu i intenzitet) konvektivnih oblaka. U svibnju je pojava munja uzrokovana ciklonalnom aktivnošću za razliku od one u srpnju kada dominiraju lokalno manji, ali izuzetno duboki sustavi koji su praćeni snažnim turbulentnim vertikalnim gibanjima. Dublji vertikalni razvoj oblaka praćen je većim brojem pozitivnih električnih pražnjenja. Takva visinska raspodjela u skladu je s hipotezom da tipovi, ali i ukupan broj pražnjenja ovise o volumenu oblaka (Rivas Soriano i sur., 2005). Iako i zimi ima detektiranih dana s električnim

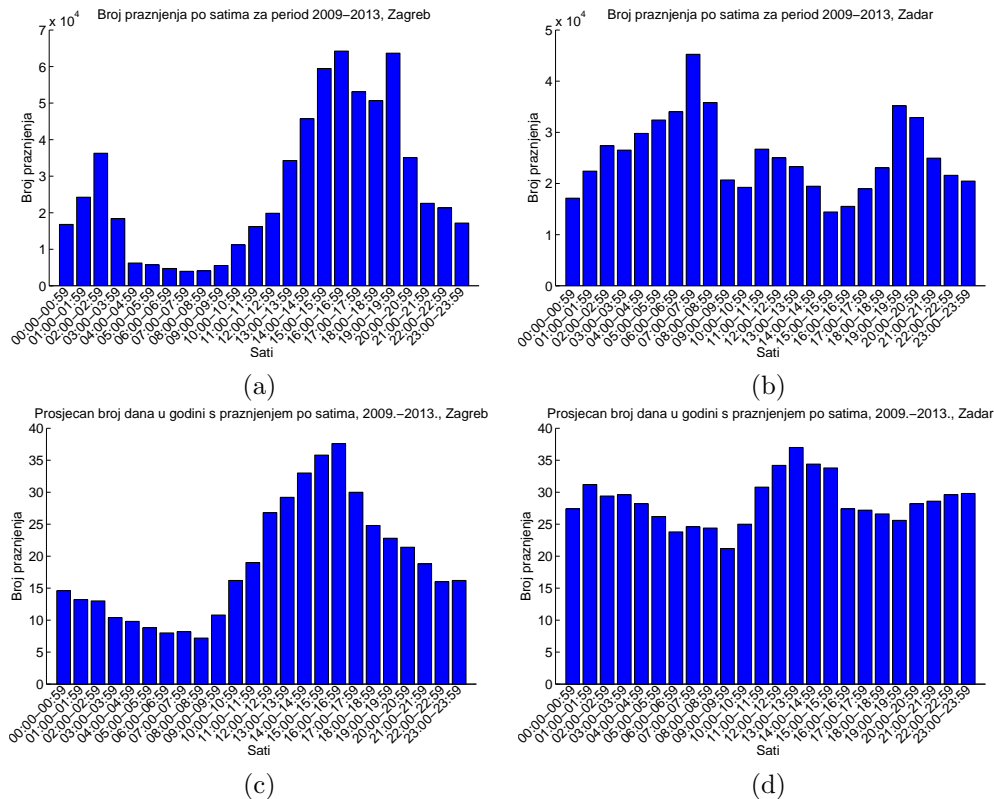


SLIKA 5.1: Godišnji hod ukupnog broja pražnjenja po mjesecima za Zagreb (a) i Zadar (b) te godišnji hod prosječnog broja dana s električnim pražnjenjem za Zagreb (c) i Zadar (d) za razdoblje 2009.-2013. godine.

pražnjenjima, kumulativna gustoća udara u odnosu na one tijekom toplog dijela godine je zanemariva.

Općenito broj detektiranih munja manji je u Zadru nego u Zagrebu što može biti posljedica odabira domene oko Zadra koja obuhvaća i more. Do sada je u više studija uočeno da je broj udara tijekom konvektivnog razvoja nad oceanima značajno manji nego iznad kopna i to u omjeru 1:10 (Seity i sur., 2001; Ávila i sur., 2010). Nadalje, u skladu s karakteristikama maritimne klime, raspodjela broja dana u Zadru s električnim pražnjenjem kontinuiranija je tijekom godine negoli u Zagrebu. Uočavaju se maksimum u svibnju te dva minimuma; glavni u ožujku i sekundarni u kolovozu. U odnosu na broj dana, u zimskim mjesecima postoji određena gustoća udara, iako puno manja nego ljeti na obali Jadrana. Također zimska gustoća udara na obali nadmašuje onu zimsku u unutrašnjosti. Zadar ima maksimum u broju zabilježenih udara u rujnu, zbog još uvijek relativno visoke temperature zraka i intenzivnijih ciklonalnih sustava koji se češće premještaju preko tog područja. Ovdje također imamo odstupanja od rezultata u Mikuš i sur. (2012) za središnju Dalmaciju. To područje bilježi maksimum pražnjenja u kolovozu, zatim u lipnju i srpnju, dok se rujna nalazi tek na petom mjestu, iza svibnja.





SLIKA 5.2: Dnevni hod ukupnog broja pražnjenja za Zagreb (a) i Zadar (b) te dnevni hod ukupnog broja dana s električnim pražnjenjem za Zagreb (c) i Zadar (d) za razdoblje 2009.-2013. godine.

Promatranjem dnevnog hoda za Zagreb možemo zaključiti da, i po broju pražnjenja (slika 5.2a) i po broju konvektivnih dana (slika 5.2c), konvektivna aktivnost počinje jačati u ranim poslijepodnevima nakon kraće noćne aktivnosti i relativnog zatišja od 4-9 UTC. Ovakva dnevna raspodjela posljedica je dnevnog hoda temperature jer viša temperatura pogoduje razvoju konvektivnih oblaka. Konvektivna aktivnost na području sjeverozapadnog dijela Hrvatske raste između 10 i 15 UTC te doseže maksimum između 15-17 UTC što se podudara s rezultatima u Mikuš i sur. (2012) za Središnju Hrvatsku. U ovdje analiziranom razdoblju, ističu se maksimumi u ukupnom broju pražnjenja između 16-17 UTC i 19-20 UTC. Međutim, treba naglasiti da iako se popodnevni maksimum (16-17 UTC) u gustoći udara podudara s maksimumom u broju dana kada su detektirane munje, večernji maksimum nema takvo podudaranje. Slično nepodudaranje u dnevnim hodovima može se uočiti i za noćne konvektivne slučajeve u intervalu 2-3 UTC. Ovi lokalni maksimumi upućuju na postojanje sustava koji su rjeđi, ali vrlo intenzivni.

Za Zadar, dnevni hodovi nemaju takvu pravilnost i značajno su različiti od onih u unutrašnjosti. Dnevni hod broja dana (slika 5.2d) pokazuje skoro uniformnu raspodjelu tijekom čitavih 24 sata s nešto povećanom učestalošću konvektivne aktivnosti između 12-16 UTC. Broj pražnjenja (slika 5.2b) pokazuje da je dnevna konvekcija češća, ali slabijeg intenziteta. Nasuprot tome, konvektivna aktivnost počinje jačati u večernjim satima postizujući lokalni maksimum između 19-21 UTC. Tijekom noći konvekcija je relativno

učestala s najvećim intenzitetom u razdoblju od 7-8 UTC. Na takvu raspodjelu utječe blizina mora, zbog većeg toplinskog kapaciteta u odnosu na kopno i većeg udjela vodene pare u zraku. More je noću toplije od kopna što pogoduje konvekciji. Ovaj rezultat je u skladu s drugim studijama koje su analizirale prostorno-vremenske raspodjele munja i koje su pokazale da se najveća gustoća munja zbiva u obalnim (planinskim) područjima koja imaju veliku učestalost prelaska ciklona i konvergentnih zona (Christian i sur., 2003). Za Zadar je zabilježeno više noćnih električnih pražnjenja nego za Zagreb, što se slaže također s rezultatima iz Petrova i sur. (2009), gdje se promatrala konvektivna aktivnost za dva ljetna perioda.

## 5.2 Određivanje širine razreda odabranih indeksa nestabilnosti

Nakon napravljene analize po mjesecima odlučili smo fokusirati svoje istraživanje na topli dio godine, od travnja do rujna, zato što je najveći broj pražnjenja zabilježen u tom periodu. To je konzistentno s drugim istraživanjima na području Europe (Manzato, 2007; Höller i sur., 2009; Mikuš i sur., 2012). Preostale podatke prikazali smo u tablici 5.1.

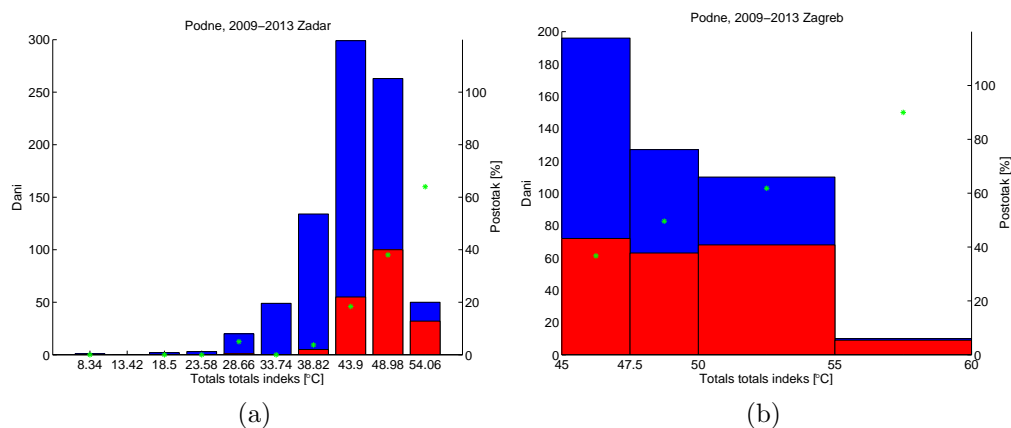
TABLICA 5.1: Broj pražnjenja, broj dana s električnim pražnjenjem i udio broja dana s električnim pražnjenjem za razdoblje od travnja do rujna (2009.-2013.).

	Broj pražnjenja	Broj dana	Udio
Zadar 00UTC	263934	139	20%
Zadar 12UTC	194466	213	23%
Zagreb 00UTC	143548	119	13%
Zagreb 12UTC	466463	261	29%

U toploj sezoni, za odabrano petogodišnje razdoblje, iznad reprezentativnog područja za Zagreb, zabilježili smo ukupno 610 011 udara munja u 290 dana. Taj broj čini 38% od svih promatranih dana. Za isto razdoblje u Zadru zabilježili smo 458420 slučaja udara munja u 279 dana, što čini 36% od svih promatranih dana. Udjeli konvektivnih dana nešto su niži od udjela u Mikuš i sur. (2012) za Hrvatsku, gdje je konvektivni dani čine 56% od svih promatranih dana. Razlike su nastale zbog različitog opsega područja promatranja.

Koristeći podatke o broju električnih pražnjenja za topli dio godine i podatke o indeksima nestabilnosti napravili smo prikaze pomoću histograma za Zagreb i Zadar. Važno je napomenuti da prikazani histogrami nemaju jednaku širinu svih razreda. Širine smo određivali tako da pronađemo što bolju vezu između indeksa nestabilnosti i dana s električnim pražnjenjem za promatrano područje, uzimajući u obzir granične vrijednosti

za indekse koje su definirane u uvodu. Prikazat ćemo primjer određivanja širine razreda za TT indeks za Zadar u 12 UTC. Na slici 5.3 plavom bojom su prikazani svi promatrani dani, crvenom dani kada je zabilježeno električno pražnjenje, a zelenom zvjezdicom postotak dana s električnim pražnjenjem. Uzimajući u obzir tablicu 1.5, u kojoj su prikazane vrijednosti TT indeksa za različite uvjete u atmosferi za razvoj slobodne konvekcije, odredili smo širine razreda koje nam daju najbolji odnos postotka dana s električnim pražnjenjem, kako bi mogli odrediti graničnu vrijednost stabilnosti atmosfere. Zatim smo nacrtali histogram na kojem su prikazani podaci koji se nalaze unutar novoodređenih širina razreda. Na slici 5.3b plavom bojom su prikazani svi dani kada je TT indeks bio unutar intervala između 45 i 60°C, crvenom bojom su iz tih dana izdvojeni dani s pražnjenjem, a zelenom zvjezdicom postotak dana s električnim pražnjenjem. Iako je na oba histograma zabilježen trend porasta postotka dana s električnim pražnjenjem s povećanjem TT indeksa, na slici 5.3b imamo više vrijednosti postotaka, odnosno moguće je prognozirati mogućnost nastanka konvekcije s većom preciznošću. Kod nekih indeksa (npr. SWEAT) imali smo problema s određivanjem granica zato što nismo bili u mogućnosti postići kontinuirani porast udjela dana s električnim pražnjenjem s povećanjem ili smanjivanjem vrijednosti indeksa. U tim slučajevima odlučili smo se za najbolju moguću raspodjelu. Potrebno je naglasiti da kada smo odredili razrede i granice za neki indeks, njih smo koristili za sva četiri intervala promatranja (Zadar podne, Zagreb podne, Zadar ponoć, Zagreb ponoć).



SLIKA 5.3: TT indeks: prikaz s jednakom širinom razreda (a), prikaz s određenim granicama (b). Plavom bojom su prikazani svi promatrani dani, crvenom bojom dani kada je zabilježeno električno pražnjenje i zelenom zvjezdicom postotak dana s električnim pražnjenjem.

## 5.3 Analiza indeksa nestabilnosti atmosfere i prediktabilnost atmosfere

### 5.3.1 Zadar-podnevena radiosondaža (12 UTC)

Na slici 5.4 su prikazani rezultati za Zadar u 12 UTC. Plavom bojom su prikazani svi dani kada je određen indeks nestabilnosti bio u granicama koje smo odredili prethodno opisanim postupkom, a crvenom bojom su iz tih dana izdvojeni dani s električnim pražnjenjem. Podaci s točnim vrijednostima postotka dana s električnim pražnjenjem u odnosu na sve promatrane dane nalaze se u tablicama u prilogu A, dok su u prilogu B prikazane srednje vrijednosti i medijani indeksa nestabilnosti za sve dane od travnja do rujna i za dane s električnim pražnjenjem za isti vremenski period.

