



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO - MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK



MARTINA ČURIĆ

VEZA IZMEĐU RADIOSONDAŽNIH I
MODELIRANIH INDEKSA NESTABILNOSTI
ATMOSFERE I POJAVE MUNJA

Diplomski rad

Zagreb, 2015.

Ovaj rad izrađen je na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu, Geofizički odsjek, pod vodstvom doc. dr. sc. Maje Telišman Prtenjak i predan je na ocjenu Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu radi stjecanja zvanja magistar fizike-geofizike.

Zahvaljujem svojoj mentorici doc. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak na strpljenju, pomoći i stručnom vodstvu pri izradi ovog diplomskog rada.

Hvala Igoru Kosu i Jadranu Jurkoviću na početnim uputama, sugestijama i komentarima.

Zahvaljujem Dunji Plačko-Vršnak, Krunoslavu Mikecu i Mariji Mokorić na podacima o tipovima vremena za Hrvatsku za razdoblje od 2011. do 2013. godine i prof. dr. sc. Hans-Dieter Betzu na ustupljenim LINET podacima za razdoblje od 2007. do 2013. godine.

Takoder zahvaljujem Vinku Šoljanu na podacima za usporedbu modeliranih (iz ALADIN modela) i radiosondažnih indeksa nestabilnosti za zagrebačku domenu.

Najveće hvala mojim roditeljima na razumijevanju i potpori tijekom čitavog školovanja.

Sadržaj

Popis kratica	a
1 Uvod	1
1.1 Motivacija	1
1.2 Konvekcija i uvjetna nestabilnost	2
1.3 Indeksi nestabilnosti	3
1.3.1 Indeks podizanja, LI	3
1.3.2 Konvektivna raspoloživa potencijalna energija, CAPE	4
1.3.3 Energija inhibicije konvekcije, CIN	5
1.3.4 K indeks	6
1.3.5 Total Totals indeks, TT	6
1.3.6 Showalter indeks, SI	7
1.3.7 SWEAT indeks	7
1.3.8 Bulk Richardsonov broj, BRN	8
1.3.9 Indeks ukupne oborive vode, TPW	8
1.3.10 Karakteristike atmosferskog graničnog sloja	9
1.4 Naboj u kumulonimbusu i proces elektrifikacije	9
2 Dosadašnja istraživanja u Hrvatskoj i svijetu	11

3	Cilj rada	14
4	Materijali i metode	15
4.1	Radiosondažna mjerenja	15
4.2	LINET podaci	16
4.3	Domena i pod-domene interesa	17
4.4	Metoda određivanja granica nestabilnosti	19
4.5	Metodologija određivanja tipova vremena i tipova strujanja	19
4.6	ALADIN model	21
4.7	Statističke mjere	22
5	Rezultati i diskusija	25
5.1	Osobine detektiranih munja	25
5.2	Analiza indeksa nestabilnosti atmosfere	31
5.3	Reprezentativnost radiosondaža	36
5.4	Analiza režima vremena i tipova strujanja	37
5.5	Veza između radiosondažnih i modeliranih indeksa nestabilnosti at- mosfere	41
6	Zaključci	48
	Literatura	54
	Popis slika	59
	Popis tablica	62

Prilozi

i

Prilog A

Godišnji i dnevni hodovi ukupnog broja el. pražnjenja i prosječnog
broja dana s pražnjenjem i

Prilog B

Reprezentativnost radiosondaža v

Prilog C

Učestalost tipova strujanja po mjesecima vii

Prilog D

Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po režimima vremena . . . ix

Prilog E

Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po tipovima strujanja . . . xiii

Popis kratica

AGL – Visina iznad tla, *eng. Altitude above ground level*

AGS – Atmosferski granični sloj

ALADIN – *fr. Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Development International*

ARPEGE – *fr. Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle*

BRN – *eng. Bulk Richardson's number*

BS01 – *eng. Bulk shear 0–1 km*

BS06 – *eng. Bulk shear 0–6 km*

CAPE – Konvektivna raspoloživa potencijalna energija, *eng. Convective available potential energy*

CIN – Energija inhibicije konvekcije, *eng. Convective inhibition*

d – Indeks slaganja

ECMWF – Europski centar za srednjoročnu prognozu vremena, *eng. European centre for medium-range weather forecasts*

EL – Ravnotežni nivo, *eng. Equilibrium level*

IFS – *eng. Integrated Forecast System*

K – *eng. K index*

LCL – Razina kondenzacije, *eng. Lifting condensation level*

LFC – Razina slobodne konvekcije, *eng. Level of free convection*

LI – *eng. Lifting index*

LNB – Razina neutralnog uzgona, *eng. Level of neutral buoyancy*

LR0-3 – *eng. Lapse rate sfc-3 km AGL*

LR3-6 – *eng. Lapse rate 3–6 km AGL*

MAE – Srednja apsolutna greška, *eng. Mean absolute error*

MaxBuo – *eng. Maximum buoyancy index*

MLBRN – *eng. Bulk Richardson number from mixed layer parcel CAPE (lowest 100 hPa)*

MLCAPE – *eng. Mixed layer parcel (lowest 100 hPa) CAPE*

MLCAPE3 – *eng. Mixed layer parcel (lowest 100 hPa) CAPE LFC-3km*

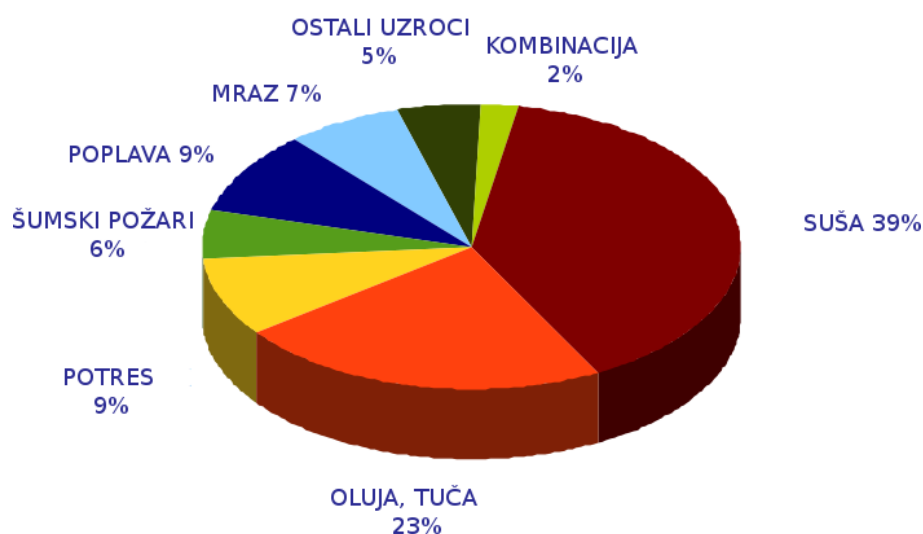
MLCD – *eng. Mixed layer parcel cloud depth (EL-LCL)*

MLCIN – eng. *Mixed layer parcel (lowest 100 hPa) CIN*
 MLEL – eng. *Mixed layer parcel equilibrium level*
 MLLCL – eng. *Mixed layer parcel lifting condensation level*
 MLLI – eng. *Mixed layer parcel (lowest 100 hPa) Lifted index*
 MLMIX. – eng. *Mean mixed layer mixing ratio*
 MLTHETA – eng. *Mean mixed layer potential temperature*
 MUCAPE – eng. *Most unstable parcel (in the lowest 300 hPa) CAPE*
 MUCAPE3 – eng. *Most unstable parcel (in the lowest 300 hPa) CAPE LFC-3 km*
 MUCD – eng. *Most unstable parcel cloud depth (EL-LCL)*
 MUCIN – eng. *Most unstable parcel (in the lowest 300 hPa) CIN*
 MUEL – eng. *Most unstable parcel equilibrium level*
 MULCL – eng. *Most unstable parcel lifting condensation level*
 MULI – eng. *Most unstable parcel (in the lowest 300 hPa) Lifted index*
 RAE – Relativna apsolutna greška, eng. *Relative absolute error*
 RC-LACE – eng. *Regional Cooperation for Limited Area Modeling in Central Europe*
 RMSD – Korjen srednje kvadratne devijacije, eng. *Root mean squared deviation*
 RMSE – Korjen srednje kvadratne pogreške, eng. *Root mean squared error*
 SA – Suha adijabata
 SI – eng. *Showalter index*
 SRH01 – eng. *Storm relative helicity 0–1 km*
 SRH03 – eng. *Storm relative helicity 0–3 km*
 SWEAT – eng. *Severe Weather Threat Index*
 T850 – Temperatura na 850 hPa
 TPW – Ukupna oboriva voda, eng. *Total precipitable water*
 TT – eng. *Total totals index*
 Tv – Virtualna temperatura
 W850 – Brzina vjetra na 850 hPa
 W850dir – Smjer vjetra na 850 hPa
 WMO – Svjetska meteorološka organizacija, eng. *World Meteorological Organization*

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 duboke konvekcije obilne oborine, tuča, olujni udari vjetrova, 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 raspodjelu. 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. Radari često nisu dovoljno gusto postavljeni kako bi pokrili cijeli prostor koji želimo promatrati, posebice u Hrvatskoj. Širenje radio valova



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

u atmosferi podložno je modifikaciji (uslijed refrakcije, refleksije, apsorpcije, difrakcije itd.), što uzrokuje stvaranje područja “radarskih rupa” gdje radar ne daje kvalitetne meteorološke informacije. Satelitski podaci, koji u potpunosti pokrivaju cijelu površinu Zemlje, mogu detektirati razvoj duboke konvekcije jedino u slučaju kada konvekcija nije prekrivena višom naoblakom. Motreni podaci ovise o naoblaci i tipu oblaka u mreži postaja (automatskih i klimatoloških) i mogu biti nedovoljno česti i gusti za detektiranje manjih konvektivnih sustava. Radiosondažna mjerenja su skupa pa se najčešće vrše samo dva puta dnevno na malom broju postaja. Jedna od trenutno najpouzdanijih metoda detekcije konvekcije je iz podataka o sijevanju, zato što se munje detektiraju jedino u dubokim konvektivnim oblacima, ali treba naglasiti da su mjerenja 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 (npr. Pandžić, 2002). Izvori statičke 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 nužan 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 ukazuju na stabilno ili nestabilno stanje atmosfere. Te granične vrijednosti nisu fiksne nego ovise o sinoptičkim uvjetima, geografskom položaju, klimatskim uvjetima i promatranju sezoni. U ovom poglavlju bit će opisani (a kasnije i korišteni) indeksi nestabilnosti (tablica 1.1) koji su se pokazali kao 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	Lifting 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 ($T_{500\check{c}}$). Definiran je

jednadžbom (Galway, 1956):

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

gdje je

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

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 za vertikalno ubrzanje zbog uzgona. Definira se kao:

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

gdje je g ubrzanje sile teže, z_{LFC} visina slobodne konvekcije, z_{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 je 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. (npr. 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>).

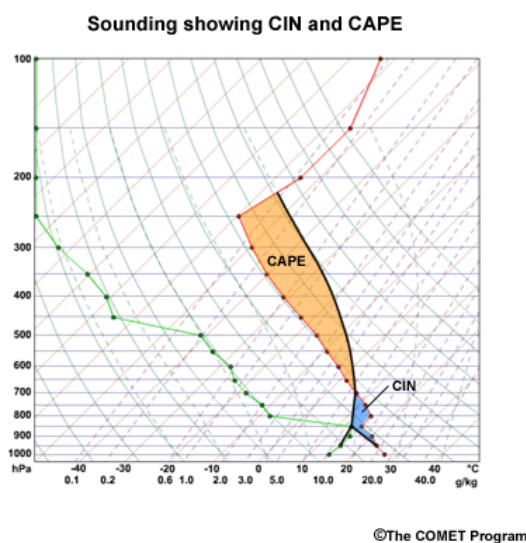
CAPE < 0	Stabilno.
0 < CAPE < 1000	Granično nestabilno.
1000 < CAPE < 2500	Umjereno nestabilno.
2500 < CAPE < 3500	Jako nestabilno.
CAPE > 3500	Ekstremno nestabilno.

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. 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 može biti jača.



SLIKA 1.2: Prikaz CAPE-a i CIN-a na termodinamičkom dijagramu. Zelena linija predstavlja temperaturu rosišta, crvena linija temperaturu okoliša, 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 pripadnoj 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. Vrijednosti temperatura izražene su 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 (°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 nevrijeme.
$K > 30$	Velika vjerojatnost za grmljavinsko nevrijeme.
$K = 40$	Najbolji potencijal za grmljavinsko nevrijeme.

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:

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

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 izvan-tropskih širina za razvoj slobodne konvekcije (<http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices.php>).

$\text{TT} < 45$	Stabilno.
$45 < \text{TT} < 50$	Slab potencijal za nevrijeme.
$50 < \text{TT} < 55$	Mogući potencijal za nevrijeme.
$55 < \text{TT} < 60$	Veliki potencijal za nevrijeme.

1.3.6 Showalter indeks, SI

SI također je dobar za predviđanje konvektivnih nestabilnosti u atmosferi i jedan je od najstarijih (Showalter, 1947). Definiran je kao

$$\text{SI} = T_{500\text{ok}} - T_{500\text{č}}. \quad (1.7)$$

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.

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.

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 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 f_8 i f_5 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 i razvoja 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.

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.

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 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 značajne mokre 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 obično 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 usrednjene u najnižih 500 m unutar AGS-a (*eng.* mean mixed layer theta, Θ_{ml})¹ i usrednjenog omjera miješanja (*eng.* mean mixed mixing ratio, r_{ml})² u istom sloju.

1.4 Naboj u kumulonimbusu i proces elektrifikacije

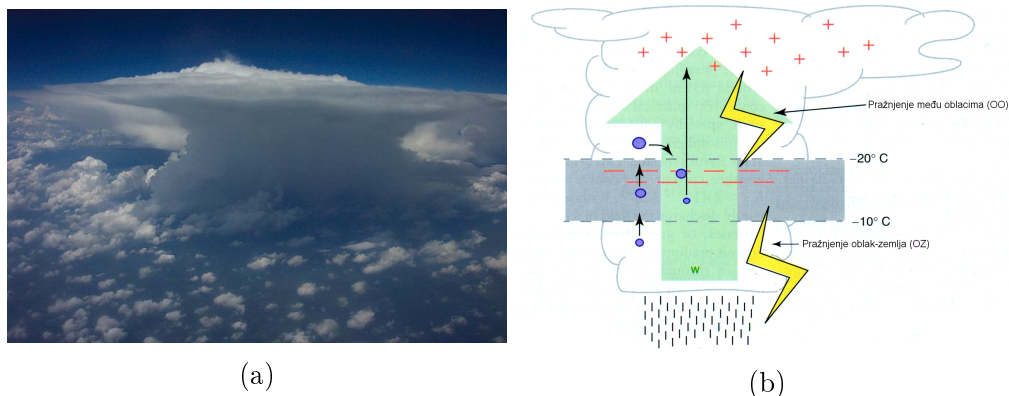
Konvektivni oblaci koji će biti analizirani u ovom radu su kumulonimbusi (Cb). Kumulonimbus je oblak velikog vertikalnog razvoja (slika 1.3 (a)). Nastaje kao posljedica termala koji vertikalno prenose vodenu paru u više slojeve troposfere i donje slojeve stratosfere. Osnovna građevna jedinica Cb-a je konvektivna ćelija, 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 ćelija nestane nakon približno 20 minuta, ali ako postoji dovoljno topline i vlage u atmosferi vrlo brzo mogu nastati nove konvektivne ćelije. To 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 preraspodjela 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). Mjerenja pokazuju da Cb koji ne razvije svoju zaleđenu fazu, najčešće ne proizvodi grmljavinu i munje. Shematizirani prikaz idealizirane raspodjele naboja

¹Temperatura $\Theta_m(K)$ koju bi imala čest zraka kad bi se adijabatičkim procesom dovela na tlak od 1000 hPa

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

unutar oblaka vidimo na slici 1.3. (b).



SLIKA 1.3: Bočni prikaz kumulonimbusa (Cb) u njegovoj zreloj fazi (a) <http://science-edu.larc.nasa.gov/SC00L/images/Cb10.jpg>, shematski prikaz naboja unutar oblaka (Holton, 2002) (b).

Kružići predstavljaju hidrometeore koji se u naletu vjetra gibaju uvis ili, ako su teži, padaju te se pritom sudaraju s manjim česticama. Gravitacijsko razdvajanje lakših, uglavnom 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 oblaka pa dolazi do mijenjanja jakosti električnog polja. Kada vrijednost električnog polja prijeđe kritičnu vrijednost od oko 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 (npr. 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 dugi niz godina (npr. Byers i Rodebush, 1948; Cotton i sur., 2011) počevši analizom grmljavinskih dana koje je napravio Brooks (Brooks, 1925). Razni autori pokušavaju pronaći fizikalne uzroke nastanka duboke konvekcije, analizirati rezultate konvektivnog stanja te ih prognozirati. Prognoze se između ostalog temelje i na prepoznavanju tipičnih sinoptičkih vremenskih tipova (npr. Pineda i sur., 2010) i proračunu indeksa nestabilnosti bilo iz radiosondaža (npr. Manzato, 2003), modela (npr. Manzato, 2008) ili na temelju satelitskih podataka (npr. Smiljanić i sur., 2013/2014).

Pineda i sur. (2010) su analizirali tipove vremena na temelju objektivne metode (metode glavnih komponenata) tijekom detektiranog sijevanja iznad Katalonije (Španjolska) u razdoblju 2003.–2007. Pri tome koriste podatke prizemnog polja tlaka na mreži od $1^\circ \times 1^\circ$ svakih 6 h. Rezultati su ukazali na devet najčešćih vremenskih tipova koji su rezultirali pojavom munja. 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.

Korištenje indeksa nestabilnosti ima dugu tradiciju u prognozi konvekcije (npr. Doswell i Schultz, 2006) dajući mogućnost prikaza konvektivne aktivnosti kroz jedan broj (obično dobiven iz radiosondažnih profila). Sánchez i sur. (2009) su pokazali različitim regresijskim modelima da ne postoji indeks nestabilnosti iz radiosondaža koji je jednako dobar u svim istraživanim lokacijama. Indeksi nestabilnosti su zasebno dizajnirani da opišu jedan fizikalni mehanizam uključen u konvekciju; dovoljno vlažan i dubok sloj u nižoj ili srednjoj atmosferi (npr. rosište (T_d) na 850 hPa), uvjetnu nestabilnost (SI, LI, K) i pokretački mehanizam koji

će započeti konvekciju (koji uvelike ovisi o lokalnoj orografiji i lokalnoj klimatologiji konvekcije). Analiza koju su napravili Sánchez i sur. (2009) je pokazala da su Showalter i T_d (850 hPa) indeksi najuspješniji prediktori konvekcije bez obzira na ispitivano područje. Pa ipak, tipične granične vrijednosti za pojavu opasnog vremena ne moraju se podudarati na različitim geografskim područjima (Doswell i Schultz, 2006). Zbog toga vrlo lako može doći do pogrešne interpretacije indeksa ukoliko se koriste granične vrijednosti (pragovi) van područja za koje su izvedeni (Tudurí i Ramis, 1997).

Manzato (2003) je u svojoj studiji izradio klimatologiju konvektivnih indeksa nestabilnosti koje vrijede za Udine (Italija). Pri tome je koristio 5050 radiosondažnih podataka za topli dio godine u razdoblju od 1995. do 2001. godine. Mjera za odabir konvektivnog dana bila je pojava munja OZ tipa (barem tri pražnjenja tokom 6 h) na temelju čega je definirao parametar broja munja. Radio je korelacije između parametra broja munja i 30-ak indeksa nestabilnosti (između ostalih i veličine 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.

Manzato (2008) je također uspoređivao 40 radiosondažnih indeksa nestabilnosti s modeliranim iz modela Europskog centra (*eng.* ECMWF). Usporedba je napravljena pomoću četiri statistička parametra (koeficijent linearne determinacije, pristranost (bias), korijen srednje kvadratne pogreške i relativna apsolutna pogreška). Uočio je da samo 15 indeksa ima visoku vrijednost koeficijenta determinacije ($r^2 > 0.5$) koja vrijedi za prognozu do 96 h unaprijed. Najbolje rezultate je dala prognoza koja je kretala u 12 UTC.

Groenemeijer i van Delden (2007) su ispitivali uspješnost indeksa dobivenih sondazom 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 donjih 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.

U Hrvatskoj se do unatrag 10-ak godina izrađuju uglavnom klimatološke studije bazirane na podacima o grmljavini i grmljavinskim danima (npr. Penzar i sur., 2001; Zaninović i sur., 2008) odnosno tuči (npr. Počakal i Štalec, 2003; Počakal i sur., 2009). Izuzetak je rad Belušića i sur. (2007) koji koriste satelitske, sinop-

tičke i aerosondažne podatke te MM5 meteorološki model u studiji konvektivne oluje nad Jadranom, što je prouzročilo rezonantne morske valove. Od 2008. godine, instalacija senzora za praćenje električnih pražnjenja na području Hrvatske te dostupnost LINET baze podataka omogućuju dodatne analize (npr. Mikuš Jurković i sur., 2015). Mikuš i sur. (2012) izrađuju klimatologiju sijevanja (kao mjere konvektivne aktivnosti) duž čitave Hrvatske koja je bila podijeljena na 6 geografskih regija. Uzimaju u obzir četverogodišnje razdoblje 2006.–2009. koje 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 sezona. Područje sjevernog Jadrana pokazalo se kao jedno od najkonvektivnijih u Hrvatskoj. Također je na temelju mjerenja munja određen povoljan tip vremena za konvekciju (prevladavaju ciklone i bezgradijentno prizemno polje tlaka) i dominantan režim strujanja (SW, NW, NE).

Smiljanić i sur. (2013/2014) su pokušali odrediti granične vrijednosti (ranojutarnjih) indeksa nestabilnosti ($K0^3$, K, LI, TPW) dobivenih iz satelita (na vremenskoj i prostornoj rezoluciji od 5 min i 3 km u atmosferi bez oblaka) koji bi upozorili na pojavu konvekcije. Koristili su profile temperature i vlažnosti dobivene fizikalnom metodom pretraživanja (*eng. Physical Retrieval Method*, PRM) za 27 slučajeva iz 2009–2010. Pri tome su isključili K0 parametar jer sadrži u svojoj definiciji vrijednosti 1000 hPa plohe koje nad planinskim područjima ne postoje. Iako se konvektivna aktivnost pojavljivala i za vrijednosti $LI \leq 0^\circ\text{C}$, veliku vjerojatnost ($> 90\%$) za pojavu duboke konvekcije dobili su za $LI \leq -6^\circ\text{C}$ i $K > 35^\circ\text{C}$. Istaknuli su da pragovi indeksa nestabilnosti nisu bili jednoznačni niti u prostoru niti u vremenu (varirali su od sezone do sezone). Primjena Hanssen-Kuiper (HK) mjere uspješnosti dala je pragove za početak konvekcije; $K = 15^\circ\text{C}$, $LI = 5^\circ\text{C}$ i $TPW \sim 13$ mm, ali ne i za pojavu opasnih oluja. Njena primjena na područje srednje Europe nije dala veliku povezanost s pojavom munja najvjerojatnije zbog relativno malenog uzorka i male domene. Ipak ističu vrijednosti, $K = 29^\circ\text{C}$, $LI = 1^\circ\text{C}$ i $TPW = 27$ mm, koje se podudaraju s vjerojatnošću većom od 60% za pojavu duboke konvekcije.

³ $K0 = 0.5[(\Theta_{e500} + \Theta_{e700}) - (\Theta_{e850} + \Theta_{e1000})]$, gdje su Θ_{e1000} , Θ_{e850} , Θ_{e700} i Θ_{e500} ekvivalentne potencijalne temperature na izobarnim plohama 1000, 850, 700 i 500 hPa.