Na slici 5.4a prikazani su dani kada je SI bio unutar određenih granica ( $-6^{\circ}\text{C}$  do  $4^{\circ}\text{C}$ ). Primjećujemo trend porasta vjerojatnosti dana s električnim pražnjenjem kako SI poprima niže vrijednosti. Već za SI između  $1^{\circ}\text{C}$  i  $2^{\circ}\text{C}$  imamo udio od 47% za grmljavinsko nevrijeme, tako da smo za graničnu vrijednost uzeli  $\text{SI} < 2^{\circ}\text{C}$ . Dobili smo dobro slaganje s prije određenim granicama koje su prikazane u tablici 1.6, gdje je za graničnu vrijednost nestabilnosti uzeta vrijednost  $\text{SI} < 0^{\circ}\text{C}$ , ali je napomenuto da za  $\text{SI} = 1^{\circ}\text{C}$  i  $2^{\circ}\text{C}$  također može doći do konvekcije uz prisutno jako dizanje zraka.

Za relativno sličan indeks, LI (slika 5.4b), dobili smo još bolje rezultate, što je očekivano jer se radi o prizemno podignutoj česti. Kao graničnu vrijednost uzeli smo  $\text{LI} < 0^{\circ}\text{C}$ , zato što u intervalu od  $-2^{\circ}\text{C}$  do  $0^{\circ}\text{C}$  imamo vjerojatnost od 60% da će biti grmljavinskog nevremena. Naša granica nestabilnosti slaže se s granicom prikazanom u tablici 1.2, uz napomenu da je za vrijednosti  $\text{LI} = 1-3^{\circ}\text{C}$  također moguć razvoj konvekcije uz prisutno jako dizanje.

Na slici 5.4c prikazana je raspodjela SWEAT indeksa koji osim podatka o temperaturi uključuje i vjetar. Najveći udio dana s olujama je u slučaju kada je SWEAT između 300 i 400 te iznosi 50%. To se podudara s teorijskim granicama opisanim u uvodu, gdje je rečeno da za SWEAT veći od 300 postoji veliki potencijal za grmljavinsko nevrijeme. Iz tog razloga odlučili smo se za granicu nestabilnosti za vrijednosti  $\text{SWEAT} > 300$ .

K indeks (slika 5.4d) obuhvaća temperaturu i vlagu i očekivano smo dobili bolju povezanost većih vrijednosti K indeksa kod veće učestalosti munja. Za graničnu vrijednost smo odabrali  $\text{K} > 27.5^{\circ}\text{C}$ , a najveću vjerojatnost smo dobili za K između  $30^{\circ}\text{C}$  i  $35^{\circ}\text{C}$  i ona iznosi 60%. U tablici 1.4 vidimo malo nižu granicu za nestabilnu atmosferu i ona iznosi  $\text{K} > 20^{\circ}\text{C}$ . Ovdje određena granična K vrijednost znatno nadilazi vrijednost od  $\text{K} = 15^{\circ}\text{C}$  koju je koristio Bahorić (2012). Autor također dobiva nelinearan porast vrijednost K indeksa s pojavom konvekcije što se slaže s našim rezultatima. U njegovoj studiji za vrijednost K indeksa od  $20^{\circ}\text{C}$  do  $25^{\circ}\text{C}$  vjerojatnost pojave konvekcije iznosi približno

10-20% te za vrijednosti veće od 35°C vjerojatnost nastanka konvekcije je iznad 90%.

TT indeks je dao jako dobre rezultate i na slici 5.4e možemo primijetiti porast postotka dana s električnim pražnjenjem kako TT indeks raste. Za graničnu vrijednost smo odredili  $TT > 50^{\circ}\text{C}$  jer je vjerojatnost za nevjrijeme u rasponu od 50°C do 55°C čak 57%. Za vrijednosti TT indeksa od 55°C do 60°C imamo 100% vjerojatnost za grmljavinsko nevjrijeme, ali tu treba uzeti u obzir da smo za samo 5 dana imali tako visok TT indeks. Ova granica nestabilnosti malo je viša od one prikazane u tablici 1.5, koja iznosi  $TT > 45^{\circ}\text{C}$ .

Na slici 5.4f prikazana je raspodjela CAPE-a po razredima. CAPE je jako osjetljiv parametar i njegove vrijednosti mogu izrazito varirati s promjenom prizemnih vrijednosti temperature i vlage. Kod ovog indeksa nam je jako bitan i njegov oblik na termodinamičkom dijagramu, tj. ne mora značiti da za istu vrijednost CAPE-a imamo iste vjerojatnosti za grmljavinsko nevjrijeme, što nam dodatno otežava određivanje granice za nestabilnost. Rezultati ipak pokazuju da je CAPE najčešće u intervalu od 100-1000 J/kg gdje, u ovom slučaju, imamo vjerojatnost od 55% za razvoj oluja tako da smo  $CAPE > 100$  J/kg odredili za graničnu vrijednost nestabilnosti. Da su velike vrijednosti CAPE mjerene, ali ipak rijetke, pokazuje i broj slučajeva u razredu između 1000-2200 J/kg. Rezultat se poklapa s Mikuš i sur. (2012) koji su pokazali da CAPE varira ovisno o tipu vremena i tipu strujanja, ali da se u prosjeku (iako uz veliki rasap) kreće oko 200-350 J/kg.

Na slici 5.4g prikazani su dani kada je CIN bio unutar zadanih granica. Promatrajući operativno CIN na termodinamičkom dijagramu, ili prostornu raspodjelu npr. iz modela, možemo vidjeti da “teorijska” vrijednost CIN-a ne znači puno za samu konvekciju, isto kao “teorijska” vrijednost CAPE-a. Problem je i što ne možemo izmjeriti sondažu točno na mjestu gdje nastaje konvekcija, netom prije nego nastane. Sondirani CIN se vrlo brzo mijenja pod utjecajem sinoptičkih i mezoskalnih procesa. Navedeni procesi konvergencijom vlage i strujanja, te dizanjem zraka na većim područjima ili lokalnim dizanjem vrlo brzo smanjuju CIN na vrlo lokaliziranom području, što onda potiče razvoj duboke konvekcije. Međutim može se uočiti da je su CIN vrijednosti uglavnom do  $-150$  J/kg, odnosno da vrijednosti CIN-a do  $-100$  J/kg dopuštaju razvoj oluja. Granična vrijednost za nestabilnost je  $CIN > -100$ . Maksimalnu vjerojatnost za dan s pražnjenjem vidimo u intervalu od  $-100$  J/kg do  $-50$  J/kg i ona iznosi 58%.

Na slici 5.4h prikazani su dani kada je BRN indeks bio između 2.5 i 85. Prema našim podacima udio oluja raste s povećanjem BRN; tako da u intervalu od 10 do 35 postoji vjerojatnost za nevjrijeme od 56%. Granična vrijednost za stabilnost atmosfere je  $BRN > 10$ . Što je veća vrijednost BRN-a, veći je CAPE koji pogoduje konvekciji, a manje je vertikalno smicanje vjetra što daje vjerojatnost do 65%. Zanimljivo je da je udio dana s BRN-om većim od 35 manji u odnosu na razred s BRN-om u intervalu od 10 do 35. To indicira da je udio broja superćelija češći od multićelija koje se razvijaju kada je

BRN > 50. Dobiveni rezultati se općenito dobro slažu s granicama iz tablice 1.7 gdje je određena ista granica za nestabilnost, uz napomenu da i za BRN < 10 može doći do razvoja oluje, ali uz jako forsiranje.

Karakteristike AGS-a pokazuju najpovoljnije uvjete za razvoj olujnih formacija. Općenito s povećanjem temperature (slika 5.4i) i vlažnosti (slika 5.4j) u AGS-u povećava se vjerojatnost za konvekciju. Ipak, to povećanje nije jednoznačno. Dok povećanje prizemne vlažnosti skoro kontinuirano pridonosi pojavi konvekcije, povećanje temperature pokazuje negativnu povratnu spregu u odnosu na konvekciju nakon 300 K. Najvjerojatnije su izrazito visoke temperature povezane s istovremenim smanjenjem vlažnosti i vrlo slabim vjetrom (tišinama) čime se ne ostvaruju svi uvjeti za dizanje vlažnog zraka. U uvjetima slabog gradijenta prizemnog tlaka u Zadru se često formira obalna cirkulacija koja pridonosi prizemnoj advekciji nešto hladnijeg, ali i vlažnijeg morskog zraka nad kopno (Telišman Prtenjak i Grisogono, 2007). Optimalni uvjeti su usrednjena potencijalna AGS temperatura između 285 i 310 K te usrednjeni  $r$  unutar 10 i 16 g/kg.

Na slici 5.4k prikazani su dani kada je TPW unutar određenih granica. Taj indeks je dobar pokazatelj raspoložive vlage. Za graničnu vrijednost uzeli smo TPW > 25 jer je vjerojatnost da će biti grmljavinskog nevremena u granicama od 25 mm do 35 mm 35% i raste s povećanjem TPW. Na sljedećem intervalu od 35 mm do 45 mm imamo vjerojatnost za dan s pražnjenjem od 67%.

### 5.3.2 Zagreb-podnevena radiosondaža (12 UTC)

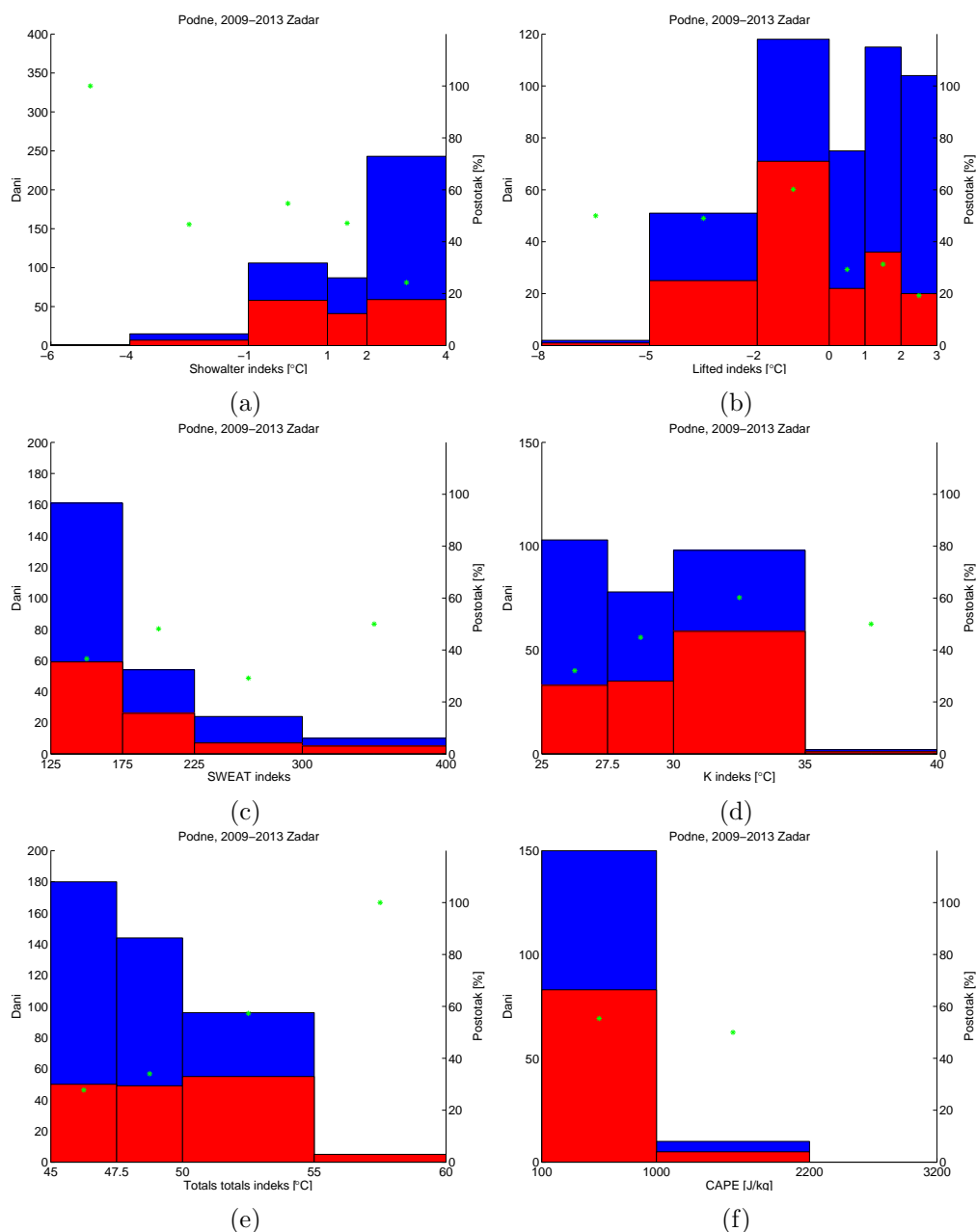
Na slici 5.5 prikazani su rezultati za Zagreb u 12UTC. Na slici 5.5a prikazani su dani kada je SI indeks bio unutar prethodno određenih granica. Za Zagreb smo dobili malo bolje udjele dana s električnim pražnjenjem nego za Zadar u istom terminu što je u skladu s kontinentalnim dnevnim hodom i dominantnom poslijepodnevnom konvekcijom. Za SI između 1°C i 2°C zabilježena je vjerojatnost od 56% za grmljavinsko nevrijeme. Budući da je raspodjela postotaka bila slična odlučili smo se za istu granicu nestabilnosti SI < 2°C.