3 Cilj rada

Studija koju su izradili Smiljanić i sur. (2013/2014) pokazala je neke limitirajuće faktore kod primjene satelitski izvedenih indeksa nestabilnosti; (1) relativno gruba vertikalna rezolucija profila temperature i vlažnosti iz PRM metode, (2) uvjet da atmosfera mora biti bez oblaka te (3) male vrijednosti KH mjere koja nije dala pouzdanije granične vrijednosti za razvoj opasnih oluja. Njihova analiza se može nastaviti i proširiti analizom indeksa izračunatih iz radiosondaža i numeričkog modela što do sada nije učinjeno. Kako su pragovi uvjetovani geografskim karakteristikama te zbog toga lako može doći do pogrešne interpretacije indeksa ukoliko se koriste “tuđe” granične vrijednosti (Tudurí i Ramis, 1997) cilj ovog rada je:

- (i) povezati indekse nestabilnosti iz radiosondažnih podataka s pojavom duboke konvekcije (odnosno pojavom munja) nad Hrvatskom i okolnim zemljama,
- (ii) odrediti graničnu vrijednost pojedinog indeksa nestabilnosti iznad koje bi vjerojatnost uspješne prognoze duboke konvekcije bila zadovoljavajuća,
- (iii) uočiti geografske specifičnosti pojave konvekcije nad kopnenim i obalnim područjima,
- (iv) povezati određene tipove vremena i režime strujanja s pojavom duboke konvekcije i indeksima nestabilnosti,
- (v) usporediti indekse nestabilnosti iz radiosondažnih podataka s indeksima dobivenima ALADIN mezoskalnim modelom.

Ukoliko se pokaže postojanje takvih povezanosti, one bi ukazale na razvoj određenih metoda s ciljem pravovremenog uočavanja nepovoljnih uvjeta. Time bi mogli pravovremeno intervenirati i pokušati umanjiti moguće štete u operativnoj prognozi.

4 Materijali i metode

U ovom radu proučavani su dani s konvektivnom aktivnošću nad područjem Zagreba, Zadra, Budimpešte, Szegeda, Beča, Udina i San Pietro Capofiume-a (SPC) za razdoblje od 1. siječnja 2007. do 31. prosinca 2013. godine. Za potrebe rada korišteni su podaci radiosondažnih postaja prikazani u tablici 4.1 te podaci o sijevanju koji su dobiveni iz sustava LINET (Betz i sur., 2009). Svi promatrani podaci obrađeni su pomoću programskog paketa Matlab.

TABLICA 4.1: Geografski položaj radiosondažnih postaja.

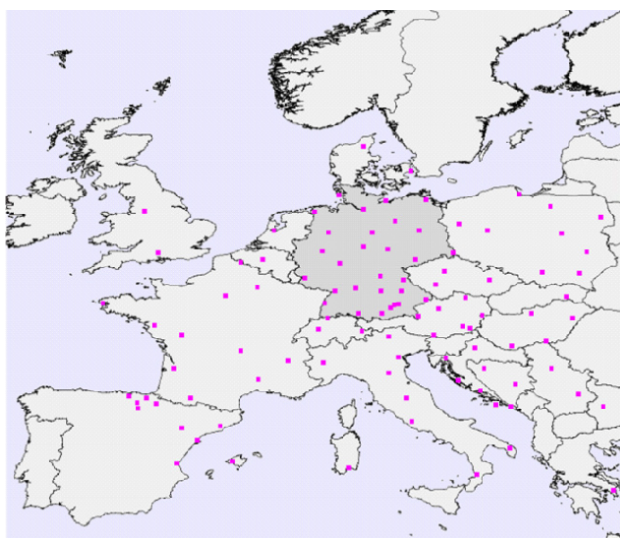
Postaja	Geografska širina	Geografska dužina	Nadmorska visina
Zagreb	45°49' N	16°02' E	123 m
Zadar	44°07' N	15°22' E	82 m
Budimpešta	47°29' N	19°04' E	138 m
Szeged	46°06' N	19°51' E	82 m
Beč	48°06' N	16°34' E	198 m
Udine	46°03' N	13°15' E	93 m
SPC	44°39' N	11°37' E	10 m

4.1 Radiosondažna mjerenja

S radiosondažnih postaja Zagreb, Zadar, Budimpešta, San Pietro Capofiume, Udine i Beč korišteni su podaci iz dva termina, u 12 i 00 h UTC, dok su s postaje Szeged korišteni podaci samo u 00 h UTC zato što se na toj postaji ne vrše mjerenja u 12 h UTC. Podaci radiosondažnih mjerenja u sebi sadrže informacije s razina na kojima pojedini meteorološki elementi znatnije odstupaju od linearnosti (značajni nivoi - oni koji značajno odstupaju od linearnog trenda) 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 korišteni su indeksi nestabilnosti prikazani u tablici 1.1, θ_{ml} , r_{ml} i podaci o strujanju na 850 i 700 hPa.

4.2 LINET podaci

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 4.1). U Hrvatskoj je do sada instalirano šest senzora i to u Dubrovniku, Splitu, Rijeci, Zagrebu, Zadru i Blatu na Korčuli. U Mađarskoj se nalazi 5 senzora, u Austriji 7, a u Italiji 8. Preporučeno je da razmak između senzora ne bude veći od 200 km, ali oni su u stanju registrirati pražnjenja udaljena i 800 km od senzora. Točnost određivanja lokacije je do 100 m (Betz i sur., 2009). Sam sustav u mogućnosti je detektirati sve četiri vrste pražnjenja, a za potrebe ovog rada, korišteni su podaci o ukupnom pražnjenju (OZ+OO). Podaci koji su dobiveni na raspolaganje ustupljeni su od strane Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ), a obuhvaćali su područje između 41–49° N i 8–20.5° E. Datoteka s podacima (slika 4.2) sadržava informaciju o točnoj lokaciji, odnosno geografskoj dužini i širini pražnjenja (kolone I i II), zatim informaciju o datumu (godina/mjesec/dan) (kolona III), točnom vremenu pražnjenja prikazanom u UTC-u s korakom od jedne minute (kolona IV), tipu pražnjenja (kolona V; 1 označava pražnjenje tipa OZ, a 2 pražnjenje tipa OO), polaritetu munje i amplitudi struje izraženoj u kA (kolona VI), visini munje za pražnjenje tipa OO izraženoj u km (kolona VII) te pogrešci lokacije izraženoj u kilometrima (kolona VIII).



SLIKA 4.1: Mapa LINET senzora u Europi (preuzeto iz Uglešić i sur., 2009).

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
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 4.2: Prikaz podatkovne datoteke za detekciju električnog pražnjenja. Kolone I i II sadržavaju informaciju o točnoj lokaciji pražnjenja, kolona III označava datum, kolona IV predstavlja točno vrijeme pražnjenja prikazano u UTC-u, kolona V daje informaciju o tipu pražnjenja, polaritet munje i amplituda struje nalaze se u koloni VI, visina munje za pražnjenje tipa OO nalazi se u koloni VII, dok je u posljednjoj, koloni VIII, prikazana pogreška lokacije.

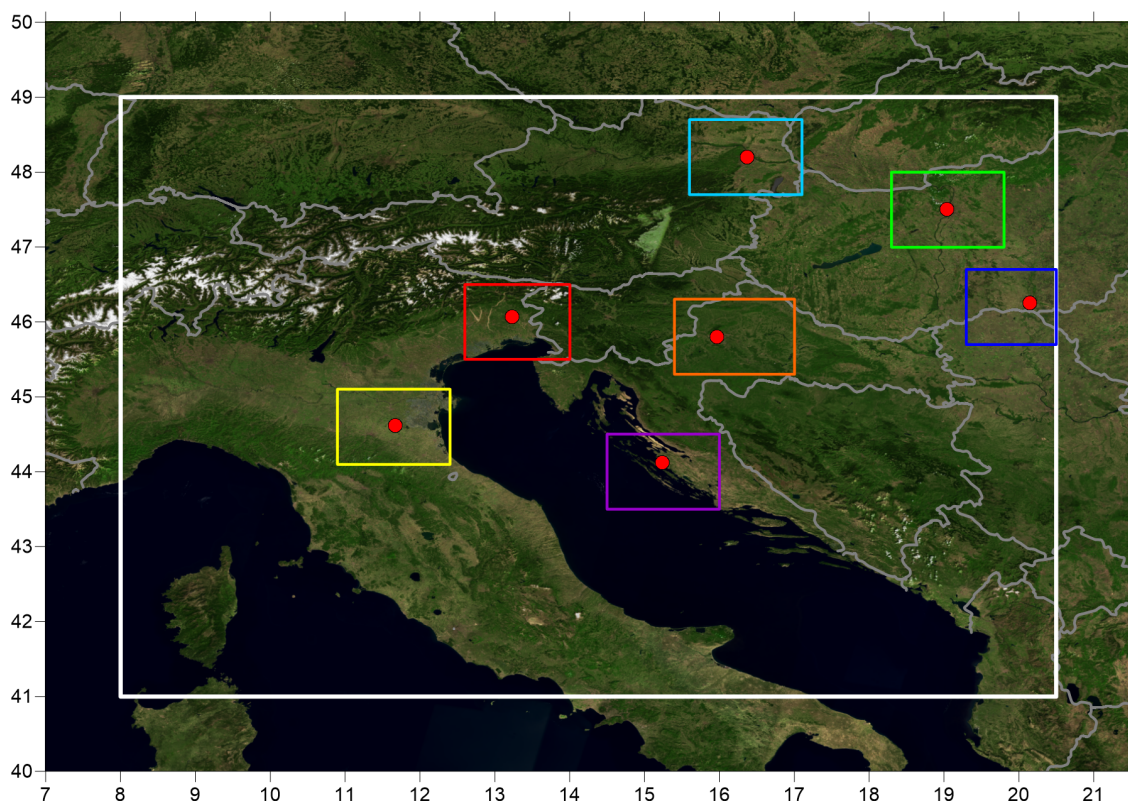
4.3 Domena i pod-domene interesa

Prema preporuci Svjetske meteorološke organizacije (*eng.* WMO) zadovoljavajuća udaljenost radiosondažnih mjerenja nad kopnom je 300 km te se smatra da radiosondažni profili daju razumnu informaciju o vertikalnoj strukturi atmosfere u radijusu od 150 km. Taj je radijus, uvjetno, reda veličine Rossbyevog radijusa deformacije u blago promjenjivom srednjem strujanju zraka. Iako profili iznad 850 hPa mogu predstavljati atmosferske uvjete šireg područja, pa čak i na udaljenostima ~ 150 km od točke mjerenja, donji dio profila može biti pod velikim utjecajem lokalnog (kompleksnog) terena i AGS-a. Time je reprezentativnost radiosondaže za veće područje donekle ograničena; osobito u slučaju kada je utjecaj sinoptičkih formacija slab, a konvekcija je uzrokovana lokalnim faktorima. Zbog relativno rijetkog uzorkovanja (najčešće 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 su određena reprezentativna područja za promatrane sonde kako bi se eliminirala pražnjenja koja su se dogodila predaleko od promatranog područja (tablica 4.2).

Reprezentativna područja u vremenskoj domeni također su odabrana proizvoljno, a za potrebe ovog rada promatrani su periodi od 1h prije te 10 h 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 pojavu konvektivnog dana te je definirano

TABLICA 4.2: Reprezentativna područja za promatrane radiosondažne postaje.

Postaja	Geografska širina	Geografska dužina
Zagreb	$45.3^{\circ} - 46.3^{\circ}$ N	$15.4^{\circ} - 17.0^{\circ}$ E
Zadar	$43.5^{\circ} - 44.5^{\circ}$ N	$14.5^{\circ} - 16.0^{\circ}$ E
Budimpešta	$47.0^{\circ} - 48.0^{\circ}$ N	$18.3^{\circ} - 19.8^{\circ}$ E
Szeged	$45.7^{\circ} - 46.7^{\circ}$ N	$19.3^{\circ} - 20.5^{\circ}$ E
Beč	$47.7^{\circ} - 48.7^{\circ}$ N	$15.6^{\circ} - 17.1^{\circ}$ E
Udine	$45.5^{\circ} - 46.5^{\circ}$ N	$12.6^{\circ} - 14.0^{\circ}$ E
SPC	$44.1^{\circ} - 45.1^{\circ}$ N	$10.9^{\circ} - 12.4^{\circ}$ E



SLIKA 4.3: Prikaz domene s dostupnim LINET podacima (bijeli pravokutnik) i promatrane pod-domene; žuti pravokutnik predstavlja reprezentativno područje oko SPC-a, crveni oko Udina, ljubičasti oko Zadra, narančasti oko Zagreba, svjetloplavi oko Beča, zeleni oko Budimpešte i tamnoplavi oko Szegeda. Crvene točke označavaju radiosondažne postaje.

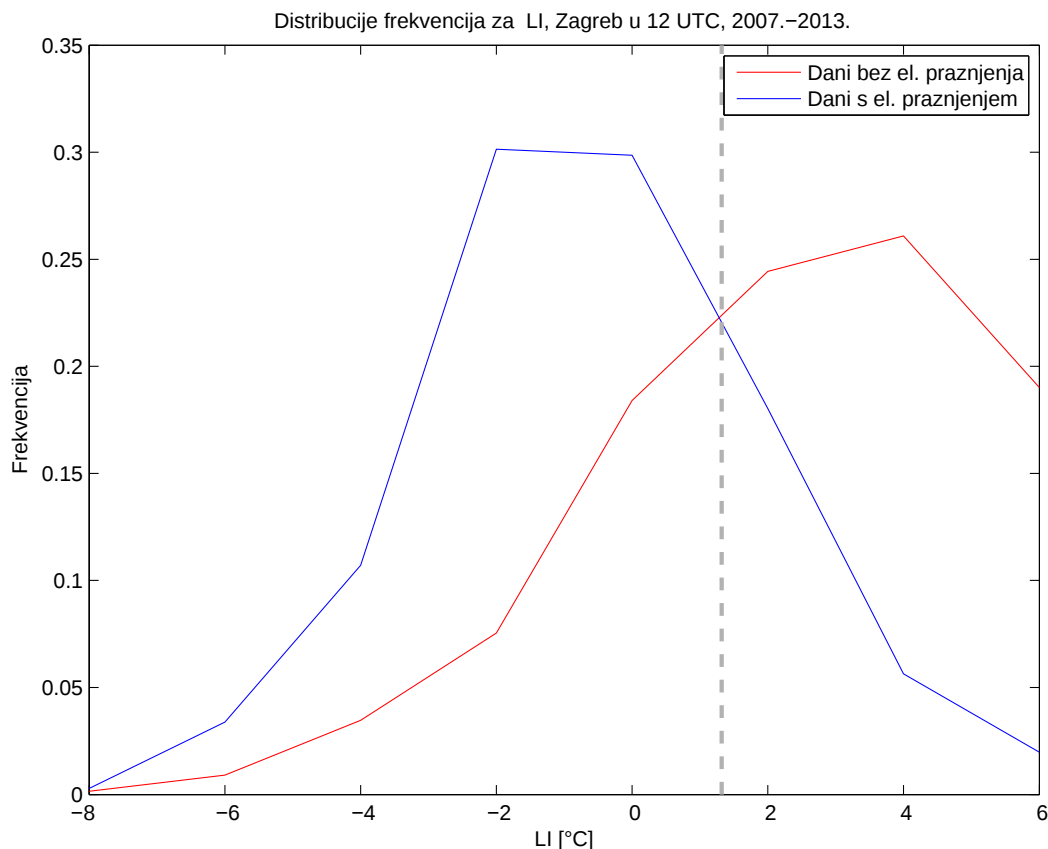
da će se za isti proglasiti svi oni dani u kojem je unutar jednog sata bilo pet ili više pražnjenja. Navedena strategija odabira je slična onoj koju je predložio Manzato (2007) gdje je korišten prag od tri pražnjenja unutar 6 h.

4.4 Metoda određivanja granica nestabilnosti

Vrijednosti indeksa nestabilnosti povezane su s vjerojatnošću pojave konvektivnog razvoja. Zato je za svaki indeks određena granična vrijednost koja određuje nestabilno stanje atmosfere pogodno za razvoj konvekcije. Za određivanje granica nestabilnosti korištena je metoda raspodjele frekvencija (Fontana, 2008). Metoda se temelji na crtanju relativnih frekvencija odabrane varijable (npr. Huntrieser i sur., 1997). Nacrtane su relativne frekvencije indeksa nestabilnosti za dane s detektiranim pražnjenjem i za dane bez pražnjenja. Indeksi su podijeljeni na intervale jednakih veličina, a zatim je izračunat broj dana s pražnjenjem i broj dana bez pražnjenja. Frekvencija $f_1(x)$ definirana je kao omjer broja dana s pražnjenjem u pojedinom intervalu (N_1) i ukupnog broja dana s pražnjenjem (N_{uk1}): $f_1(x) = \frac{N_1}{N_{uk1}}$, a frekvencija $f_0(x)$ kao omjer broja dana bez pražnjenja u pojedinom intervalu (N_0) i ukupnog broja dana bez pražnjenja (N_{uk0}): $f_0(x) = \frac{N_0}{N_{uk0}}$. Granična vrijednost nalazi se na mjestu koje najbolje odvaja te dvije raspodjele, a to je mjesto na kojem se one sijeku. Na slici 4.4 prikazan je primjer određivanja granice nestabilnosti za LI, za reprezentativno područje Zagreba u 12 UTC. Crvenom krivuljom prikazane su frekvencije dana s pražnjenjem, plavom frekvencije dana bez pražnjenja i sivom granična vrijednost nestabilnosti za promatrani indeks. Granična vrijednost nalazi se između 0°C i 2°C , tj. približno na 1°C . Zato je za graničnu vrijednost LI za promatrano područje korištena zaokružena vrijednost na cijeli broj, $LI = 1^\circ\text{C}$.

4.5 Metodologija određivanja tipova vremena i tipova strujanja

Jedan od ciljeva ovog rada je povezati tipove vremena i indekse nestabilnosti. Stoga se koristi klasifikacija tipova vremena za područje Hrvatske prema Poje (1965). Iako je ovo u osnovi subjektivna metoda, njena je prednost što je razvijena za istraživano područje pa olakšava definiranje suptilnih kvalitativnih razlika između sinoptičkih sustava. Postupak uključuje 29 vremenskih tipova koji predstavljaju četiri osnovne baričke skupine: područje niskog tlaka (ciklone i doline), područje visokog tlaka (anticiklone, greben visokog tlaka i most visokog tlaka), gotovo bez-gradijentno polje tlaka te područja advekcije koja se javljaju relativno rijetko. S obzirom da se neki tipovi vremena javljaju vrlo rijetko, osobito tijekom



SLIKA 4.4: Distribucije frekvencija za LI za reprezentativno područje Zagreba u 12 UTC. Crvenom krivuljom prikazane su frekvencije dana s pražnjenjem, plavom frekvencije dana bez pražnjenja i sivom crtkanom granična vrijednost nestabilnosti za promatrani indeks.

konvekcije (Mikuš i sur., 2012), u ovom radu korištena je grublja podjela koja se sastoji od 15 tipova vremena (tablica 4.3). Korištena je za cijelo promatrano područje. Klasifikaciju tipova vremena (za svaku poddomenu zasebno) napravili smo analizom prizemnog tlaka zraka i tlaka zraka na 850 i 500 hPa koristeći prizemne i visinske karte⁴. Tipovi strujanja u svakoj poddomeni određeni su iz radiosondažnih podataka. Korišteni su smjer i brzina vjetra na 850 i 700 hPa iz kojih je izračunat vektorski srednjak između te dvije plohe, a dobiveni srednjak je korišten za određivanje režima strujanja. Tipovi strujanja podijeljeni su na 8 smjerova: sjeverni (N), sjeveroistočni (NE), istočni (E), jugoistočni (SE), južni (S), jugozapadni (SW), zapadni (W) i sjeverozapadni (NW). Pojedinom smjeru vjetra pripadaju svi podaci koji se nalaze u intervalu od $\pm 22.5^\circ$ od tog smjera vjetra (npr. S smjer vjetra nalazi se na 180° , a u radu su svi podaci koji se nalaze između 157.5° i 202.5° pridjeljeni smjeru vjetra S).

⁴Korištene su karte sa stranica: <http://www.wetterzentrale.de/> i http://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_ukmet.html.

TABLICA 4.3: Tipovi vremena korišteni u radu; predstavljaju poopćenu kategorizaciju klasifikacije vremenskih tipova po uzoru na Poje (1965).

Kratica	Tip vremena
N1	prednja strana ciklone
N2	donja strana ciklone
N3	stražnja strana ciklone
N4	gornja strana ciklone
N5	središte ciklone
V1	prednja strana anticiklone
V2	donja strana anticiklone
V3	stražnja strana anticiklone
V4	gornja strana anticiklone
V5	središte anticiklone
Dol1	prednja strana doline
Dol2	os doline
Dol3	stražnja strana doline
g	greben visokog tlaka
BG	bezgradijedntsko strujanje
V	most visokog tlaka

4.6 ALADIN model

ALADIN (*fr. Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Development International*) je numerički mezoskalni (ne)hidrostatički spektralni model koji se koristi na ograničenom području. Postoji nekoliko domena koje su definirane unutar RC-LACE projekta (*eng. Regional Cooperation for Limited Area Modeling in Central Europe*) započetog 1990-ih godina, a za Hrvatsku ona obuhvaća Alpe, Apeninski i Balkanski poluotok u Lambertovoj projekciji. Osnova ALADIN modela su prognostičke primitivne jednadžbe za komponente horizontalnog vjetra, temperature, specifične vlažnosti i prizemnog tlaka pomoću semi-implicitne semi-lagrangijanske sheme integracije s dva vremenska koraka (npr. Tudor i sur., 2013). Varijable se u modelu računaju u horizontalnoj mreži razlučivosti 8 km, a prognoza prizemnog vjetra dodatno se profinjuje dinamičkom adaptacijom na rezoluciju od 2 km (npr. Ivatek-Šahdan i Tudor, 2004). Vertikalna rastezljiva mreža prati orografiju i sadrži 37 nivoa (slika 4.5) s 8 nivoa ispod 1000 m: nivoi modela nalaze se približno na 20, 70, 150, 250, 380, 530, 710 i 920 m iznad orografije u modelu. Osim što se bazira na globalnim modelima IFS (*eng. Integrated Forecast System*) i ARPEGE (*fr. Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle*), u ovom radu hidrostatička verzija ALADIN model koristi ARPEGE polja kao početne i rubne uvjete.

Cilj je bio usporediti indekse nestabilnosti dobivene ALADIN modelom s indeksima izračunatim iz radiosondažnih podataka (tablica 4.4). Indeksi iz ALADIN modela su rezultat prognoze od 12 h prije mjerenja. Analiza je napravljena za područje Zagreba u vremenskom periodu od 1. siječnja 2008. do 31. prosinca 2013. godine

p	T	Td	dir	v	h
10040	120	81	215	2	0
10020	112	68	215	2	2
9960	106	64	220	2	7
9870	98	59	240	2	15
9750	92	56	285	2	25
9600	86	48	310	3	38
9430	76	35	320	4	53
9230	68	18	325	5	71
9000	60	-10	320	6	92
8750	52	-28	310	6	115
8490	40	-50	300	6	140
8200	24	-86	295	6	168
7900	10	-110	300	6	198
7580	-5	-145	305	6	231
7250	-23	-173	315	6	266
6910	-47	-207	320	6	304
6560	-75	-225	325	6	345
6200	-105	-245	330	7	389
5840	-137	-267	335	9	435
5470	-171	-291	335	10	484
5100	-211	-331	335	11	536
4720	-257	-357	335	13	593
4350	-305	-375	330	16	652
3980	-359	-419	325	19	714
3620	-419	-999	325	20	779
3260	-479	-999	320	20	849
2910	-539	-999	315	20	923
2570	-591	-999	315	22	1002
2240	-613	-999	315	21	1088
1920	-599	-999	310	17	1184
1620	-577	-999	300	15	1291
1330	-575	-999	295	14	1415
1060	-593	-999	290	11	1558
819	-619	-999	300	9	1718
593	-633	-999	320	8	1917
390	-633	-999	325	9	2174
212	-587	-999	340	8	2552
50	-441	-999	260	37	3489

SLIKA 4.5: Primjer pseuotempa iz ALADIN modela za Zagreb 2.6.2008. Model sadrži 37 nivoa i prizemni sloj. U prvom stupcu nalazi se tlak [$\times 10$ Pa], u drugom temperatura zraka [$\times 10^\circ\text{C}$], u trećem temperatura rosišta [$\times 10^\circ\text{C}$], u četvrtom smjer vjetra [deg], u petom brzina vjetra [m/s] i u šestom visina nivoa [dm].

u dva termina; 00 UTC i 12 UTC, i to samo za konvektivne dane.