Raspodjela LI (slika 5.5b) za Zagreb također pokazuje bolju povezanost indeksa s munjama nego za Zadar u istom terminu, osim u intervalu od -2°C do 0°C gdje je malo veći postotak dana s pražnjenjem zabilježen u Zadru. Opet smo se odlučili za istu graničnu vrijednost kao za Zadar, LI < 0°C.

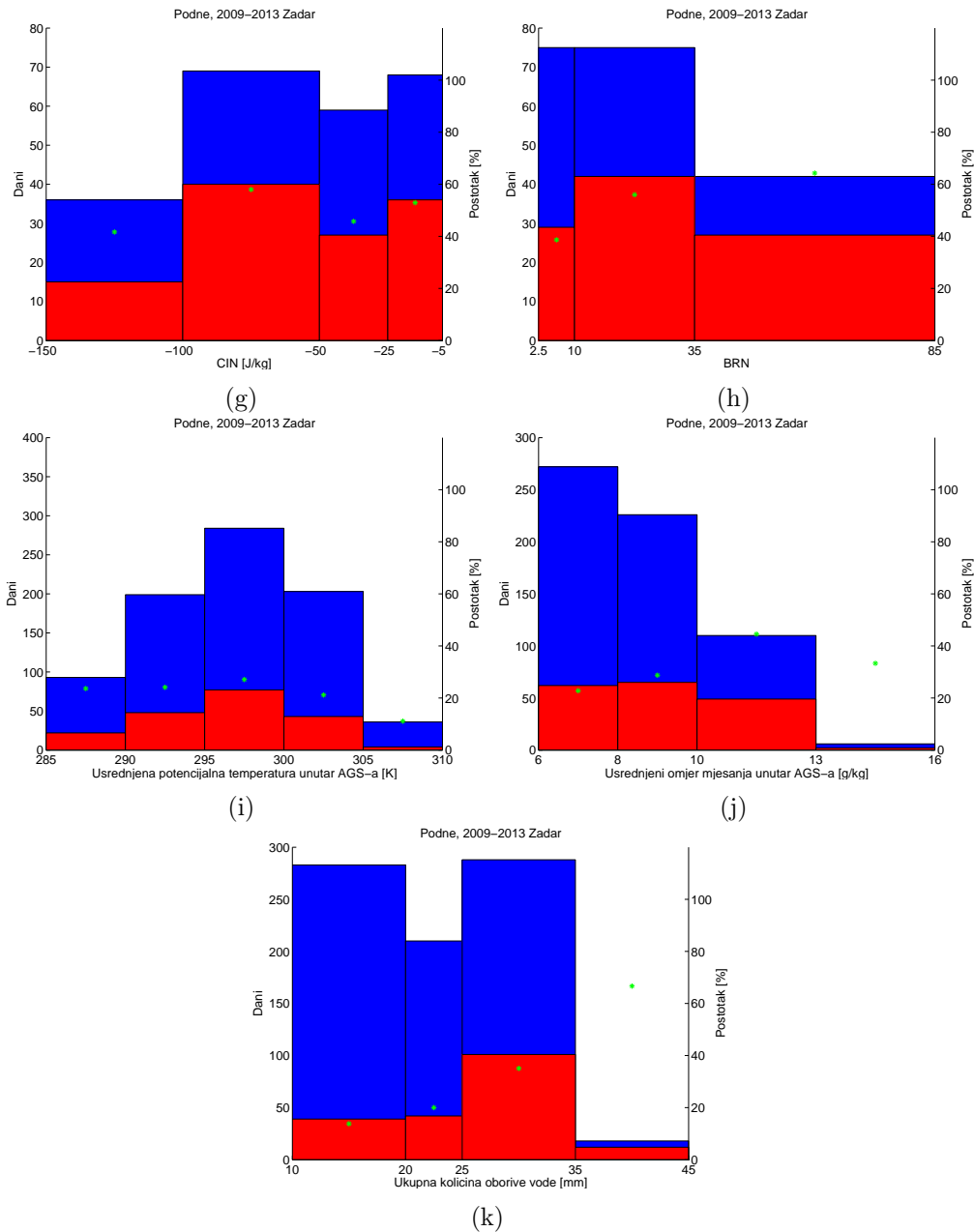
Na slici 5.5c prikazana je raspodjela SWEAT indeksa po razredima za Zagreb koja se dosta razlikuje od raspodjele za Zadar u istom terminu. Za Zadar smo maksimalan postotak imali za SWEAT između 300 i 400 (50%), a za Zagreb maksimalan postotak imamo za SWEAT između 175 i 225 (64%). Postoci za intervale SWEAT indeksa od 225 do 300 i 300 do 400 dosta su visoki i iznose 48% i 46%. Iz tog razloga smo se odlučili za graničnu vrijednost nestabilnosti za SWEAT > 175. Ta granica malo odstupa od

granica opisanih u uvodu gdje je za najnižu vrijednost SWEAT indeksa, za koju je moguća konvekcija uz snažno dizanje zraka, određena vrijednost od  $SWEAT = 250$ .

K indeks (slika 5.5d) za Zagreb pokazuje bolju povezanost između porasta svojih vrijednosti i detektiranih munja nego za Zadar. Primjećujemo gotovo linearan porast vrijednosti postotaka s porastom vrijednosti K indeksa. U ovom slučaju odlučili smo se za isti prag nestabilnosti  $K > 27.5^{\circ}\text{C}$  zato što je raspodjela postotaka slična kao za Zadar.



SLIKA 5.4: Histogrami indeksa nestabilnosti iz tablice 1.1; SI (a), LI (b), SWEAT (c), K (d), TT (e), CAPE (f), CIN (g), BRN (h), usrednjena potencijalna temperatura unutar AGS-a (i), usrednjeni omjer mješanja unutar AGS-a (j) i TPW (k) za podatke radiosondaža u Zadru u podne, 12 UTC. Plavom bojom su prikazani svi promatrani dani, crvenom bojom su prikazani dani kada je zabilježeno električno pražnjenje i zelenom zvjezdicom postotak dana s električnim pražnjenjem.



SLIKA 5.4: Nastavak

Možemo primijetiti da za  $K > 35^{\circ}\text{C}$  imamo vjerojatnost od 100% za dan s električnim pražnjenjem, ali treba uzeti u obzir da smo zabilježili samo 6 dana s takvom vrijednošću  $K$  indeksa.

Na slici 5.5e prikazana je raspodjela  $TT$  indeksa po razredima. Ovdje također primjećujemo gotovo linearan porast dana s električnim pražnjenjem s povećanjem  $TT$  indeksa. Vjerojatnost za dan s električnim pražnjenjem za Zagreb u intervalu od  $47.5^{\circ}\text{C}$  do  $50^{\circ}\text{C}$  iznosi 50%, dok je za Zadar ta vjerojatnost manja i iznosi 34%. Budući da su rezultati za Zagreb bolje usporedivi nego za Zadar, odlučili smo se za manju granicu nestabilnosti  $TT > 47.5^{\circ}\text{C}$ .



Na slici 5.5f prikazana je raspodjela CAPE indeksa po razredima. Vrijednosti CAPE-a više su od onih izračunatih za Zadar i mogu poprimiti vrijednosti do 3000 J/kg. Prema rezultatima Mikuš i sur. (2012) velike vrijednosti CAPE-a ( $> 1000$  J/kg) najčešće se pojavljuju u dva vremenska tipa: u gotovo bezgradijentnom prizemnom polju tlaka ili tijekom postojanja prednje strane visinske doline nad Hrvatskom. Vrijednosti postotaka za dane s pražnjenjem za Zagreb neznatno su više nego za Zadar. Granična vrijednost za nestabilnost je ista kao za Zadar,  $CAPE > 100$  J/kg.

Na slici 5.5g prikazna je raspodjela CIN indeksa po razredima; vrlo slično kao i u priobalju. Maksimalnu vjerojatnost za dan s pražnjenjem za Zagreb imamo na intervalu od  $-100$  J/kg do  $-50$  J/kg i ona iznosi 53%, što je malo manja vjerojatnost nego za Zadar u istom intervalu u istom terminu. Granična vrijednost za nestabilnost je  $CIN > -100$  J/kg.

Kod raspodjele BRN-a po razredima za Zagreb (slika 5.5h) vidimo razlike u odnosu na Zadar. Za Zagreb se maksimum vjerojatnosti dana s pražnjenjem nalazi na intervalu od 10 do 35 i iznosi 60%. Zatim se ta vjerojatnost smanjuje na intervalu od 35 do 85 na 47%. Graničnu vrijednosti odredili smo za  $BRN > 10$ . Budući da je BRN broj dobiven dijeljenjem CAPE parametra i polovinom kvadrata vertikalnog smicanja vjetra, za veće vrijednosti BRN-a potrebne su veće vrijednosti CAPE indeksa i/ili male vrijednosti vertikalnog smicanja vjetra. Analiza radiosondažnih indeksa u razdoblju 2006.-2009. (Mikuš i sur., 2012.) pokazala je da su manje vrijednosti BRN-a karakteristike formacija nižeg tlaka osobito ciklona i dolina. Najveće vrijednosti BRN pridružene su gotovo bezgradijentnom polju tlaka kada je utjecaj mezoskalnih efekata (lokalne konvergencije u polju strujanja zbog npr. cirkulacije vjetra obronka) od presudnog značenja za pojavu konvekcije. Vrijednosti BRN-a upućuju da je udio konvekcije povezane s niskim tlakom nešto učestalija u razdoblju 2009.-2013. od one u drugim vremenskim tipovima.

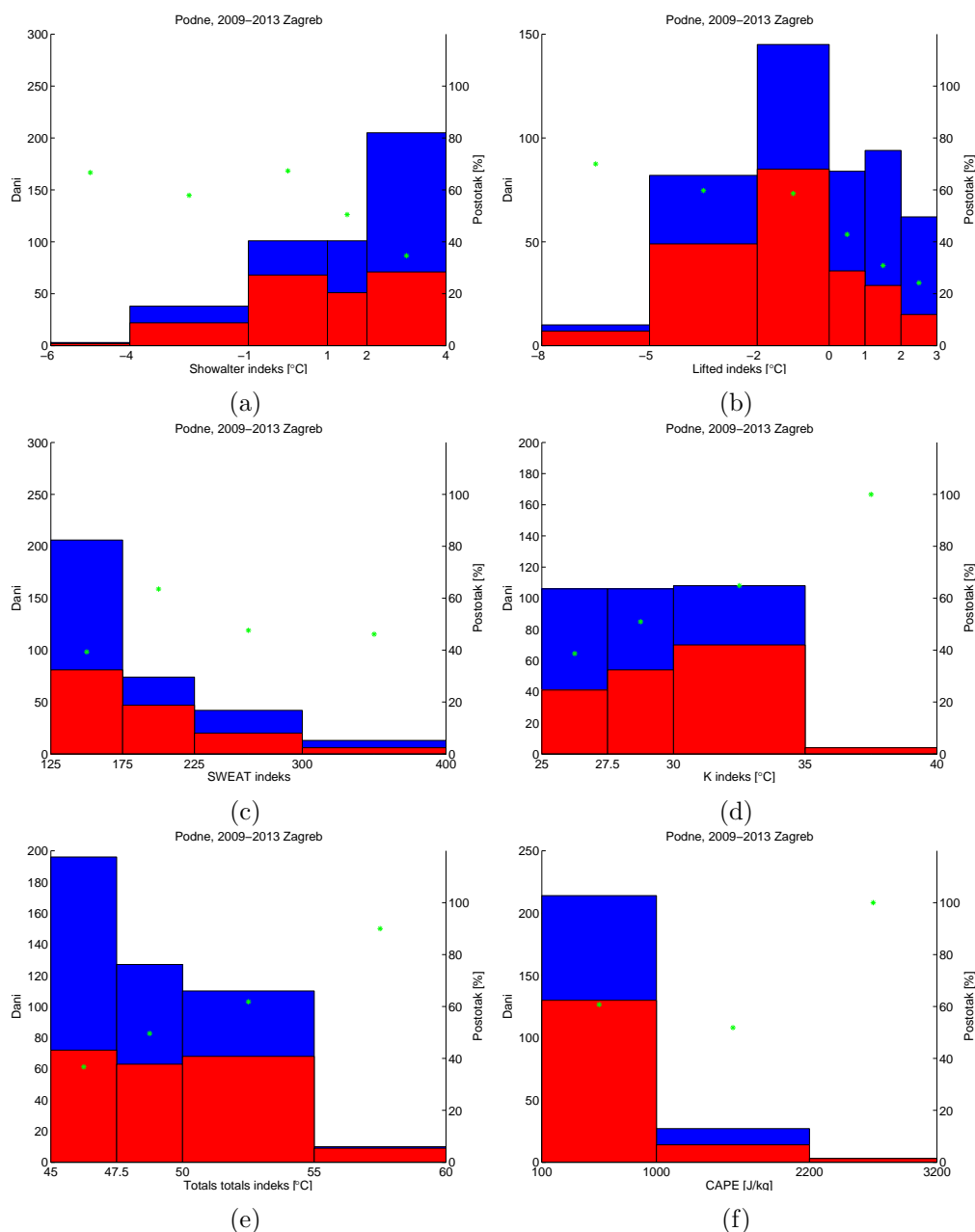
Na slici 5.5i prikazani su dani kada je potencijalna temperatura usrednjena u najnižih 500 m unutar AGS-a između 285 i 310 K. Efekt zagrijavanja tla mnogo je izraženiji nad Zagrebom nego nad Zadrom gdje advekcija morskog zraka igra određenu ulogu u povezanosti AGS temperature i pojavi munja. Unatoč izraženijoj razrednoj raspodjeli, najoptimalniji uvjeti i dalje su za  $\Theta$  i  $r$  u intervalu od 295-300 K te 10-13 g/kg. Zanimljivo je da kako se vlažnost u AGS-u povećava, raste i udio dana s munjama, ali ne više linearno kao u priobalju (slika 5.5j).