4.7 Statističke mjere

Veza između indeksa nestabilnosti tražena je statističkom usporedbom modeliranih i izmjerenih podataka. S P_i je označena i -ta modelirana vrijednost, s O_i i -ta izmjerena vrijednost iz radiosondaža, $\overline{P}$ i $\overline{O}$ su pripadajuće srednje vrijednosti, a

σ_P i σ_P su standardne devijacije dobivene iz modela i radiosondaža. N je duljina nizova uspoređivanih podataka.

Koeficijent linearne determinacije govori koliki je postotak varijance opisan linearnom regresijom. Poprima vrijednosti između 0 i 1. Što je vrijednost koeficijenta linearne determinacije manja, ispitivana veza je slabija. Definira se kao kvadrat koeficijenta korelacije: $r^2 = \left(\frac{Cov(P, O)}{\sigma_P \sigma_O} \right)^2$, gdje je $Cov(P, O)$ kovarijanca između modeliranih i mjerenih podataka. Pristranost (bias) je statistička veličina koja opisuje pogrešku unutar modela. Pristranost je srednjak razlika procjenitelja i izmjerene vrijednosti: $bias = \overline{(P - O)}$.

Korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE) definiran je jednadžbom: $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$, dok je korijen srednje kvadratne devijacije (RMSD) opisan

formulom: $RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_{P_i} - \sigma_{O_i})^2}$. Srednja apsolutna pogreška (MAE)

definirana je kao: $MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i|$, a relativna apsolutna pogreška (RAE)

je jednaka $RAE = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - \overline{O}|}$. RMSE, RMSD, MAE i RAE pokazuju kolika

su odstupanja modeliranih od izmjerenih vrijednosti. Što su manje, model je pouzdaniji. RAE i MAE smatraju se boljim parametrima nego RMSE i RMSD zato što su manje osjetljivi na velike pogreške u prognozi u kraćim nizovima (Chai i Draxler, 2014). Indeks slaganja, d , ocjenjuje točnost modela i poprima vrijednosti između 0 i 1. Što je njegova vrijednost veća model je točniji. Definiran je izrazom:

$$d = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|P_i - \overline{O}| + |O_i - \overline{O}|)^2}.$$

TABLICA 4.4: Indeksi nestabilnosti korišteni za usporedbu ALADIN modela i radiosondaža

Indeks	Kratki opis
BS01	Bulk shear 0-1 km, razlika u brzini vjetra po slojevima od površine do 1 km.
BS06	Bulk shear 0-6 km, razlika u brzini vjetra po slojevima od površine do 6 km.
K	K indeks.
LR0-3	Stopa promjene virtualne temperature s visinom od površine do 3 km.
LR3-6	Stopa promjene virtualne temperature s visinom od 3 do 6 km.
MLBRN	Bulk Richardsonov broj unutar AGS-a (Tv).
MLCAPE	CAPE unutar AGS-a (Tv).
MLCAPE3	CAPE unutar AGS-a, LFC-3km (Tv).
MLCD	Debljina sloja oblaka u AGS-u (EL-LCL).
MLCIN	CIN unutar AGS-a (Tv).
MLEL	Ravnotežni nivo unutar AGS-a.
MLLCL	Nivo na kojem će čest, koja se dizala po SA, postati zasićena, unutar AGS-a.
MLLI	LI unutar AGS-a (Tv).
MLMIX	Omjer miješanja unutar AGS-a.
MLTHETA	Potencijalna temperatura unutar AGS-a.
MUCAPE	CAPE na najnestabilnijoj razini u najnižih 300 hPa (Tv).
MUCAPE3	CAPE na najnestabilnijoj razini u najnižih 300 hPa, LFC-3km (Tv).
MUCD	Debljina sloja oblaka na najnestabilnijoj razini (EL-LCL).
MUCIN	CIN na najnestabilnijoj razini u najnižih 300 hPa (Tv).
MUEL	Ravnotežni nivo na najnestabilnijoj razini.
MULCL	Nivo na kojem će čest, koja se dizala po SA, postati zasićena, na najnestabilnijoj razini.
MULI	LI na najnestabilnijoj razini u najnižih 300 hPa (Tv).
MaxBuo	Razlika maksimalne potencijalne temperature s ploha ispod 750 hPa i minimalne potencijalne temperature s ploha viših od 750 hPa.
SI	Showalter indeks.
SRH01	Relativna vrtložnost 0-1 km (eng. Storm relative helicity, SRH).
SRH03	Relativna vrtložnost 0-3 km (eng. Storm relative helicity, SRH).
SWEAT	SWEAT indeks.
T850	Temperatura na 850 hPa.
TPW	Indeks ukupne oborive vode.
TT	Total totals indeks.
W850	Brzina vjetra na 850 hPa.
W850dir	Smjer vjetra na 850 hPa.

5 Rezultati i diskusija

5.1 Osobine detektiranih munja

Karakteristike munja promatrane su iznad dva područja; kontinentalnog i obalnog. U kontinentalno područje spadaju Zagreb, Budimpešta, Szeged i Beč, a u obalno Zadar, Udine i San Pietro Capofiume. Za reprezentativno područje svake postaje prikazan je broj registriranih munja, broj dana s munjama i udio dana s registriranim munjama u promatranom razdoblju od 7 godina (tablica 5.1). Najveći broj električnih pražnjenja zabilježen je u Udinama koje se nalaze na području velike konvektivne aktivnosti (Manzato, 2007), dok je najmanje munja zabilježeno u SPC-u. Međutim, SPC ima jako velik broj dana s pražnjenjem pa možemo pretpostaviti da je pojava konvekcije na tom području česta, ali su konvektivni sustavi slabi.

TABLICA 5.1: Broj registriranih munja, broj dana s registriranim munjama i udio dana s registriranim munjama iznad reprezentativnih područja promatranih postaja.

Postaja	Broj munja	Broj dana s munjama	Udio dana s munjama
Zagreb	1006361	744	29%
Budimpešta	803927	542	21%
Szeged	753338	595	23%
Beč	718343	557	22%
Zadar	790758	945	37%
Udine	1443176	963	38%
SPC	461481	936	36%

Kod broja dana s električnim pražnjenjem vidi se razlika između kontinentalnog i obalnog područja. Iznad obalnog područja zabilježeno je više dana s registriranim munjama nego iznad kontinentalnog. Od kontinentalnih postaja Zagreb ima najveći broj dana sa zabilježenim munjama što je očekivano jer je on bliži obali nego ostali kontinentalni gradovi. Veći broj dana s munjama iznad obalnih područja

također je zabilježen u Christian i sur. (2003).

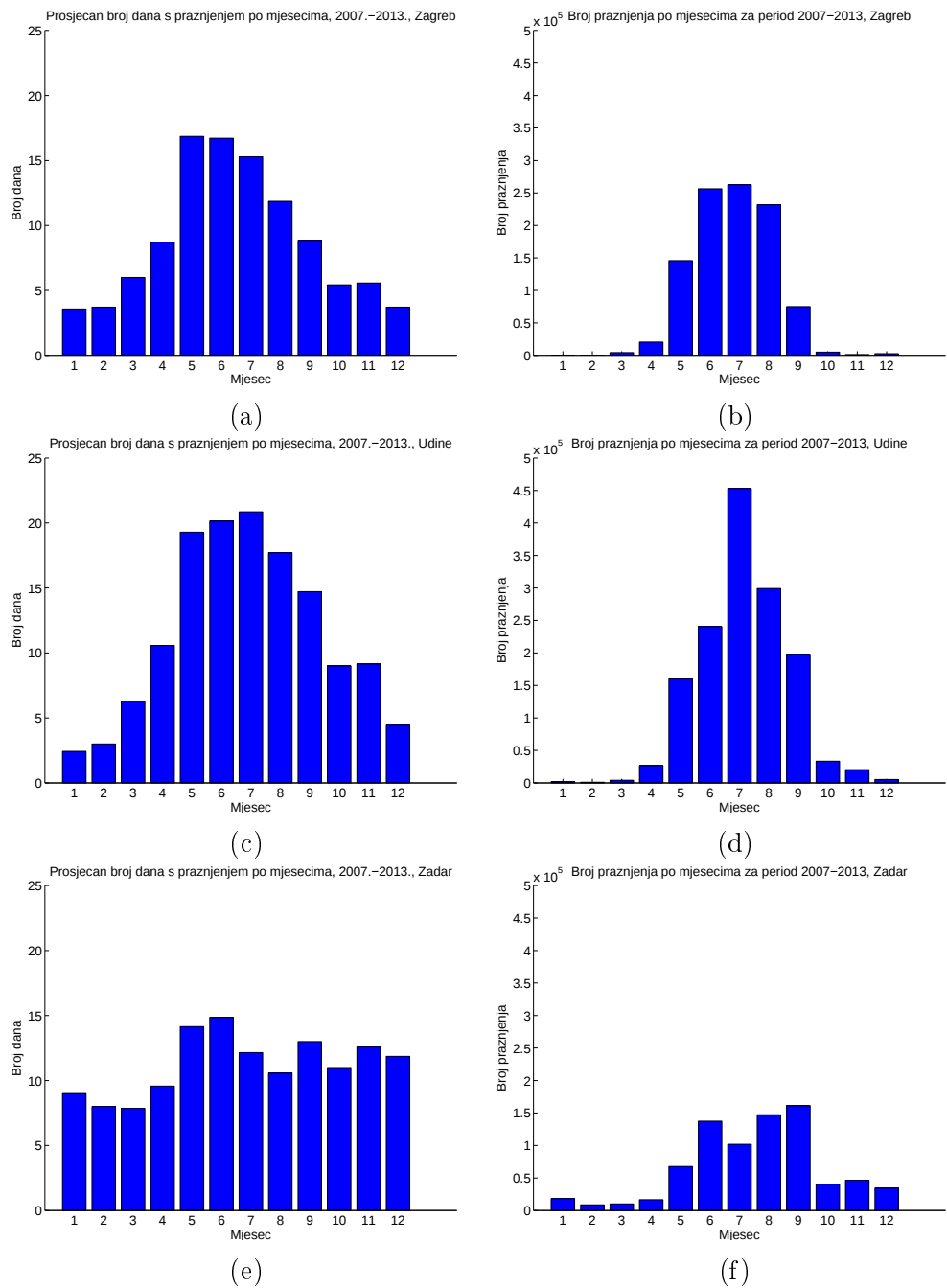
U tablici 5.2 prikazan je broj dana s pražnjenjem po godinama za sve promatrane postaje. Za svaku postaju je osjenčan najveći broj dana s pražnjenjem po godinama. Iznad kontinentalnih postaja maksimalna konvektivnost zabilježena je 2007. godine, što se slaže s rezultatima iz Mikuš i sur. (2012) gdje je za najveći dio Hrvatske upravo te godine zabilježen maksimalni broj dana s pražnjenjem. Iznad obalnog područja se za pojedine postaje razlikuju godine s maksimalnom konvektivnom aktivnošću. Za Zadar je to 2013. godina, dok je u Udinama i SPC-u najkonvektivnija bila 2008. godina. Godišnje varijacije u učestalosti konvektivne aktivnosti također su zabilježili Rivas Soriano i sur. (2005) za područje zapadnog Mediterana.

TABLICA 5.2: Broj dana s pražnjenjem po godinama za promatrane postaje. Osjenčan je najveći broj dana s pražnjenjem po godinama.