Na slici 5.5k prikazani su dani kada je TPW između 10 mm i 45 mm. Iznos i raspodjela vjerojatnosti dana s pražnjenjem za Zagreb jako su slični onoj za Zadar. Za graničnu vrijednost uzeli smo  $TPW > 25$  jer je vjerojatnost da će biti grmljavinskog nevremena u granicama od 25 mm do 35 mm 38%. Na intervalu od 35mm do 45 mm dobivena je najveća vjerojatnost za grmljavinsko nevrijeme od 68%.

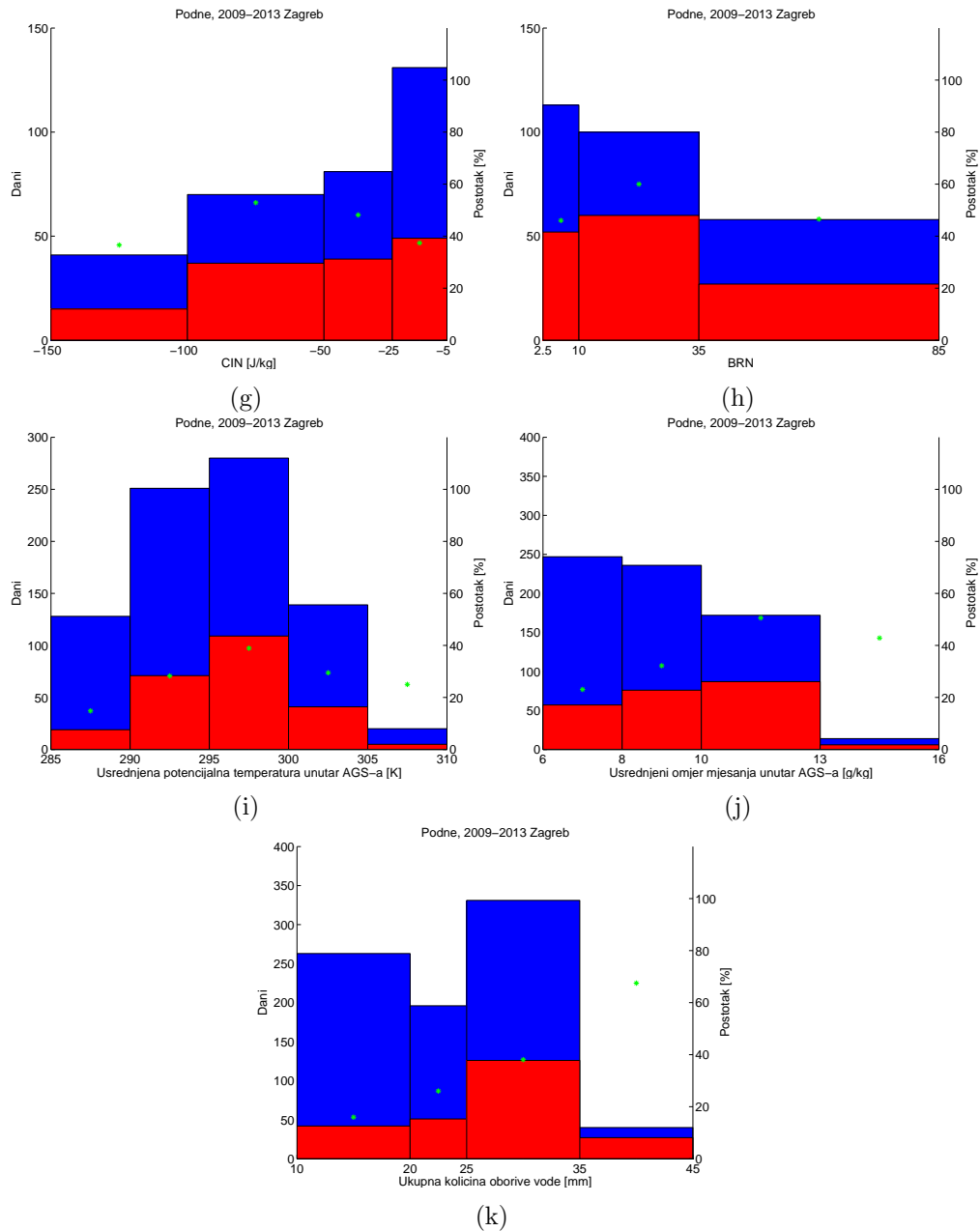
### 5.3.3 Zadar-ponoćna radiosondaža (00 UTC)

Kao što je pokazano priobalje ima mnogo više noćne konvekcije, iako se ona razlikuje od dnevne gledajući intenzitet i povezanost sa sinoptičkim uvjetima. Na slici 5.6 prikazani su rezultati za Zadar u 00UTC.

Na slici 5.6a prikazani su dani i SI vrijednosti koje ne daju tako jasnu povezanost između



SLIKA 5.5: Histogrami indeksa nestabilnosti iz tablice 1.1; SI (a), LI (b), SWEAT (c), K (d), TT (e), CAPE (f), CIN (g), BRN (h), usrednjena potencijalna temperatura unutar AGS-a (i), usrednjeni omjer mješanja unutar AGS-a (j) i TPW (k) za podatke radiosondaža u Zagrebu u podne, 12 UTC. Plavom bojom su prikazani svi promatrani dani, crvenom bojom dani kada je zabilježeno električno pražnjenje i zelenom zvjezdicom postotak dana s električnim pražnjenjem.



SLIKA 5.5: Nastavak

parametra i električnog pražnjenja. Vjerojatnost za dan s pražnjenjem povećava se s padanjem vrijednosti SI indeksa. Graničnu vrijednost za stabilnost odredili smo za  $SI < -4^{\circ}\text{C}$ .

Dani kada je LI bio unutar određenih granica prikazani su na slici 5.6b. Najveća vjerojatnost za dan s pražnjenjem nalazi se u intervalu  $-5^{\circ}\text{C}$  do  $-2^{\circ}\text{C}$  i iznosi 47%. Za interval između  $-8^{\circ}\text{C}$  i  $-5^{\circ}\text{C}$  neočekivano smo dobili manju vjerojatnost za dan s pražnjenjem od samo 29%. Razlog tako loše povezanosti može biti što smo imali samo 7 zabilježenih dana s LI unutar tog intervala. Graničnu vrijednost za stabilnost odredili smo za  $LI < -2^{\circ}\text{C}$ .

Na slici 5.6c prikazana je raspodjela SWEAT indeksa po razredima. U ovom slučaju parametar je zahvalniji kao prediktor konvekcije u odnosu na dnevne odnose. Primjećujemo porast vjerojatnosti za dan s električnim pražnjenjem s povećanjem SWEAT indeksa. Graničnu vrijednost nestabilnosti odredili smo za  $SWEAT > 225$ .

Dani kada je K indeks bio unutar određenih granica prikazani su na slici 5.6d. Na histogramu se vidi da s porastom vrijednosti K indeksa blago nelinearno raste vjerojatnost za dan s munjama. Granicu za nestabilnost odredili smo za  $K > 30$ , što je oštriji kriterij nego u prethodno promatranim slučajevima. Za vrijednosti K indeksa između  $30^{\circ}\text{C}$  i  $35^{\circ}\text{C}$  udio dana s pražnjenjem je 36%, dok je za sljedeći interval između  $35^{\circ}\text{C}$  i  $40^{\circ}\text{C}$  udio 69%.

Na slici 5.6e prikazana je raspodjela TT indeksa po razredima. Ovdje također imamo manje udjela dana s munjama i nesigurniju povezanost nego u prošlim slučajevima. Graničnu vrijednost za nestabilnost odredili smo za  $TT > 55^{\circ}\text{C}$  zato što je za vrijednosti TT na intervalu od  $55^{\circ}\text{C}$  do  $60^{\circ}\text{C}$  zabilježena vjerojatnost za dan s pražnjenjem od 67%, što je dosta velika razlika u odnosu na niže vrijednosti TT indeksa (oko  $50^{\circ}\text{C}$ ) gdje najveća vjerojatnost iznosi 29%.

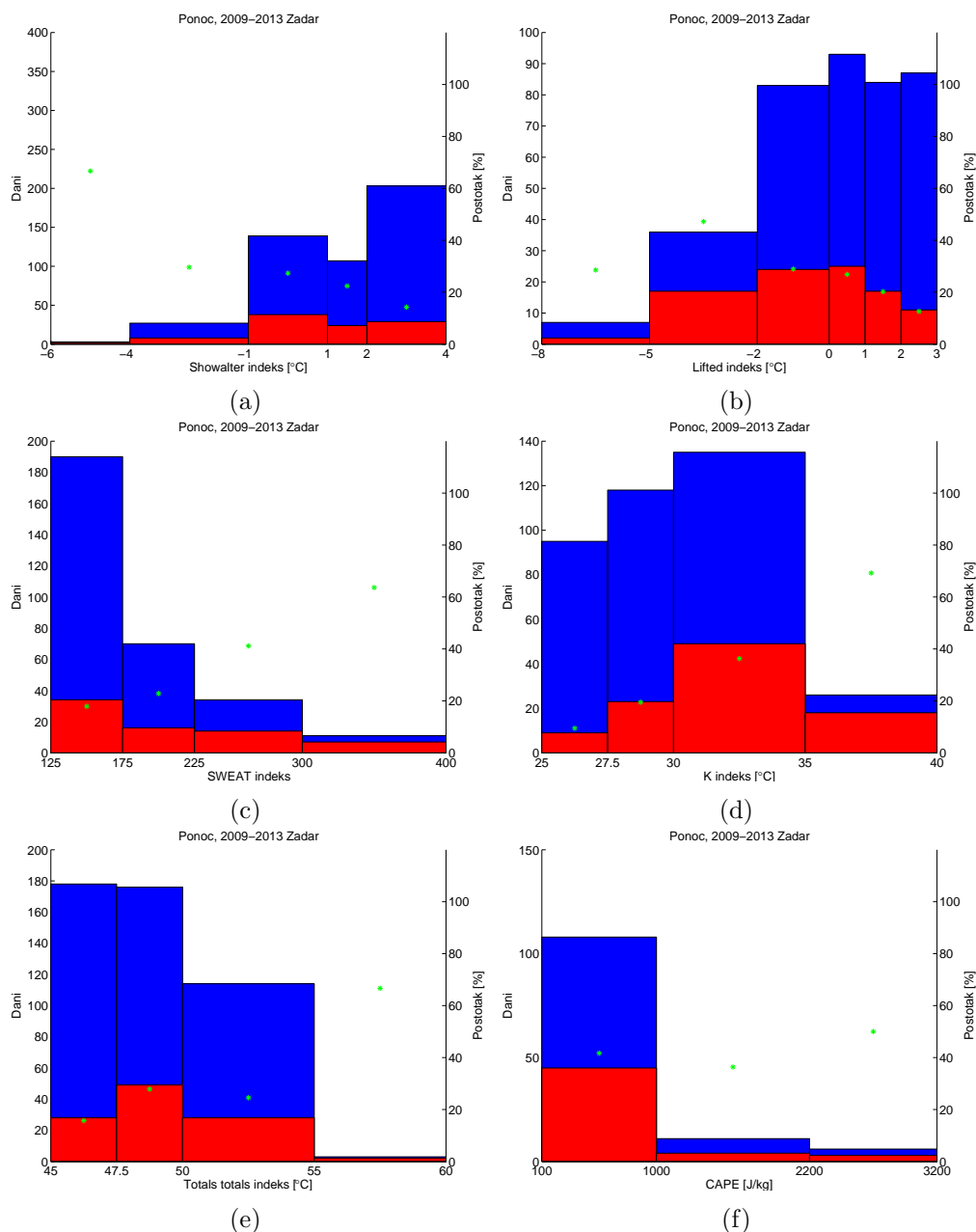
Dani kada je CAPE indeks bio unutar određenih granica prikazani su na slici 5.6f. Najveću vjerojatnost, od 50%, imamo za vrijednosti CAPE-a između 2200 i 3200 J/kg, međutim, tako velike vrijednosti zabilježene su samo 6 puta, što je premalo da bi bilo reprezentativno. Zato smo odlučili uzeti vrijednost  $CAPE > 100$  J/kg kao graničnu vrijednost nestabilnosti. Za očekivati je da su uzroci noćnih konvekcija manje lokalne termičke naravi, a više izazvane sinoptičkim ili većim mezoskalnim sustavima. Tome u prilog idu i veće CIN vrijednosti kod kojih se detektiraju munje (slika 5.6g). Raspodjela udjela dana s munjama pokazuje gotovo eksponencijalni pad dana s munjama s povećanjem CIN vrijednosti; maksimalnu vjerojatnost za dan s pražnjenjem imamo na intervalu od  $-25$  J/kg do  $-5$  J/kg i ona iznosi 65%. Graničnu vrijednost nestabilnosti odredili smo za  $CIN > -50$  J/kg.

Noćne vrijednosti BRN parametra nisu pokazale udio veći od 38% pokazujući određenu učestalost multićelija nad priobalnim dijelom (slika 5.6h). Graničnu vrijednost nestabilnosti odredili smo za  $BRN > 35$ , jer je za te vrijednosti najveća vjerojatnost za nevrjeme.

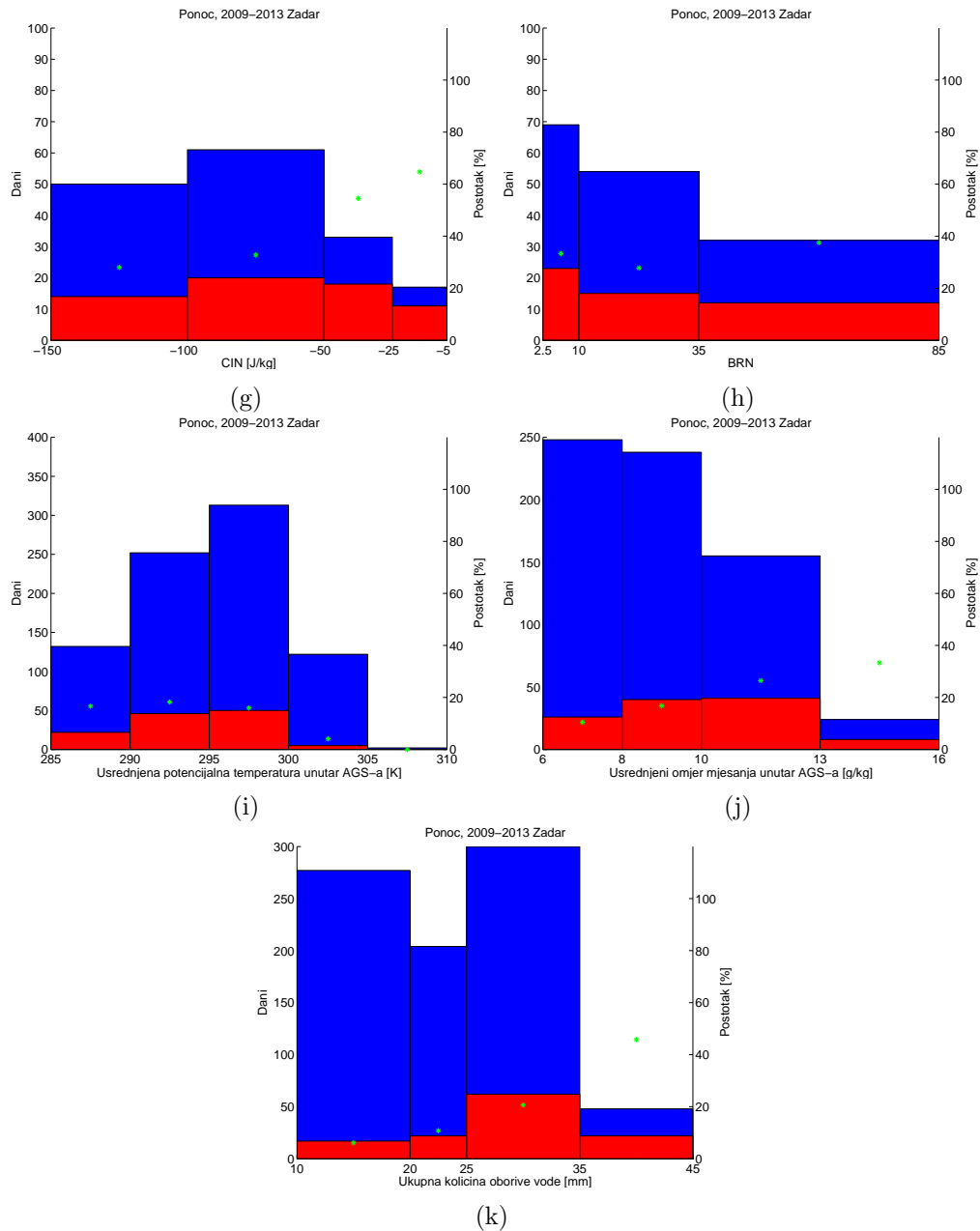
Iako i daljnje povećanje usrednjene AGS vlažnosti doprinosi većem broju detektiranih munja (slika 5.6j), takvi, za munje povoljni AGS uvjeti, odvijaju se očekivano u nešto hladnijem najnižem sloju atmosfere (slika 5.6i). Optimalni uvjeti u ovom slučaju su usrednjena potencijalna AGS temperatura između 290 i 295 K te usrednjeni  $r > 13$  g/kg.

Na slici 5.6k prikazani su dani kada je TPW između 10 mm i 45 mm. Na histogramu se vidi porast vjerojatnosti dana s pražnjenjem s povećanjem TPW indeksa. Unatoč

najčešćim vrijednostima TPW-a u intervalu od 25-35 mm, za graničnu vrijednost se uzima  $TPW > 35$  mm jer je vjerojatnost da će biti grmljavinskog nevremena najveća; 46%.



SLIKA 5.6: Histogrami indeksa nestabilnosti iz tablice 1.1; SI (a), LI (b), SWEAT (c), K (d), TT (e), CAPE (f), CIN (g), BRN (h), usrednjena potencijalna temperatura unutar AGS-a (i), usrednjeni omjer mješanja unutar AGS-a (j) i TPW (k) za podatke radiosondaža u Zadru u ponoć, 00 UTC. Plavom bojom su prikazani svi promatrani dani, crvenom bojom dani kada je zabilježeno električno pražnjenje i zelenom zvjezdicom postotak dana s električnim pražnjenjem.



SLIKA 5.6: Nastavak

### 5.3.4 Zagreb-ponoćna radiosondaža (00 UTC)

Na slici 5.7 prikazani su rezultati za Zagreb u 00UTC. Iako je u odnosu na dnevni dio dana, noćni udio konvektivnih sati mnogo manji, neki indeksi pokazali su zadovoljavajuću povezanost s pojavama munja, a time i njihovu prediktabilnost. Tako je SI parametar dao zahvalniju raspodjelu udjela dana s električnim pražnjenjem za Zagreb nego za Zadar u istom terminu (slika 5.7a). Vidi se porast vjerojatnosti dana s pražnjenjem sa smanjenjem vrijednosti SI. Za SI između  $-4^{\circ}\text{C}$  i  $-1^{\circ}\text{C}$  zabilježen je udio od 36% za grmljavinsko nevrijeme pa smo graničnu vrijednost za nestabilnost odredili za  $SI < -1^{\circ}\text{C}$ .

Najveća vjerojatnost za LI (slika 5.7b) za dan s pražnjenjem nalazi se u intervalu  $-2^{\circ}\text{C}$  do  $-0^{\circ}\text{C}$  i iznosi 39%. Za interval između  $-5^{\circ}\text{C}$  i  $-2^{\circ}\text{C}$  neočekivano smo dobili manju vjerojatnost za dan s pražnjenjem od samo 24%, a za interval od  $-8^{\circ}\text{C}$  do  $-5^{\circ}\text{C}$  vjerojatnost je 50%. Graničnu vrijednost nestabilnosti odredili smo za  $\text{LI} < 0^{\circ}\text{C}$ .

Na slici 5.7c prikazana je raspodjela SWEAT indeksa po razredima. U ovom slučaju imamo bolje rezultate nego u slučajevima za Zadar-podne i Zagreb-podne. Primjećujemo porast vjerojatnosti za dan s električnim pražnjenjem s povećanjem SWEAT indeksa. Graničnu vrijednost nestabilnosti odredili smo za  $\text{SWEAT} > 225$ . Moguće je da bolje ponašanje noćnih SWEAT indeksa u smislu prognoze konvekcije proizlazi iz kinematičkog doprinosa samom parametru za razliku od dnevnih situacija kada je parametar možda samo pod utjecajem termodinamičkih faktora.

Histogram K indeksa (slika 5.7d) pokazuje porast K vrijednosti s porastom vjerojatnosti za dane s električnim pražnjenjem. Granicu za nestabilnost odredili smo za  $\text{K} > 30^{\circ}\text{C}$ , kao i za Zadar u istom terminu. Za vrijednosti K indeksa između  $30^{\circ}\text{C}$  i  $35^{\circ}\text{C}$  vjerojatnost za dan s pražnjenjem je 33%, dok je za sljedeći interval između  $35^{\circ}\text{C}$  i  $40^{\circ}\text{C}$  vjerojatnost 50%.

TT indeks po razredima na slici 5.7e ukazuje na graničnu vrijednost od  $\text{TT} > 55^{\circ}\text{C}$  zbog vjerojatnosti od 60% na intervalu od  $55^{\circ}\text{C}$  do  $60^{\circ}\text{C}$ . Zabilježena vjerojatnost je značajno veća od one kod nižih TT vrijednosti.

Noćna konvekcija u Zagrebu praćena je nižim CAPE vrijednostima (slika 5.7f) i većim CIN vrijednostima (slika 5.7g), uz najčešće vrijednosti BRN-a na intervalu od 10-35. Unatoč tome  $\text{BRN} > 35$  pokazuje najveću pouzdanost kod pojave munja iako ni tada udio dana s pražnjenjem ne prelazi 34% (slika 5.7h). Granične vrijednosti nestabilnosti odredili smo za  $\text{CAPE} > 100 \text{ J/kg}$ ,  $\text{CIN} > -150 \text{ J/kg}$  i  $\text{BRN} > 10$ .

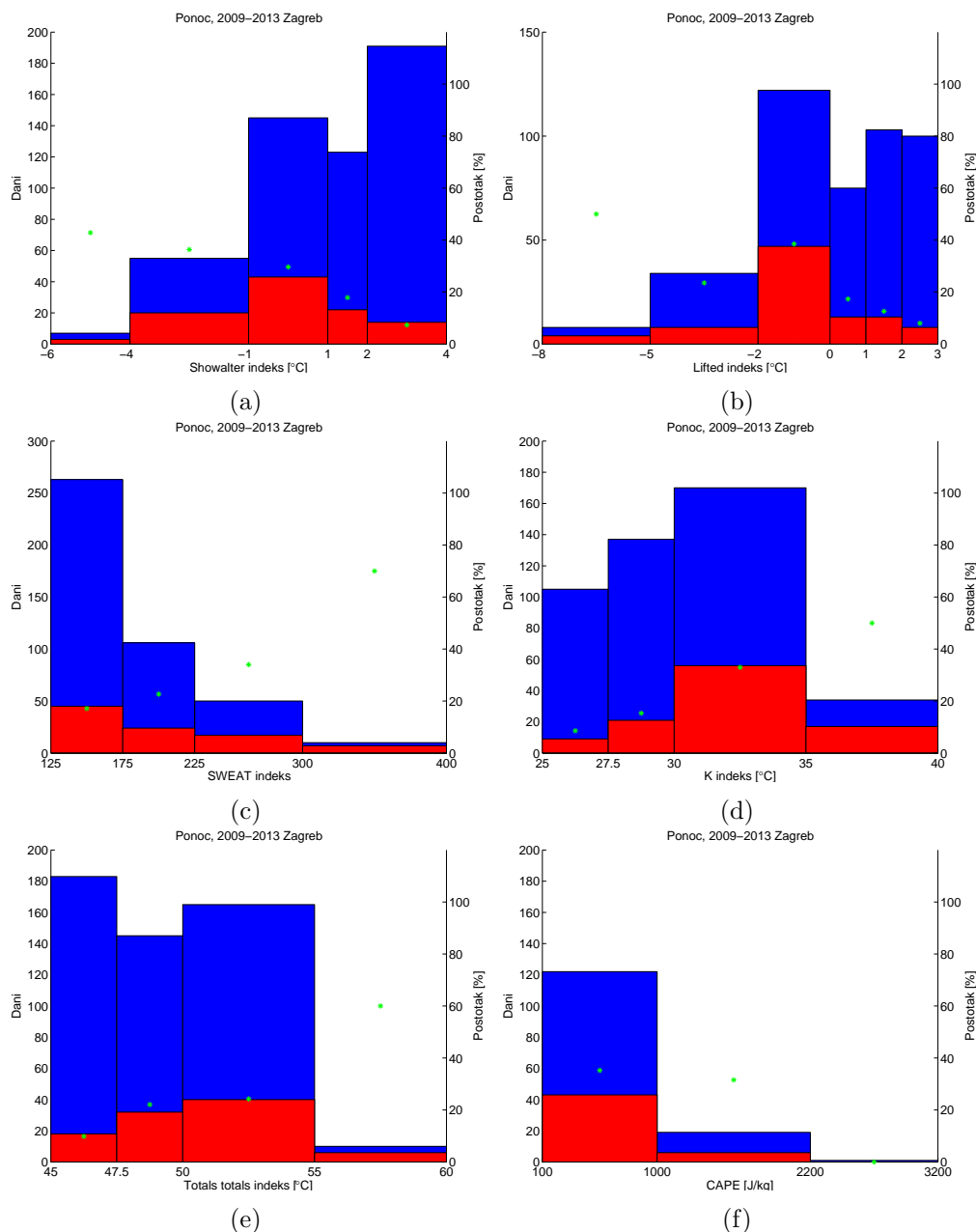
Najveću vjerojatnost za konvekciju ako promatramo usrednjenu potencijalnu AGS temperaturu (slika 5.7i) i usrednjenu  $r$  (slika 5.7j) zabilježili smo za  $\Theta$  između 290 i 295 K te usrednjenu  $r > 10 \text{ g/kg}$ .

Na slici 5.7k prikazani su dani kada je TPW između 10 mm i 45 mm. Na histogramu se vidi porast vjerojatnosti dana s pražnjenjem s povećanjem TPW indeksa. Za graničnu vrijednost uzeli smo  $\text{TPW} > 35$  jer je vjerojatnost da će biti grmljavinskog nevremena u granicama od 35 mm do 45 mm 41%.