Godina	Zagreb	Budimpešta	Szeged	Beč	Zadar	Udine	SPC
2007.	162	86	114	103	137	152	167
2008.	134	84	110	85	139	155	183
2009.	101	76	84	87	143	146	155
2010.	76	81	83	68	136	133	112
2011.	80	68	60	79	123	118	95
2012.	93	71	68	75	112	122	94
2013.	98	76	76	60	152	137	130

Udari munja se ne događaju u pravilnim razmacima i nisu pravilno raspoređeni unutar godine, što možemo vidjeti na prikazanim godišnjim i dnevnim hodovima (slike 5.1 i 5.2). Budući da postoje velike sličnosti među hodovima kontinentalnih postaja, kontinentalno područje bit će predstavljeno godišnjim i dnevnim hodovima za Zagreb. Obalno područje bit će prikazano hodovima za Udine, koji su veoma slični hodovima za SPC, i hodovima za Zadar koji se jako razlikuju od hodova svih ostalih postaja. Godišnji i dnevni hodovi svih drugih postaja prikazani su u prilogu A.

Najveći broj pražnjenja 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. Maksimum broja pražnjenja za sve postaje osim Zadra je u lipnju ili srpnju. Zadar ima maksimum u broju zabilježenih električnih pražnjenja u rujnu zbog intenzivnijih ciklonalnih sustava koji se češće premještaju preko tog područja (Zaninović i sur., 2008). Ovdje postoji odstupanje 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



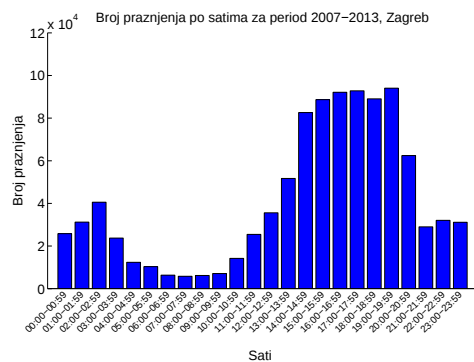
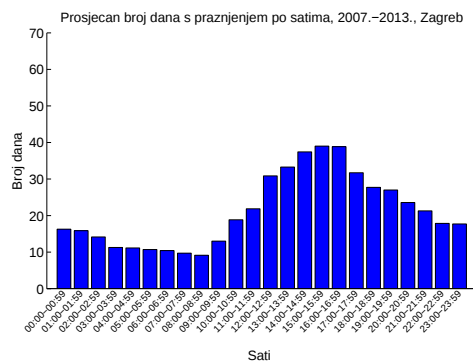
SLIKA 5.1: Godišnji hod prosječnog broja dana s električnim pražnjenjem za Zagreb (a), Udine (c) i Zadar (e); te godišnji hod ukupnog broja pražnjenja po mjesecima za Zagreb (b), Udine (d) i Zadar (f).

mjestu, iza svibnja. Uočene razlike proizlaze iz različitih analiziranih razdoblja, drugačijih prostornih domena i ponešto različitih definicija konvektivnog dana.

Raspodjela broja pražnjenja po mjesecima uspoređena je s prosječnim brojem dana s električnim pražnjenjem po mjesecima što predstavlja učestalost pojave. Veliki broj dana s električnim pražnjenjem zabilježen je u periodu od svibnja do srpnja. Male varijacije u toplom periodu godine također su zabilježene za područja talijanske obale sjevernog Jadrana (Manzato, 2007) i zapadnog Mediterana (Rivas Sorano i sur., 2005; Pineda i sur., 2010). Zanimljivo je uočiti da se maksimumi godišnjih hodova prosječnog broja dana s električnim pražnjenjem i maksimumi godišnjih hodova ukupnog broja pražnjenja po mjesecima često ne poklapaju. Broj pražnjenja (gustoća udara) vezan je uz samu strukturu (visinu i intenzitet) konvektivnih oblaka. U svibnju je pojava munja uzrokovana ciklonalnom aktivnošću i učestalim dolaskom hladnih fronti s Atlantika (Feudale i Manzato, 2014). Za razliku od toga, u srpnju pod utjecajem anticiklona na Sredozemlju, dominiraju lokalno manji, ali izuzetno duboki sustavi koji su praćeni snažnim turbulentnim vertikalnim gibanjima. Tada je često početni okidač za pokretanje konvekcije vezan za pojavu lokalnog vjetera i zona konvergencije uzrokovanih obalnom cirkulacijom, vjetrom obronka i orografskim dizanjem zraka. 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 pražnjenjima, kumulativna gustoća munja u odnosu na one tijekom toplog dijela godine je skoro zanemariva.

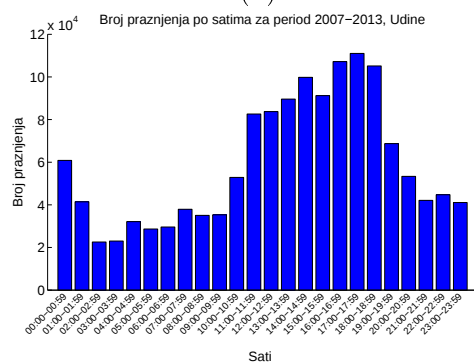
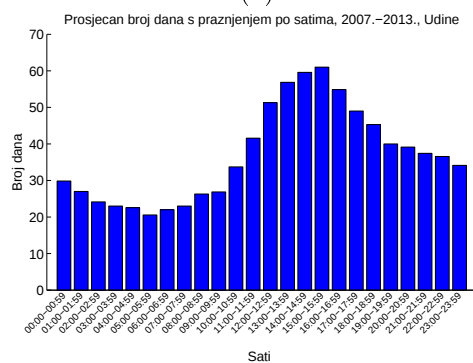
U Zadru se vidi najkontinuiranija raspodjela broja dana s električnim pražnjenjima, a relativno slab maksimum nalazi se u lipnju. Razloga ima više, unatoč manjoj jesenskoj potencijalnoj nestabilnosti u odnosu na ljetnu, u jesen se bilježe relativno visoke temperature zraka, visoka površinska temperatura mora i intenzivniji ciklonalni sustavi koji se češće premještaju preko tog područja (Zaninović i sur., 2008). Vrlo ujednačen godišnji hod posljedica je i velike zastupljenosti morske površine unutar zadarske poddomene. Feudale i sur. (2013) također ističu da se nakon rujna (s maksimumom u studenom), područja pod utjecajem električnog pražnjenja sele s kopna na more u obalnom pojasu sjevernog Jadrana, kada su oluje pod relativno jačim utjecajem tople morske površine (kao izvorom topline i vlažnosti).

Promatranjem dnevnog hoda prosječnog broja dana s električnim pražnjenjem (slika 5.2) može se zaključiti da konvektivna aktivnost počinje jačati u ranim pos-



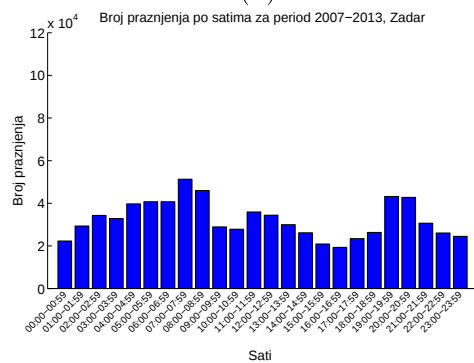
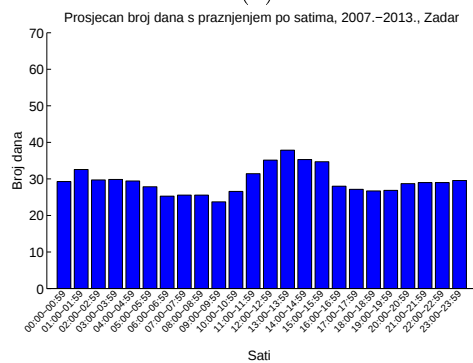
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

SLIKA 5.2: Dnevni hod prosječnog broja dana s električnim praznjenjem za Zagreb (a), Udine (c) i Zadar (e); te dnevni hod ukupnog broja praznjenja po satima za Zagreb (b), Udine (d) i Zadar (f).

lijepodnevnim satima nakon kraće noćne aktivnosti i relativnog zatišja u jutarnjim satima. Konvektivna aktivnost nad kontinentalnim područjem dostiže maksimum između 15 i 20 h UTC. Dnevni hod također karakterizira dosta strm nagib od minimalne vrijednosti prema maksimalnoj popodnevnoj aktivnosti te postupniji prijelaz prema slabijoj večernjoj konvektivnoj aktivnosti. Ovakva dnevna raspodjela posljedica je dnevnog hoda temperature jer viša temperatura pogoduje razvoju konvektivnih oblaka. Nad obalnim područjem imamo složeniju situaciju. U Udinama je maksimum konvektivne aktivnosti između 14 i 20 h UTC, dok je u SPC-u maksimum između 13 i 17 h UTC. Broj pražnjenja po satima za Zadar ima dva maksimuma; jutarnji između 7 i 8 h UTC i večernji između 19 i 21 UTC. Nad obalnim područjem zabilježeno je više noćnih električnih pražnjenja nego nad kontinentalnim, što se slaže s rezultatima iz Petrova i sur. (2009) gdje je promatrana konvektivna aktivnost za dva ljetna perioda. Tijekom noći konvekcija u Zadru je učestalija nego na drugim postajama. Na takvu raspodjelu najvjerojatnije utječe odabir reprezentativnog područja za Zadar koje velikim dijelom obuhvaća more, a more je noću obično toplije od kopna, što pogoduje konvekciji. Maksimum prosječnog broja dana s električnim pražnjenjem po satima pojavljuje se 2 do 3 sata prije maksimuma broja pražnjenja po satima. Iz toga zaključujemo da su konvektivni sustavi koji nastaju u ranom poslijepodnevju slabiji od onih koji nastaju u kasnijim satima.

Nakon napravljene analize po mjesecima istraživanje je fokusirano 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; Feudale i sur., 2013). Ujedno se htio umanjiti sezonski utjecaj na definiranje graničnih vrijednosti indeksa nestabilnosti, koje su uočili Smiljanić i sur. (2013/2014). Haklader i van Delden (2003) su također pokazali kako K indeks varira sezonski, dajući niže ljetne od zimskih graničnih vrijednosti. Dnevne varijacije indeksa prisilile su neke autore da optimiziraju pragove s obzirom da su uvelike ovisni o graničnom sloju (Huntrieser i sur., 1997). Stoga su podaci odvojeni na ponoćne i podnevne na način da u ponoćne podatke ulaze sve munje između 23 i 10 h UTC, a u podnevne između 11 i 22 h UTC (tablica 5.3).

TABLICA 5.3: Broj električnih pražnjenja, broj dana s električnim pražnjenjem i udio broja dana s električnim pražnjenjem za razdoblje od travnja do rujna (2007.–2013.).

Postaja	Broj el. pražnjenja	Broj dana s el. pražnjenjem	Udio dana s el. pražnjenjem
Zagreb 00	200928	166	13%
Budimpešta 00	170117	177	14%
Szeged 00	151368	142	11%
Beč 00	56981	123	10%
Zadar 00	332631	205	16%
Udine 00	368252	295	23%
SPC 00	115468	194	15%
Zagreb 12	747002	377	29%
Budimpešta 12	571564	360	28%
Szeged 12	537866	355	27%
Beč 12	627000	386	30%
Zadar 12	260060	317	25%
Udine 12	915147	561	44%
SPC 12	288587	403	31%

5.2 Analiza indeksa nestabilnosti atmosfere

Granične vrijednosti i vjerojatnosti za dan s pražnjenjem iznad ili ispod te granične vrijednosti (ovisno o promatranim indeksu), za postaje kontinentalnih i obalnih područja određene su metodom raspodjele frekvencija. Podnevne granične vrijednosti prikazane su u tablicama 5.4 i 5.5, a ponoćne u tablicama 5.6 i 5.7.

Podnevna granična vrijednost za vjerojatnost pojave dana s pražnjenjem za SI za sve postaje kontinentalnih i obalnih područja iznosi 3°C . Karakteristika SI je porast vjerojatnosti dana s pražnjenjem kako SI poprima niže vrijednosti pa u danima kada je $SI < 3^{\circ}\text{C}$ možemo očekivati konvektivnu aktivnost i oborinu. Vjerojatnosti za konvektivan dan uz uvjet da je $SI < 3^{\circ}\text{C}$ najveće su u Udinama i SPC-u. Usporedbom s granicama opisanim u tablici 1.6 vidimo da je podnevna granična vrijednost nešto viša od preporučene. Općenito je granična vrijednost SI indeksa za nestabilnost $SI < 0^{\circ}\text{C}$, ali uz napomenu da i za $SI = 1^{\circ}\text{C} - 2^{\circ}\text{C}$ može doći do konvekcije uz prisutno jako dizanje zraka. Granične vrijednosti nisu fiksne nego ovise o sinoptičkim i klimatskim uvjetima, geografskom položaju i promatranjoj sezoni. Treba napomenuti da su Kaltenböck i sur. (2009) za graničnu vrijednost SI indeksa, modeliranog iz ECMWF modela za čitavu Europu, također dobili graničnu vrijednost od 3°C . Ponoćna granična vrijednost SI za sve postaje je $SI < 2^{\circ}\text{C}$. Granična vrijednost je za 1°C niža nego kod podnevnih rezultata, ali sada se u potpunosti slaže s granicama opisanim u uvodu.

TABLICA 5.4: Granične vrijednosti i vjerojatnosti za dan s pražnjenjem za kontinentalne gradove u 12 UTC.

Indeks	Zagreb 12UTC		Beč 12UTC		Budimpešta 12UTC	
SI [°C]	SI < 3	54%	SI < 3	60%	SI < 3	54%
LI [°C]	LI < 1	57%	LI < 2	60%	LI < 1	60%
SWEAT	SWEAT > 120	46%	SWEAT > 120	46%	SWEAT > 120	41%
K [°C]	K > 26	58%	K > 25	56%	K > 26	54%
TT [°C]	TT > 46	52%	TT > 46	50%	TT > 46	48%
CAPE [J/kg]	CAPE > 170	65%	CAPE > 160	74%	CAPE > 160	70%
CIN [J/kg]	CIN < -14	48%	CIN < -16	56%	CIN < -13	50%
BRN	BRN > 4	55%	BRN > 4	57%	BRN > 6	50%
Θ_{ml} [K]	Θ_{ml} > 292	35%	Θ_{ml} > 294	42%	Θ_{ml} > 294	35%
r_{ml} [g/kg]	r_{ml} > 8	42%	r_{ml} > 8	48%	r_{ml} > 8	42%
TPW [mm]	TPW > 26	46%	TPW > 24	48%	TPW > 24	40%

Za LI je također karakterističan kontinuiran rast vjerojatnosti za konvektivan dan sa smanjenjem vrijednosti indeksa. Podnevna granična vrijednost za sve postaje osim Beča je $LI < 1^{\circ}\text{C}$, dok je granična vrijednost za Beč nešto viša, $LI < 2^{\circ}\text{C}$. Ponoćne granične vrijednosti LI variraju od 1°C u Zagrebu, Budimpešti, Udinama i SPC-u do 3°C u Beču. Granična vrijednost za Zadar i Szeged je $LI < 2^{\circ}\text{C}$. Granične vrijednosti dobro se slažu s granicama određenim u tablici 1.2 gdje je određena granica za nestabilnost $LI < 0^{\circ}\text{C}$, uz napomenu da za vrijednosti do 3°C može doći do konvekcije. Dobiveni prag se također dobro slaže s graničnom vrijednošću satelitski izvedenih indeksa nestabilnosti u Smiljanić i sur. (2013/2014) za isto geografsko područje i sličan odabir radiosondažnih postaja. Oni ističu $LI = 1^{\circ}\text{C}$ za koji je vjerojatnost za pojavu duboke konvekcije veća od 60%, što je ovdje dobiveno za većinu postaja.

SWEAT indeks osim podataka o temperaturi uključuje i podatke o vjetru. Podnevna granica nestabilnosti za sve kontinentalne postaje je $SWEAT > 120$. Obalne postaje pokazuju manji rasap; $SWEAT > 90$ za Zadar i SPC, i $SWEAT > 110$ za Udine. Ponoćne granične vrijednosti kreću se od $SWEAT > 110$ za Zadar do $SWEAT > 140$ za Udine. Ponoćna granica nestabilnosti za Beč je $SWEAT > 120$, dok je za Zagreb, Budimpeštu, Szeged i SPC granica $SWEAT > 130$. Dobivene granične vrijednosti dosta su niže od vrijednosti iz poglavlja 1.3.7 gdje je granica za nestabilnost $SWEAT > 300$, ali uz napomenu da i za $SWEAT > 250$ postoji potencijal za nevrijeme. Iako SWEAT indeks povezuje kinematičke i termodinamičke varijable, to se radi na empirički način koji se bazira na slaboj fizičkoj interpretaciji, čime se potencijalno mogu objasniti uočene razlike u graničnim vrijednostima.

K indeks obuhvaća temperaturu i vlagu te je prema očekivanjima dobivena bolja povezanost većih vrijednosti K indeksa kod veće učestalosti munja. Podnevna gra-

TABLICA 5.5: Granične vrijednosti i vjerojatnosti za dan s pražnjenjem za obalne gradove u 12 UTC.

Indeks	Zadar 12UTC		Udine 12UTC		SPC 12UTC	
SI [°C]	SI < 3	45%	SI < 3	71%	SI < 3	62%
LI [°C]	LI < 1	49%	LI < 1	73%	LI < 1	64%
SWEAT	SWEAT > 90	35%	SWEAT > 110	60%	SWEAT > 90	56%
K [°C]	K > 23	42%	K > 23	66%	K > 27	72%
TT [°C]	TT > 45	39%	TT > 46	69%	TT > 46	59%
CAPE [J/kg]	CAPE > 170	59%	CAPE > 170	78%	CAPE > 180	69%
CIN [J/kg]	CIN < -17	48%	CIN < -16	62%	CIN < -17	56%
BRN	BRN > 3	51%	BRN > 4	71%	BRN > 4	64%
θ_{ml} [K]	$\theta_{ml} > 291$	25%	$\theta_{ml} > 293$	48%	$\theta_{ml} > 292$	56%
r_{ml} [g/kg]	$r_{ml} > 7$	33%	$r_{ml} > 7$	54%	$r_{ml} > 8$	59%
TPW [mm]	TPW > 23	36%	TPW > 27	64%	TPW > 23	60%

nična vrijednost za Zagreb i Budimpeštu je $K > 26^{\circ}\text{C}$, dok je granična vrijednost za Beč, $K > 25^{\circ}\text{C}$. Kod postaja bliže obalnoj liniji, podnevne granične vrijednosti su $K > 23^{\circ}\text{C}$ za Zadar i Udine, i $K > 27^{\circ}\text{C}$ za SPC. Ponoćne granične vrijednosti K indeksa kreću se od 25°C do 28°C i nešto su više nego podnevne granične vrijednosti. Najčešće se za graničnu vrijednost uzima $K > 20^{\circ}\text{C}$, međutim uočeno je da K indeks često daje preveliku vjerojatnost za pojavu sijevanja osobito iznad Sredozemlja (Yair i sur., 2010). Granična vrijednost za 60% vjerojatnosti konvekcije iz satelitskih indeksa nestabilnosti s pojavom munja je i veća, $K > 29^{\circ}\text{C}$ (Smiljanić i sur., 2013/2014).

Podnevna granična vrijednost TT indeksa za sve gradove osim Zadra je $TT > 46^{\circ}\text{C}$, dok je za Zadar granična vrijednost $TT > 45^{\circ}\text{C}$. Pri tome vjerojatnosti za konvekciju prelaze 50% (osim za Zadar). Ponoćne granične vrijednosti su između 45°C i 47°C , što je malo više nego kod podnevnih granica. Određene granice slažu se ili su za 1 do 2°C više od granice iz tablice 1.5 koja iznosi $TT > 45^{\circ}\text{C}$.

CAPE je jako osjetljiv integralni 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 i ne mora značiti da za istu vrijednost CAPE indeksa imamo iste vjerojatnosti za grmljavinsko nevrijeme, što nam dodatno otežava određivanje granice nestabilnosti. Podnevne granične vrijednosti CAPE indeksa za dan s pražnjenjem su $CAPE > 170 \text{ J/kg}$ za Zagreb, Zadar i Udine, $CAPE > 160 \text{ J/kg}$ za Beč i Budimpeštu i $CAPE > 180 \text{ J/kg}$ za SPC. Ponoćne granice CAPE indeksa su $CAPE > 160 \text{ J/kg}$ za Zadar i Beč i $CAPE > 170 \text{ J/kg}$ za sve ostale gradove. Rezultati se podudaraju s granicom iz tablice 1.3. koja kaže da je za CAPE od 0 do 1000 J/kg atmosfera granično nestabilna. Kaltenböck i sur. (2009) su za graničnu vrijednost CAPE indeksa,

izračunatog iz ECMWF modela za čitavu Europu odredili $\text{CAPE} > 250 \text{ J/kg}$.

TABLICA 5.6: Granične vrijednosti i vjerojatnosti za dan s pražnjenjem za kontinentalne gradove u 12 UTC.

Indeks	Zagreb 00UTC		Beč 00UTC		Budimp. 00UTC		Szeged 00UTC	
SI [°C]	SI < 2	27%	SI < 2	20%	SI < 2	32%	SI < 2	24%
LI [°C]	LI < 1	29%	LI < 3	19%	LI < 1	33%	LI < 2	24%
SWEAT	SWEAT > 130	22%	SWEAT > 120	15%	SWEAT > 130	25%	SWEAT > 130	21%
K [°C]	K > 28	28%	K > 25	18%	K > 27	29%	K > 28	26%
TT [°C]	TT > 47	22%	TT > 45	16%	TT > 47	25%	TT > 47	29%
CAPE [J/kg]	CAPE > 170	31%	CAPE > 160	21%	CAPE > 170	41%	CAPE > 170	30%
CIN [J/kg]	CIN < -19	21%	CIN < -20	12%	CIN < -18	22%	CIN < -17	18%
BRN	BRN > 3	26%	BRN > 4	19%	BRN > 3	28%	BRN > 3	25%
θ_{ml} [K]	$\theta_{ml} > 292$	17%	$\theta_{ml} > 292$	14%	$\theta_{ml} > 293$	22%	$\theta_{ml} > 292$	15%
r_{ml} [g/kg]	$r_{ml} > 8$	20%	$r_{ml} > 8$	16%	$r_{ml} > 9$	27%	$r_{ml} > 8$	20%
TPW [mm]	TPW > 27	24%	TPW > 24	16%	TPW > 25	26%	TPW > 26	23%

Promatrajući operativno CIN na termodinamičkom dijagramu, ili prostornu raspodjelu, npr. iz modela, uočava se da sama vrijednost CIN indeksa ne znači puno za samu konvekciju (isto kao sama vrijednost CAPE indeksa). Dodatan problem je što u većini slučajeva nemamo radiosondaže podatke točno s mjesta 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. Podnevne granične vrijednosti CIN indeksa kreću se između -17 i -13 J/kg , a ponoćne između -20 i -15 J/kg .

TABLICA 5.7: Granične vrijednosti i vjerojatnosti za dan s pražnjenjem za obalne gradove u 12 UTC.

Indeks	Zadar 00UTC		Udine 00UTC		SPC 00UTC	
SI [°C]	SI < 2	28%	SI < 1	40%	SI < 2	23%
LI [°C]	LI < 2	29%	LI < 1	36%	LI < 1	26%
SWEAT	SWEAT > 110	22%	SWEAT > 140	38%	SWEAT > 130	21%
K [°C]	K > 27	33%	K > 27	36%	K > 27	27%
TT [°C]	TT > 46	25%	TT > 47	32%	TT > 47	22%
CAPE [J/kg]	CAPE > 160	41%	CAPE > 170	40%	CAPE > 170	25%
CIN [J/kg]	CIN < -17	41%	CIN < -15	36%	CIN < -18	33%
BRN	BRN > 3	35%	BRN > 7	36%	BRN > 7	23%
θ_{ml} [K]	$\theta_{ml} > 297$	10%	$\theta_{ml} > 292$	25%	$\theta_{ml} > 298$	10%
r_{ml} [g/kg]	$r_{ml} > 8$	22%	$r_{ml} > 9$	32%	$r_{ml} > 9$	19%
TPW [mm]	TPW > 27	30%	TPW > 30	37%	TPW > 26	20%

BRN indeks je bezdimenzionalna veličina proporcionalna CAPE indeksu, ali ovisi i o vertikalnom smicanju horizontalnog vjetera. U slučaju većeg smicanja ili manjeg

CAPE-a, BRN je manji. Podnevne granične vrijednosti za BRN indeks su $BRN > 4$ za Zagreb, Beč, Udine i SPC; $BRN > 6$ za Budimpeštu i $BRN > 3$ za Zadar. Ponoćne granice nestabilnosti su $BRN > 3$ za Zagreb, Budimpeštu, Szeged i Zadar; $BRN > 4$ za Beč; i $BRN > 7$ za Udine i SPC. U teoriji, ako je BRN manji od 10, može doći do razvoja nevremena samo uz veliko forsiranje, dok za $BRN > 10$ postoji veća vjerojatnost za nevrijeme. Niža granična vrijednost od one iz tablice 1.7 može ukazivati na njegovu nejasnu povezanost s dubokom konvekcijom unatoč fizikalnoj definiciji (Doswell i Schultz, 2006) s obzirom da je BRN nastao na temelju gradijentnog Richardsonovog broja koji je zamišljen za potrebe proučavanja turbulencije.