### 5.3.5 Repräsentativnost sondaža

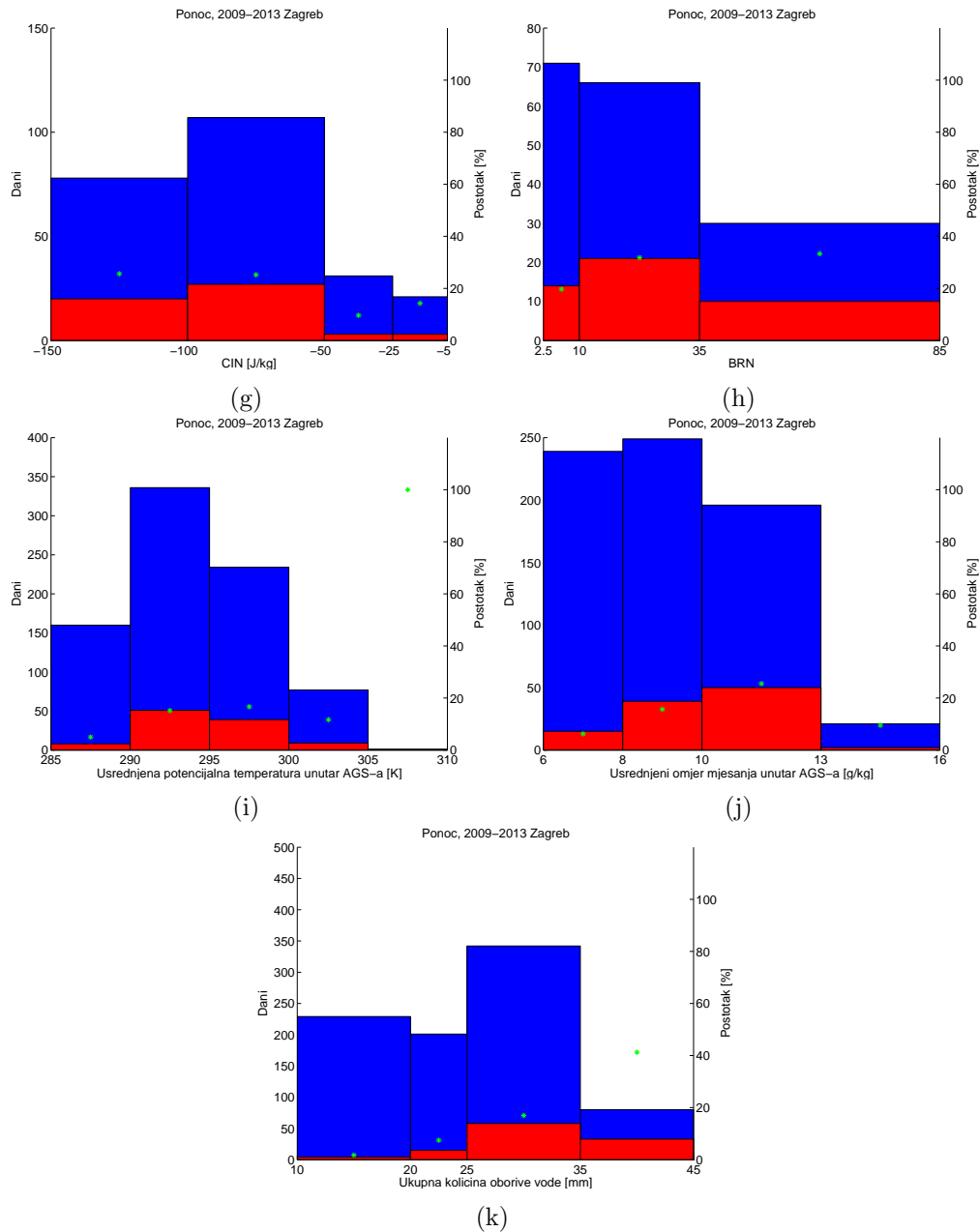
Usporedba radiosondažnih indeksa nestabilnosti s pojavom munja dala nam je mogućnost procjene indeksa kao (ne)uspješnih prediktora konvekcije na dvije postaje Zagreb i Zadar. Njihovi hodovi sugerirali su određene granične vrijednosti. Nažalost, ponekad

udio “konvektivnog” seta podataka u početnom (radiosondažnom originalnom) setu podataka nije prelazio 60%, pa se uzimao najveći razumni postotni udio (tablica 5.2). Razlozi mogu biti mnogobrojni (širina klasa histrograma, promatrano razdoblje i njegova duljina, učestalost radiosondaža, veličina pod-domena...) od kojih je možda jedan od najvažnijih reprezentativnost radiosondaža. Haklander i Van Delden (2003) su proučavajući tlak, temperaturu, vlažnost i vjetar iz radiosondažnih mjerenja u Ni-



SLIKA 5.7: Histogrami indeksa nestabilnosti iz tablice 1.1; SI (a), LI (b), SWEAT (c), K (d), TT (e), CAPE (f), CIN (g), BRN (h), usrednjena potencijalna temperatura unutar AGS-a (i), usrednjeni omjer mješanja unutar AGS-a (j) i TPW (k) za podatke radiosondaža u Zagrebu u ponoć, 00 UTC. Plavom bojom su prikazani svi promatrani dani, crvenom bojom dani kada je zabilježeno električno pražnjenje i zelenom zvijezdicom postotak dana s električnim pražnjenjem.





SLIKA 5.7: Nastavak

zozemskoj koristili atmosferske varijable u prognoziranju grmljavinskog nevremena do udaljenosti od 100 km od postaje.

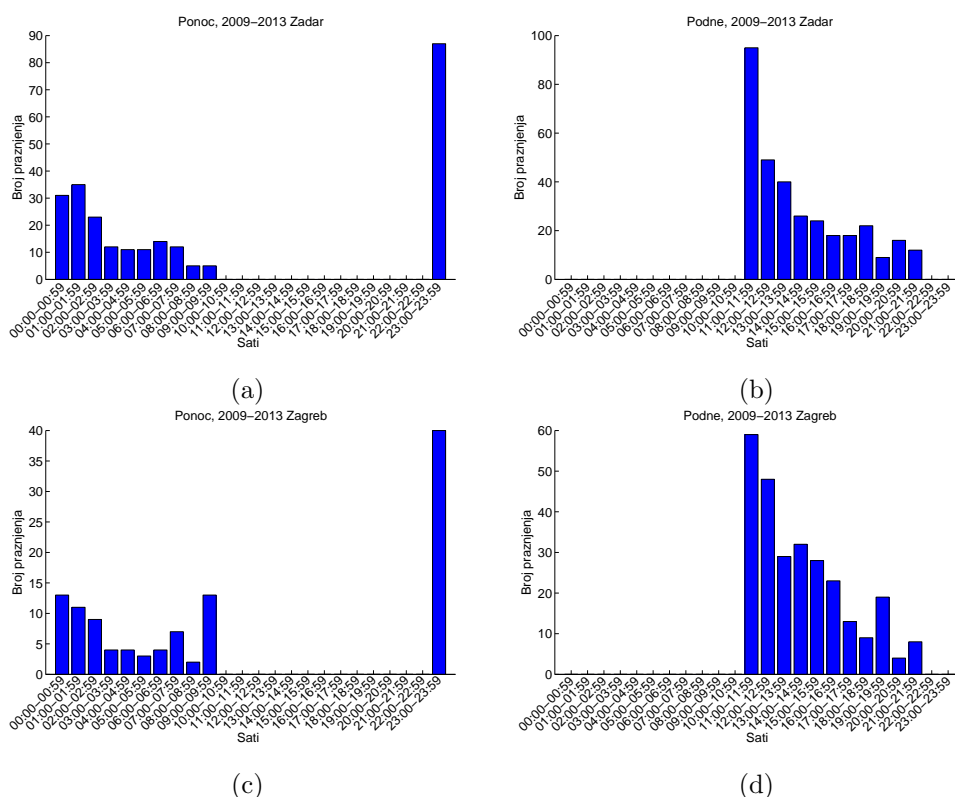
U Hrvatskoj je zbog kompleksnog terena ponekad upitno koristiti radiosondaže u tako velikom radijusu, a svakako bi trebalo uvažiti dimenzije Rossbijevog radijusa deformacije. Ponekad je preporučljivo imati veće ili dinamične domene koje bi uvažavale smjer strujanja u srednjoj troposferi te tako koristiti radiosondaže za pred-konvektivne, a ne post-konvektivne uvjete. Također vertikalna reprezentativnost radiosondaže povećava se unutar rotacionog konusa s vrhom pri tlu. U vremenu, radiosondaža ponekad može biti reprezentativna samo unutar 2 sata, pa bi bilo poželjno imati što gušća mjerenja. U

TABLICA 5.2: Granične vrijednosti nestabilnosti prema indeksima nestabilnosti i udio dana s pražnjenjem za tu vrijednost.

	Zadar 12UTC		Zagreb 12UTC		Zadar 00UTC		Zagreb 00UTC	
SI ( $^{\circ}\text{C}$ )	SI < 2	47%	SI < 2	50%	SI < -4	67%	SI < -1	36%
LI ( $^{\circ}\text{C}$ )	LI < 0	60%	LI < 0	59%	LI < -2	49%	LI < -2	39%
SWEAT	SWEAT > 300	50%	SWEAT > 175	63%	SWEAT > 225	41%	SWEAT > 225	34%
K ( $^{\circ}\text{C}$ )	K > 27.5	45%	K > 27.5	51%	K > 30	36%	K > 30	33%
TT ( $^{\circ}\text{C}$ )	TT > 50	57%	TT > 47.5	50%	TT > 55	67%	TT > 55	60%
CAPE (J/kg)	CAPE > 100	55%	CAPE > 100	61%	CAPE > 100	42%	CAPE > 100	35%
CIN (J/kg)	CIN > -100	58%	CIN > -100	53%	CIN > -50	54%	CIN > -150	26%
BRN	BRN > 10	56%	BRN > 10	60%	BRN > 35	36%	BRN > 10	32%
$\theta$ (K)	$295 < \theta < 300$	27%	$295 < \theta < 300$	39%	$290 < \theta < 295$	18%	$295 < \theta < 300$	16%
r (g/kg)	$r > 10$	45%	$r > 10$	51%	$r > 13$	33%	$r > 10$	26%
TPW (mm)	TPW > 25	35%	TPW > 25	38%	TPW > 35	46%	TPW > 35	41%

Hrvatskoj se mjerenja vrše samo 2 puta dnevno što čini drugo ograničenje u ovoj studiji.

Na slici 5.8 prikazano je u koje vrijeme je detektiran prvi udar u promatranom konvektivnom danu. Zanimljivo je da u svim slučajevima, najviše prvih udara imamo detektiranih od onog sata kada smo započeli s promatranjem, ali to ne znači nužno da je upravo u tom terminu pražnjenje uistinu i počelo, već se najvjerojatnije radi o “hvatanju” informacije o oluji koja je počela prije promatranog razdoblja. Ukoliko umanjimo značajnost te informacije, vidimo da značajan dio pražnjenja započinje upravo u prvih nekoliko sati od početka promatranja, te možemo reći da su promatrane radiosondaže uglavnom reprezentativne za odabrani vremenski period koji smo promatrali.



SLIKA 5.8: Reprezentativnost sondaža za Zadar 00 UTC (a), Zadar 12 UTC (b), Zagreb 00 UTC (c) i Zagreb 12 UTC (d).

## 6 Zaključci

U ovom radu pokušali smo odrediti granične vrijednosti pojedinog indeksa nestabilnosti iznad kojih bi vjerojatnost uspješne prognoze konvekcije bila zadovoljavajuća. Kako bi to napravili koristili smo podatke o munjama jer su oni sigurni pokazatelj konvekcije.

Proučavani su dani s konvektivnom aktivnošću na području Zagreba i Zadra za razdoblje od 1. siječnja 2009. do 31. prosinca 2013. godine. Za potrebe rada korišteni su podaci radiosondažnih postaja Zagreb i Zadar te podaci o sijevanju koje smo dobili iz sustava LINET.

Promatranjem godišnjeg hoda pražnjenja (kao mjere intenziteta) zaključili smo da se najveći broj pražnjenja dogodio u ljetnim mjesecima i odlučili smo se fokusirati svoje istraživanje na topli dio godine, od travnja do rujna.

Usporedba radiosondažnih indeksa nestabilnosti s pojavom munja dala nam je mogućnost procjene indeksa kao prediktora konvekcije na postajama Zagreb i Zadar. Njihovi hodoi sugerirali su određene granične vrijednosti pomoću kojih bi mogli s određenom preciznošću prognozirati moguću konvekciju, ali su u većini slučajeva bili ispod unaprijed određenog praga od 60%. U tim slučajevima (npr. za TPW, usrednjenu potencijalnu temperaturu unutar AGS-a i usrednjeni omjer mješanja unutar AGS-a) uzimao se najveći razumni udio.

Najveće vjerojatnosti za uspješnu prognozu konvektivnih dana dobili smo za indekse SI, LI, K i TT. Za većinu indeksa bolje vjerojatnosti za predikciju dana s električnim pražnjenjem dobivene su danju, jedino je SWEAT indeks pokazao bolje rezultate noću. Teorijske vrijednosti indeksa CAPE, CIN i BRN pokazale su da ne znače mnogo za konvekciju već bi ih trebalo promatrati na termodinamičkom dijagramu i povezano s tipovima vremena kako bi dobili bolje rezultate.

Također, ovi rezultati mogu se poboljšati povećanjem broja radiosondažnih postaja, produljenjem perioda istraživanja i provođenjem dodatne statistike. Također bi vrijedilo pokušati predefinirati veličinu reprezentativne prostorne i vremenske domene.

## Zahvale

Ovaj rad je uspješno izrađen zahvaljujući Igoru Kosu, mag. phys.-geophys. i Jadranu Jurkoviću, mag. phys.-geophys. iz Hrvatske kontrole zračne plovidbe d.o.o. koji su osmislili temu i predložili smjernice rada, te mentorici doc. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak koja nas je tokom čitave izrade rada pratila sa stručnim savjetima i korisnim raspravama bez kojih bi ovaj rad bio neizvediv.

# Literatura

- [1] Ávila E. E., Bürgesser R. E., Castellano N. E., Collier A. B., Compagnucci R. H., Hughes A. R. W.: *Correlations between deep convection and lightning activity on a global scale*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 72, 1114–1121, 2010.
- [2] Bahorić Z.: *Statistička veza između satelitskih indeksa nestabilnosti i pojave munja za šire područje Hrvatske*, Diplomski rad, PMF, Zagreb, 2012.
- [3] Betz H.-D., Schmidt K., Laroche P., Blanchet P., Oettinger W. P., Defer E., Dziewit Z., Konarski J.: *LINET – An international lightning detection network in Europe*, Atmos. Res. 91, 564–573, 2009.
- [4] Christian H. J., Blakeslee R.J., Boccippio D.J., Boeck W.L., Buechler D.E., Driscoll K.T., Goodman S.J., Hall J.M., Koshak W.J., Mach D.M., Stewart M.F.: *Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector*, J. of Geophys. Res. 108 (D1), pg. ACL 4-1–ACL 4-15, 2003.
- [5] Cotton W. R., Bryan G., Van den Heever S.C.: *Storm and Cloud Dynamics 2nd Edn.*, Elsevier Academic Press, Oxford, 2011.
- [6] DHMZ: *Naputak za opažanja i mjerenja na glavnim meteorološkim postajama*, str. 283, Cicero d.o.o., Zagreb, 2008.
- [7] Gajić-Čapka M., Sokol Jurković R., Nikolić D., Čapka, B.: *Floods in Croatia - Societal and economic impacts and responses in the newspapers*, 6th HyMeX workshop, Primošten, Croatia, 2012.
- [8] Grisogono B., Belušić D.: *Uvod u mezoskalnu meteorologiju i atmosfersku turbulenciju*, Interne skripte, str. 148, PMF, Zagreb 2008.
- [9] Groenemeijer P.H., Van Delden A.: *Sounding-derived parameters associated with large hail and tornadoes in The Netherlands*, Atmos. Res. 83, 473–487, 2007.
- [10] Haklander A. J., Van Delden A.: *Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands*, Atmos. Res. 67-68, 273–299, 2003.

- [11] Höller H., Betz H.-D., Schmidt K., Calheiros R.V., May P., Houngrinou E., Scialom G.: *Lightning characteristics observed by a VLF/LF lightning detection network (LINET) in Brazil, Australia, Africa and Germany*, Atmos. Chem. Phys. 9, 7795–7824, 2009.
- [12] Holton J. R., Curry J. A., Pyle J. A.: *Encyclopedia of atmospheric sciences*, Academic Press, San Diego, 2002.
- [13] Manzato, A.: *A climatology of instability indices derived from Friuli Venezia Giulia soundings, using three different methods*, Atmos. Res. 67–68, 417–454, 2003.
- [14] Manzato, A.: *The 6 h climatology of thunderstorms and rainfalls in the Friuli Venezia Giulia Plain*, Atmos. Res., 83, 336–348, 2007.
- [15] Mikuš P., Prtenjak M. T., Strelec Mahović, N.: *Analysis of the convective activity and its synoptic background over Croatia*, Atmos. Res. 104–105, 139–153, 2012.
- [16] Pandžić K.: *Analiza meteoroloških polja i sustava*, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, HINUS, Zagreb, 2002.
- [17] Petrova S., Mitzeva R., Kotroni V., Latham J., Peneva E.: *Analyses of summer lightning activity and precipitation in the Central and Eastern Mediterranean.*, Atmos. Res. 91, 453–458, 2009.
- [18] Pineda N., Esteban P., Trapero L., Soler X., Beck C.: *Circulation types related to lightning activity over Catalonia and the Principality of Andorra*, Phys. Chem. Earth. 35, 469–476, 2010.
- [19] Rivas Soriano L., De Pablo F., Tomas C.: *Ten-year study of cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula*, J. of Atmos. Terr. Phys. 67 (16), 1632–1639, 2005.
- [20] Sherwood S. C., Roca R., Weckwerth T. M., Andronova N. G.: *Tropospheric water vapour, convection and climate*, Rev. Geophys. 48, RG2001, 2010.
- [21] Seity Y., Soula S., Sauvageot H.: *Lightning and precipitation relationship in coastal thunderstorms*, J. of Geophys. Res. 106 (D19), 22801–22816, 2001.
- [22] Smiljanić I.: *Verifikacija indeksa nestabilnosti izvedenih iz satelitskih mjerenja na širem području Hrvatske*, Diplomski rad, PMF, Zagreb, 2011
- [23] Telišman Prtenjak M., Grisogono B.: *Sea/land breezes climatological characteristics along the northeastern Adriatic coast*, Theor. Appl. Climatol. 90, 201–215, 2007.
- [24] Uglešić I., Milardić V., Milešević B., Franc B., Filipović-Grčić B.: *Uspostava sustava za lociranje munja u Hrvatskoj*, Hrvatski ogranak međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sustave – CIGRÉ, 9. savjetovanje HRO CIGRÉ Cavtat, 2009.
- [25] Uman M.A.: *The Lightning Discharge*, Dover Publications, New York, USA, 2001.

- [26] Zaninović K. et al.: *Klimatski atlas Hrvatske/Climate atlas of Croatia 1961–1990, 1971–2000*, Meteorological and Hydrological Service of Croatia, Zagreb, 2008.



# ANALIZA INDEKSA NESTABILNOSTI ATMOSFERE NA TEMELJU RADIOSONDAŽA I DETEKCIJE MUNJA U HRVATSKOJ

Martina ČURIĆ<sup>1</sup>, Tomislav STILINOVIĆ<sup>2</sup>

*e-mail:* <sup>1</sup>[martina.curic@gfz.hr](mailto:martina.curic@gfz.hr)  
<sup>2</sup>[tomislav.stilinic@gfz.hr](mailto:tomislav.stilinic@gfz.hr)

## Sažetak

Indeksi nestabilnosti su pokazatelji stanja atmosfere pogodnih za nastanak i razvoj konvektivnih oblaka, sustava i popratnih pojava. Vrijednosti indeksa nestabilnosti povezane su s vjerojatnošću pojave konvektivnog razvoja i postoje granične vrijednosti koje određuju stabilno ili nestabilno stanje atmosfere. U ovom radu proučavani su indeksi nestabilnosti na području Zagreba i Zadra za petogodišnje razdoblje od 1. siječnja 2009. do 31. prosinca 2013. godine, koje smo pokušali dovesti u vezu s podacima detekcije električnih pražnjenja. Cilj rada je bio odrediti granične vrijednosti pojedinog indeksa nestabilnosti iznad koje bi vjerojatnost uspješne prognoze konvekcije bila zadovoljavajuća. Pokazalo se da neki indeksi nestabilnost manje, a neki više pokazuju sposobnost za uspješnu predikciju konvektivnog događaja. Najveće vjerojatnosti za uspješnu prognozu konvektivnih dana dobili smo za indekse SI, LI, K i TT. Za većinu indeksa bolje vjerojatnosti za predikciju dana s električnim pražnjenjem dobivene su danju, jedino je SWEAT indeks pokazao bolje rezultate noću. Teorijske vrijednosti indeksa CAPE, CIN i BRN pokazale su da ne znače mnogo za konvekciju već bi ih trebalo promatrati na termodinamičkom dijagramu i povezano s tipovima vremena kako bi dobili bolje rezultate. Provođenje ovakvih istraživanja je od izuzetne važnosti iz razloga što bi mogućim razvojem određenih metoda pravovremenog uočavanja nepovoljnih uvjeta mogli pravovremeno intervenirati i pokušati umanjiti moguće štete od olujnih nevremena koji su drugi najčešći uzročnik materijalnih šteta u Hrvatskoj.

KLJUČNE RIJEČI: indeksi nestabilnosti, radiosondažna mjerenja, duboka konvekcija





UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF GEOPHYSICS



# ANALYSIS OF INSTABILITY INDICES BASED ON ATMOSPHERIC SOUNDINGS AND LIGHTNING DATA IN CROATIA

Martina ČURIĆ<sup>1</sup>, Tomislav STILINOVIĆ<sup>2</sup>

*e-mail:* <sup>1</sup>[martina.curic@gfz.hr](mailto:martina.curic@gfz.hr)  
<sup>2</sup>[tomislav.stilinovic@gfz.hr](mailto:tomislav.stilinovic@gfz.hr)

## Summary

Instability indices are indicators of atmospheric conditions suitable for the formation and development of the convective clouds, systems and side effects. Values of instability indices are associated with the probability of occurrence of convective development, with specific threshold values that define stable or unstable conditions. In this paper, we studied instability indices in Zagreb and Zadar during a five year period, from 1<sup>st</sup> January 2009. until 31<sup>st</sup> December 2013. We tried to correlate instability indices with detection of electrical discharge. The aim of this study was to determine the threshold value for each instability index which would give a satisfactory probability of successful prediction of convective events. The following indices were determined to have the highest probability of successful prediction of convective days: SI, LI, K and TT. For most indices, better probabilities for predictions of days with an electrical discharge were obtained during the day, with the exception of the SWEAT index, which showed better results at night. The theoretical values of indices CAPE, CIN and BRN indicate that they aren't useful for convection. They should be used with a thermodynamic diagram and associated with specific types of weather in order to get better results. Conducting such research is of great importance; if we develop good methods for identifying convective conditions, we could intervene on time and try to minimize possible damage from storms, which is the second most common cause of material damage in Croatia.

KEY WORDS: instability indices, atmospheric soundings, deep moist convection

# Prilozi

## Prilog A

### Podne, 2009.-2013. Zagreb

TABLICA A1: Raspodjela broja dana po razredima za SI ( $^{\circ}\text{C}$ ) za sva radiosondažna mjerenja i "konvektivni" set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
SI < -6	1	1	100
-6 < SI < -4	3	1	33
-4 < SI < -1	38	14	37
-1 < SI < 1	101	54	54
1 < SI < 2	101	37	37
2 < SI < 4	204	39	19
SI > 4	0	0	-

TABLICA A2: Raspodjela broja dana po razredima za LI ( $^{\circ}\text{C}$ ) za sva radiosondažna mjerenja i "konvektivni" set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
LI < -8	0	0	-
-8 < LI < -5	10	5	50
-5 < LI < -2	82	40	49
-2 < LI < 0	145	54	37
0 < LI < 1	84	25	30
1 < LI < 2	94	17	18
2 < LI < 3	60	8	13
LI > 3	0	0	-

TABLICA A3: Raspodjela broja dana po razredima za SWEAT za sva radiosondažna mjerenja i "konvektivni" set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
SWEAT < 125	508	54	11
125 < SWEAT < 175	206	59	29
175 < SWEAT < 225	74	36	49
225 < SWEAT < 300	42	13	31
300 < SWEAT < 400	13	4	31
SWEAT > 400	0	0	-

TABLICA A4: Raspodjela broja dana po razredima za K ( $^{\circ}\text{C}$ ) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
K < 25.0	524	47	9
25.0 < K < 27.5	106	24	23
27.5 < K < 30.0	106	36	34
30.0 < K < 35.0	108	55	51
35.0 < K < 40.0	4	4	100
K > 40.0	0	0	–

TABLICA A5: Raspodjela broja dana po razredima za TT ( $^{\circ}\text{C}$ ) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
TT < 45.0	406	20	5
45.0 < TT < 47.5	196	46	23
47.5 < TT < 50.0	127	47	37
50.0 < TT < 55.0	110	47	43
55.0 < TT < 60.0	10	7	70
TT > 60.0	0	0	–

TABLICA A6: Raspodjela broja dana po razredima za CAPE (J/kg) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
CAPE < 100	605	59	10
100 < CAPE < 1000	214	93	43
1000 < CAPE < 2200	27	13	48
2200 < CAPE < 3200	3	1	33
CAPE > 3200	0	0	–

TABLICA A7: Raspodjela broja dana po razredima za CIN (J/kg) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
CIN < -150	68	8	12
-150 < CIN < -100	41	11	27
-100 < CIN < -50	70	22	31
-50 < CIN < -25	81	27	33
-25 < CIN < -5	131	36	27
CIN > -5	0	0	–

TABLICA A8: Raspodjela broja dana po razredima za BRN za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
BRN < 2.5	507	46	9
2.5 < BRN < 10.0	113	33	29
10.0 < BRN < 35.0	100	39	39
35.0 < BRN < 85.0	58	25	43
BRN > 85.0	0	0	–

TABLICA A9: Raspodjela broja dana po razredima za  $\Theta$  u AGS-u (K) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
$\Theta$ < 285	31	0	0
285 < $\Theta$ < 290	128	18	14
290 < $\Theta$ < 295	251	48	19
295 < $\Theta$ < 300	280	75	27
300 < $\Theta$ < 305	139	21	15
305 < $\Theta$ < 310	20	4	20
$\Theta$ > 310	0	0	–

TABLICA A10: Raspodjela broja dana po razredima za  $r$  u AGS-u (g/kg) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
$r < 6$	180	9	5
$6 < r < 8$	247	35	14
$8 < r < 10$	236	54	23
$10 < r < 13$	172	64	37
$13 < r < 16$	14	4	29
$r > 16$	0	0	–

TABLICA A11: Raspodjela broja dana po razredima za TPW (mm) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
TPW < 10	19	0	0
10 < TPW < 20	263	25	10
20 < TPW < 25	196	32	16
25 < TPW < 35	331	87	26
35 < TPW < 45	40	23	58
TPW > 45	0	0	–

## Podne, 2009.-2013. Zadar

TABLICA A12: Raspodjela broja dana po razredima za SI (°C) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
SI < -6	0	0	–
-6 < SI < -4	1	1	100
-4 < SI < -1	15	7	47
-1 < SI < 1	106	58	55
1 < SI < 2	87	41	47
2 < SI < 4	241	59	24
SI > 4	0	0	–

TABLICA A13: Raspodjela broja dana po razredima za LI (°C) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
LI < -8	0	0	–
-8 < LI < -5	2	1	50
-5 < LI < -2	51	25	49
-2 < LI < 0	118	71	60
0 < LI < 1	75	22	29
1 < LI < 2	115	36	31
2 < LI < 3	104	20	19
LI > 3	0	0	–

TABLICA A14: Raspodjela broja dana po razredima za SWEAT za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
SWEAT < 125	565	94	17
125 < SWEAT < 175	161	59	37
175 < SWEAT < 225	54	26	48
225 < SWEAT < 300	24	7	29
300 < SWEAT < 400	10	5	50
SWEAT > 400	0	0	–

TABLICA A15: Raspodjela broja dana po razredima za K (°C) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
K < 25.0	540	65	12
25.0 < K < 27.5	103	33	32
27.5 < K < 30.0	78	35	45
30.0 < K < 35.0	98	59	60
35.0 < K < 40.0	2	1	50
K > 40.0	0	0	–

TABLICA A16: Raspodjela broja dana po razredima za TT (°C) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
TT < 45.0	396	34	9
45.0 < TT < 47.5	180	50	28
47.5 < TT < 50.0	144	49	34
50.0 < TT < 55.0	96	55	57
55.0 < TT < 60.0	5	5	100
TT > 60.0	0	0	–

TABLICA A17: Raspodjela broja dana po razredima za CAPE (J/kg) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
CAPE < 100	664	107	16
100 < CAPE < 1000	150	83	55
1000 < CAPE < 2200	10	5	50
2200 < CAPE < 3200	0	0	–
CAPE > 3200	0	0	–

TABLICA A18: Raspodjela broja dana po razredima za CIN (J/kg) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
CIN < –150	85	17	20
–150 < CIN < –100	36	15	42
–100 < CIN < –50	69	40	58
–50 < CIN < –25	59	27	46
–25 < CIN < –5	68	36	53
CIN > –5	0	0	–

TABLICA A19: Raspodjela broja dana po razredima za BRN za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
BRN < 2.5	592	80	14
2.5 < BRN < 10.0	75	29	39
10.0 < BRN < 35.0	75	42	56
35.0 < BRN < 85.0	42	27	64
BRN > 85.0	0	0	–

TABLICA A20: Raspodjela broja dana po razredima za  $\Theta$  u AGS-u (K) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
$\Theta < 285$	9	1	11
$285 < \Theta < 290$	93	22	24
$290 < \Theta < 295$	199	48	24
$295 < \Theta < 300$	284	77	27
$300 < \Theta < 305$	203	43	21
$305 < \Theta < 310$	36	4	11
$\Theta > 310$	0	0	–

TABLICA A21: Raspodjela broja dana po razredima za  $r$  u AGS-u (g/kg) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
$r < 6$	210	17	8
$6 < r < 8$	272	62	23
$8 < r < 10$	226	65	29
$10 < r < 13$	110	49	45
$13 < r < 16$	6	2	33
$r > 16$	0	0	–

TABLICA A22: Raspodjela broja dana po razredima za TPW (mm) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
TPW < 10	25	1	4
10 < TPW < 20	283	39	14
20 < TPW < 25	210	42	20
25 < TPW < 35	288	101	35
35 < TPW < 45	18	12	67
TPW > 45	0	0	–

## Ponoć, 2009.-2013. Zagreb

TABLICA A23: Raspodjela broja dana po razredima za SI ( $^{\circ}\text{C}$ ) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
SI < -6	0	0	–
-6 < SI < -4	7	2	29
-4 < SI < -1	55	13	24
-1 < SI < 1	145	27	19
1 < SI < 2	123	11	9
2 < SI < 4	191	7	4
SI > 4	0	0	–

TABLICA A24: Raspodjela broja dana po razredima za LI ( $^{\circ}\text{C}$ ) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
LI < -8	0	0	–
-8 < LI < -5	8	4	50
-5 < LI < -2	32	3	9
-2 < LI < 0	122	28	23
0 < LI < 1	75	8	11
1 < LI < 2	103	8	8
2 < LI < 3	100	5	5
LI > 3	0	0	–

TABLICA A25: Raspodjela broja dana po razredima za SWEAT za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
SWEAT < 125	428	8	2
125 < SWEAT < 175	263	27	10
175 < SWEAT < 225	106	16	15
225 < SWEAT < 300	50	10	20
300 < SWEAT < 400	10	3	30
SWEAT > 400	0	0	–

TABLICA A26: Raspodjela broja dana po razredima za K ( $^{\circ}\text{C}$ ) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
K < 25.0	419	2	0
25.0 < K < 27.5	105	8	8
27.5 < K < 30.0	137	10	7
30.0 < K < 35.0	170	33	19
35.0 < K < 40.0	34	11	32
K > 40.0	0	0	–

TABLICA A27: Raspodjela broja dana po razredima za TT ( $^{\circ}\text{C}$ ) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
TT < 45.0	363	6	2
45.0 < TT < 47.5	183	10	5
47.5 < TT < 50.0	145	18	12
50.0 < TT < 55.0	165	29	18
55.0 < TT < 60.0	10	2	20
TT > 60.0	0	0	–

TABLICA A28: Raspodjela broja dana po razredima za CAPE (J/kg) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
CAPE < 100	724	36	5
100 < CAPE < 1000	122	25	20
1000 < CAPE < 2200	19	4	21
2200 < CAPE < 3200	1	0	0
CAPE > 3200	0	0	–

TABLICA A29: Raspodjela broja dana po razredima za CIN (J/kg) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
CIN < -150	138	16	12
-150 < CIN < -100	78	13	17
-100 < CIN < -50	107	17	16
-50 < CIN < -25	31	1	3
-25 < CIN < -5	21	2	10
CIN > -5	0	0	–

TABLICA A30: Raspodjela broja dana po razredima za BRN za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
BRN < 2.5	651	33	5
2.5 < BRN < 10.0	71	11	15
10.0 < BRN < 35.0	66	12	18
35.0 < BRN < 85.0	30	5	17
BRN > 85.0	0	0	–

TABLICA A31: Raspodjela broja dana po razredima za  $\Theta$  u AGS-u (K) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
$\Theta$ < 285	58	0	0
285 < $\Theta$ < 290	160	6	4
290 < $\Theta$ < 295	336	32	10
295 < $\Theta$ < 300	234	23	10
300 < $\Theta$ < 305	77	3	4
305 < $\Theta$ < 310	1	1	100
$\Theta$ > 310	0	0	–

TABLICA A32: Raspodjela broja dana po razredima za  $r$  u AGS-u (g/kg) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
$r$ < 6	159	2	1
6 < $r$ < 8	239	6	3
8 < $r$ < 10	249	15	10
10 < $r$ < 13	196	29	15
13 < $r$ < 16	21	2	10
$r$ > 16	0	0	–

TABLICA A33: Raspodjela broja dana po razredima za TPW (mm) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
TPW < 10	13	0	0
10 < TPW < 20	229	2	1
20 < TPW < 25	201	7	3
25 < TPW < 35	342	36	11
35 < TPW < 45	80	20	25
TPW > 45	0	0	–



## Ponoć, 2009.-2013. Zadar

TABLICA A34: Raspodjela broja dana po razredima za SI ( $^{\circ}\text{C}$ ) za sva radiosondažna mjerenja i "konvektivni" set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
SI < -6	0	0	–
-6 < SI < -4	3	2	67
-4 < SI < -1	27	8	30
-1 < SI < 1	139	38	27
1 < SI < 2	107	24	22
2 < SI < 4	202	29	14
SI > 4	0	0	–

TABLICA A35: Raspodjela broja dana po razredima za LI ( $^{\circ}\text{C}$ ) za sva radiosondažna mjerenja i "konvektivni" set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
LI < -8	1	1	100
-8 < LI < -5	7	2	29
-5 < LI < -2	36	17	47
-2 < LI < 0	83	24	29
0 < LI < 1	93	25	27
1 < LI < 2	84	17	20
2 < LI < 3	85	11	13
LI > 3	0	0	–

TABLICA A36: Raspodjela broja dana po razredima za SWEAT za sva radiosondažna mjerenja i "konvektivni" set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
SWEAT < 125	530	50	9
125 < SWEAT < 175	190	34	18
175 < SWEAT < 225	70	16	23
225 < SWEAT < 300	34	14	41
300 < SWEAT < 400	11	7	64
SWEAT > 400	0	0	–

TABLICA A37: Raspodjela broja dana po razredima za K ( $^{\circ}\text{C}$ ) za sva radiosondažna mjerenja i "konvektivni" set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
K < 25.0	469	24	5
25.0 < K < 27.5	95	9	9
27.5 < K < 30.0	118	23	19
30.0 < K < 35.0	135	49	36
35.0 < K < 40.0	26	18	69
K > 40.0	0	0	–

TABLICA A38: Raspodjela broja dana po razredima za TT ( $^{\circ}\text{C}$ ) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
TT < 45.0	372	16	4
45.0 < TT < 47.5	178	28	16
47.5 < TT < 50.0	176	49	28
50.0 < TT < 55.0	114	28	25
55.0 < TT < 60.0	3	2	67
TT > 60.0	0	0	–

TABLICA A39: Raspodjela broja dana po razredima za CAPE (J/kg) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
CAPE < 100	723	73	10
100 < CAPE < 1000	108	45	42
1000 < CAPE < 2200	11	4	36
2200 < CAPE < 3200	6	3	50
CAPE > 3200	0	0	–

TABLICA A40: Raspodjela broja dana po razredima za CIN (J/kg) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
CIN < –150	154	30	19
–150 < CIN < –100	50	14	28
–100 < CIN < –50	61	20	33
–50 < CIN < –25	33	18	55
–25 < CIN < –5	17	11	65
CIN > –5	0	0	–

TABLICA A41: Raspodjela broja dana po razredima za BRN za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
BRN < 2.5	658	67	10
2.5 < BRN < 10.0	69	23	33
10.0 < BRN < 35.0	54	15	28
35.0 < BRN < 85.0	32	12	38
BRN > 85.0	0	0	–

TABLICA A42: Raspodjela broja dana po razredima za  $\Theta$  u AGS-u (K) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
$\Theta$ < 285	27	2	7
285 < $\Theta$ < 290	132	22	17
290 < $\Theta$ < 295	252	46	18
295 < $\Theta$ < 300	313	50	16
300 < $\Theta$ < 305	122	5	4
305 < $\Theta$ < 310	2	0	0
$\Theta$ > 310	0	0	–

TABLICA A43: Raspodjela broja dana po razredima za  $r$  u AGS-u (g/kg) za sva radiosondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
$r$ < 6	180	9	5
6 < $r$ < 8	248	26	10
8 < $r$ < 10	238	40	17
10 < $r$ < 13	155	41	26
13 < $r$ < 16	24	8	33
$r$ > 16	0	0	–

TABLICA A44: Raspodjela broja dana po razredima za TPW (mm) za sva radi-  
osondažna mjerenja i “konvektivni” set podataka te pripadni relativni udio.

	Svi dani	Konvektivni dani	Udio (%)
TPW < 10	17	1	6
10 < TPW < 20	277	17	6
20 < TPW < 25	204	22	11
25 < TPW < 35	300	62	21
35 < TPW < 45	48	22	46
TPW > 45	0	0	–

## Prilog B

TABLICA B1: Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti za sve dane od travnja do rujna.

	SI (°C)	LI (°C)	SWEAT	K (°C)	TT (°C)	CAPE (J/kg)	CIN (J/kg)	BRN	$\Theta$ u AGS-u (K)	$r$ u AGS-u (g/kg)	TPW (mm)
Zd00	5.5	6.0	106.1	14.8	43.4	51.5	-39.6	9.6	289.1	6.5	18.7
Zd12	5.8	5.1	101.8	13.6	43.2	58.6	-26.2	12.4	290.9	6.2	18.1
Zg00	6.0	7.6	113.5	15.3	43.1	45.6	-35.4	14.5	286.5	6.3	18.9
Zg12	6.5	6.8	107.8	13.7	42.5	85.2	-22.2	24.3	288.0	6.2	18.2

TABLICA B2: Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti za dane s električnim pražnjenjem od travnja do rujna

	SI (°C)	LI (°C)	SWEAT	K (°C)	TT (°C)	CAPE (J/kg)	CIN (J/kg)	BRN	$\Theta$ u AGS-u (K)	$r$ u AGS-u (g/kg)	TPW (mm)
Zd00	1.9	1.0	153.9	29.2	47.9	235.1	-84.3	14.1	293.8	9.4	28.3
Zd12	1.9	0.3	132.9	25.9	48.1	199.9	-54.7	44.9	296.5	8.6	25.8
Zg00	0.6	0.7	182.5	31.1	48.9	214.3	-106.1	32.2	294.7	10.0	31.7
Zg12	1.7	-0.3	148.3	26.4	48.2	328.4	-44.5	85.1	296.3	9.1	26.8

TABLICA B3: Medijani indeksa nestabilnosti za sve dane od travnja do rujna

	SI (°C)	LI (°C)	SWEAT	K (°C)	TT (°C)	CAPE (J/kg)	CIN (J/kg)	BRN	$\Theta$ u AGS-u (K)	$r$ u AGS-u (g/kg)	TPW (mm)
Zd00	4.7	5.4	88.6	19.2	45.2	0.0	0.0	0.0	288.9	6.4	18.3
Zd12	5.0	4.3	84.2	18.1	44.6	0.0	0.0	0.0	290.7	6.2	17.9
Zg00	5.2	6.4	100.6	19.2	44.6	0.0	0.0	0.0	287.2	6.1	18.1
Zg12	5.7	5.7	95.1	18.1	43.9	0.0	0.0	0.0	288.7	5.9	17.4

TABLICA B4: Medijani indeksa nestabilnosti za dane s električnim pražnjenjem od travnja do rujna

	SI ( $^{\circ}\text{C}$ )	LI ( $^{\circ}\text{C}$ )	SWEAT	K ( $^{\circ}\text{C}$ )	TT ( $^{\circ}\text{C}$ )	CAPE (J/kg)	CIN (J/kg)	BRN	$\Theta$ u AGS-u (K)	$r$ u AGS-u (g/kg)	TPW (mm)
Zd00	1.5	0.8	140.7	30.9	48.3	43.2	-50.8	1.4	294.3	9.4	28.5
Zd12	1.7	0.0	125.3	27.4	48.2	78.4	-27.0	5.3	297.1	8.4	26.1
Zg00	0.5	-0.1	166.7	31.5	49.4	61.8	-79.7	2.2	294.7	9.9	32.7
Zg12	1.5	-0.6	145.5	27.9	48.3	155.3	-17.0	9.5	296.4	9.4	27.6