Karakteristike AGS-a (θ_{ml} , r_{ml}) pokazuju koji su uvjeti najpovoljniji za razvoj olujnih formacija. Općenito, s povećanjem temperature i vlažnosti u AGS-u, povećava se vjerojatnost za konvekciju. Podnevne granične vrijednosti za potencijalnu temperaturu usrednjenu unutar prvih 500 m AGS-a su $\theta_{ml} > 292 - 294$ K, dok se ponoćne granice kreću između 292 i 298 K. Podnevna granična vrijednost usrednjenog omjera miješanja unutar prvih 500 m AGS-a je $r_{ml} > 8$ g/kg za sve kontinentalne postaje. Kod obalnih postaja podnevne granične vrijednosti su $r_{ml} > 7$ g/kg za Zadar i Udine; i $r_{ml} > 8$ g/kg za SPC. Ponoćne granice kreću se u rasponu od 8 g/kg do 9 g/kg.

Podnevne granične vrijednosti za TPW su između 23 i 26 mm za vjerojatnost konvekcije $> 36\%$, dok se ponoćne granice kreću od 24 mm do 30 mm. Vrijednosti granica na obalnim postajama više su nego za kontinentalne. Za ovaj indeks nemamo određenu teorijsku graničnu vrijednost za konvektivan dan, ali vrijednost manja od 10 mm ukazuje na suhu atmosferu u kojoj ne može doći do mokre konvekcije. Smiljanić i sur. (2013/2014) su istaknuli da je $TPW = 27$ mm dovoljna za vjerojatnost pojave konvekcije i električnog pražnjenja od 60% što se poklapa s dobivenom intervalom vrijednosti ovdje.

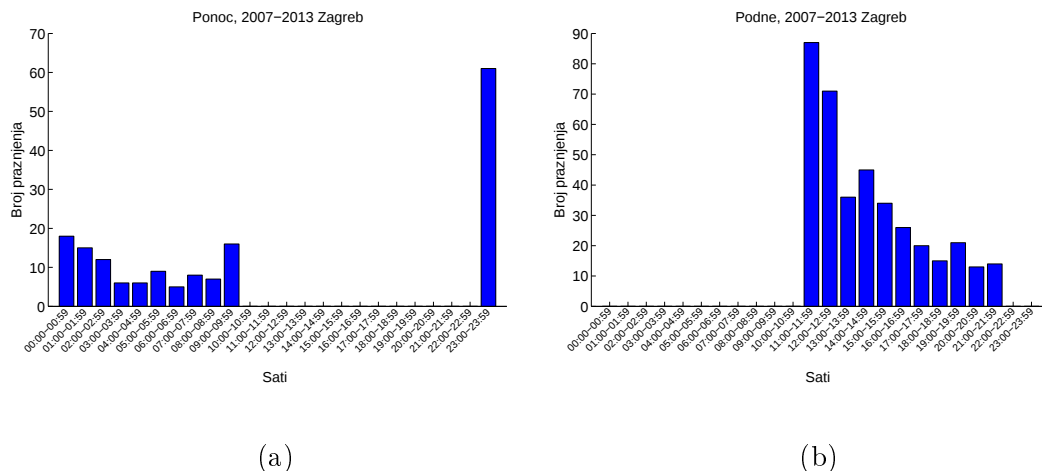
Kod nijednog promatranog indeksa nestabilnosti nije zabilježeno veće odstupanje graničnih vrijednosti za nestabilnost. Međutim, za te granice izračunate su vjerojatnosti za konvektivan dan i tu postoji velika razlika među postajama. Najviše vjerojatnosti dobivene su za Udine i SPC, zatim slijede kontinentalne postaje i na kraju Zadar, najvjerojatnije zbog (neizbježnog) odabira poddomene. Također se vidi razlika između rezultata dobivenih iz podnevnih i ponoćnih radiosondaža. Vjerojatnosti za dan s pražnjenjem iz podnevnih radiosondaža veće su nego iz ponoćnih i za njih imamo zadovoljavajuće vjerojatnosti za prognozu konvekcije. Kod rezultata iz ponoćnih radiosondaža dobivene su premale vjerojatnosti za dan

s pražnjenjem da bi bila moguća prognoza.

Pojedini indeksi pokazali su se boljima od drugih za prognozu konvekcije. Najbolji rezultati dobiveni su za CAPE indeks. Vjerojatnosti za konvektivan dan izračunate za određene granične vrijednosti na svim postajama, osim Zadra, veće su od 60%. Ističu se SI i LI kod kojih podnevne vjerojatnosti za dan s pražnjenjem prelaze 60% u Udinama, SPC-u, Beču i Budimpešti. Budući da su vjerojatnosti vrlo visoke i za druge postajame zaključujemo da su SI i LI uspješni prediktori konvekcije na promatranom području. U Udinama i SPC-u za prognozu konvekcije mogu se koristiti i indeksi K i TT, koji za ta dva grada imaju podnevne vjerojatnosti od 59% i više. Najmanje vjerojatnosti za konvektivan dan dobivene su za θ_{ml} i r_{ml} na svim postajama u svim terminima.

5.3 Reprezentativnost radiosondaža

Usporedba radiosondažnih indeksa nestabilnosti s pojavom munja dala je mogućnost procjene indeksa kao (ne)uspješnih prediktora konvekcije. Za različite indekse i granične vrijednosti vjerojatnosti za dan s pražnjenjem varirale su od 14% do 78%. Razlozi za to mogu biti mnogobrojni; veličina poddomena, promatrano razdoblje i njegova duljina, učestalost radiosondaža itd. Svakako su još važni i reprezentativnost radiosondaža, dostupnost TEMP zapisa (a ne “sirovih” radiosondažnih podataka) te prostorni i vremenski pomak (odnosno trajanje) tijekom mjerenja vertikalnog profila atmosfere. Haklander i van Delden (2003) su, proučavajući tlak, temperaturu, vlažnost i vjetar iz radiosondažnih mjerenja u Nizozemskoj, koristili atmosferske varijable u prognoziranju grmljavinskog nevremena do udaljenosti od 100 km od postaje. Na području koje je promatrano u ovom radu teren je dosta kompleksniji i bilo bi upitno koristiti radiosondaže u tako velikom radijusu. Međutim, 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 djelomice deformiranog rotacionog konusa s vrhom pri tlu. U vremenu, radiosondaža ponekad može biti reprezentativna samo unutar 2 h, pa bi bilo poželjno imati što gušća mjerenja. Na većini postaja mjerenja se vrše samo 2 puta dnevno što čini drugo ograničenje u ovoj studiji. Na slici 5.3 prikazano je u koje vrijeme je detektirano prvo električno pražnjenje u promatranom konvektivnom danu za Zagreb. Reprezentativnost radiosondaža za ostalih 6 postaja prikazana je na slikama u prilogu B.



SLIKA 5.3: Reprezentativnost radiosondaža za Zagreb u ponoć (a) i podne (b).

Zanimljivo je da u svim slučajevima, najviše prvih električnih pražnjenja 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, može se uočiti da značajan dio pražnjenja započinje upravo u prvih nekoliko sati od početka promatranja te se može reći da su promatrane radiosondaže reprezentativne za odabrani vremenski period koji je promatran. Slično su radili Sanchez i sur. (2009) gdje su uzimali valjanost radiosondažnih podataka u trajanju od 12 h.

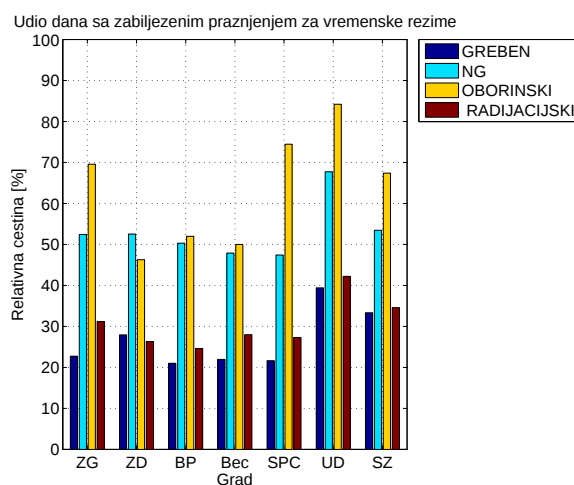
Manzato (2008) je pokazao da TEMP-izvedeni indeksi pokazuju odstupanje (pogrešku) u odnosu na one izračunate iz originalne radiosondaže. Razlike su bile i do 42% ovisno o indeksu. Osobito su osjetljivi oni indeksi koji su pod utjecajem malih pogrešaka na standardnim plohama (npr. pogreške od 0.5 K na 925 hPa i 500 hPa, mogu jako utjecati na razvoj vertikalnog profila nestabilnosti). Razlog leži u značajno manjem broju dostupnih vertikalnih nivoa; skoro 1000 vertikalnih nivoa između površine i 300 hPa plohe u originalnoj radiosondaži i nekoliko desetaka nivoa u TEMP izvješću. Nažalost u ovoj studiji bila su nam dostupna samo TEMP izvješća sa standardnim i značajnim nivoima.

5.4 Analiza režima vremena i tipova strujanja

Svrha ove analize je povezivanje tipova vremena i strujanja s konvektivnim danima i indeksima nestabilnosti. Tipovi vremena, opisani u tablici 4.3, grupirani su, s obzirom na utjecaj na vrijeme i učestalost pojavljivanja, po uzoru na Plačko-Vršnak

i sur. (2014). Prednja i donja strana ciklone, prednja strana doline i os doline čine oborinski režim koji je karakteriziran advekcijom toplog i vlažnog zraka. Radijacijski režim karakterizira slabo strujanje promjenjiva smjera i utjecaj lokalnih čimbenika kao što je reljef. Najčešće se pojavljuje na prednjoj, gornjoj i donjoj strani anticiklone i u području grebena visokog tlaka zraka. Iako greben visokog tlaka spada u radijacijski tip vremena, nema uvijek obilježja radijacijskog režima, pa će se on u ovom radu, kao i u mnogim drugim analizama (npr. Lončar i Vučetić, 2003), promatrati zasebno. Posljednji promatrani tip je bezgradijentno strujanje koje se najčešće pojavljuje u toplom dijelu godine kada je ciklonalna aktivnost potisnuta u više geografske širine. Preostali tipovi vremena su izostavljeni zato što se znatno rjeđe pojavljuju.

Tipovi vremena koji uključuju formacije visokog tlaka zraka rijetko su povezani s konvekcijom i za njih je udio dana sa zabilježenim pražnjenjem najmanji (slika 5.4). Najveći udio dana sa zabilježenim pražnjenjem u većini slučajeva ima oborinski režim. Odmah iza njega slijedi bezgradijentno strujanje za kojeg su karakteristične pojave lokalnih nestabilnosti u slučajevima kada se javlja nakon ciklona. Slične rezultate dobili su Mikuš i sur. (2012) jer su za dominantan tip vremena nad Hrvatskom povezan s konvekcijom dobili ciklonalan tip, a zatim slijedi bezgradijentno strujanje. Ivančan-Picek i sur. (2003) i Horvath i sur. (2008) zaključili su da je ciklonalna aktivnost nad Jadranom i Mediteranom pokretač ekstremnih vremenskih uvjeta kao što su grmljavinske oluje.

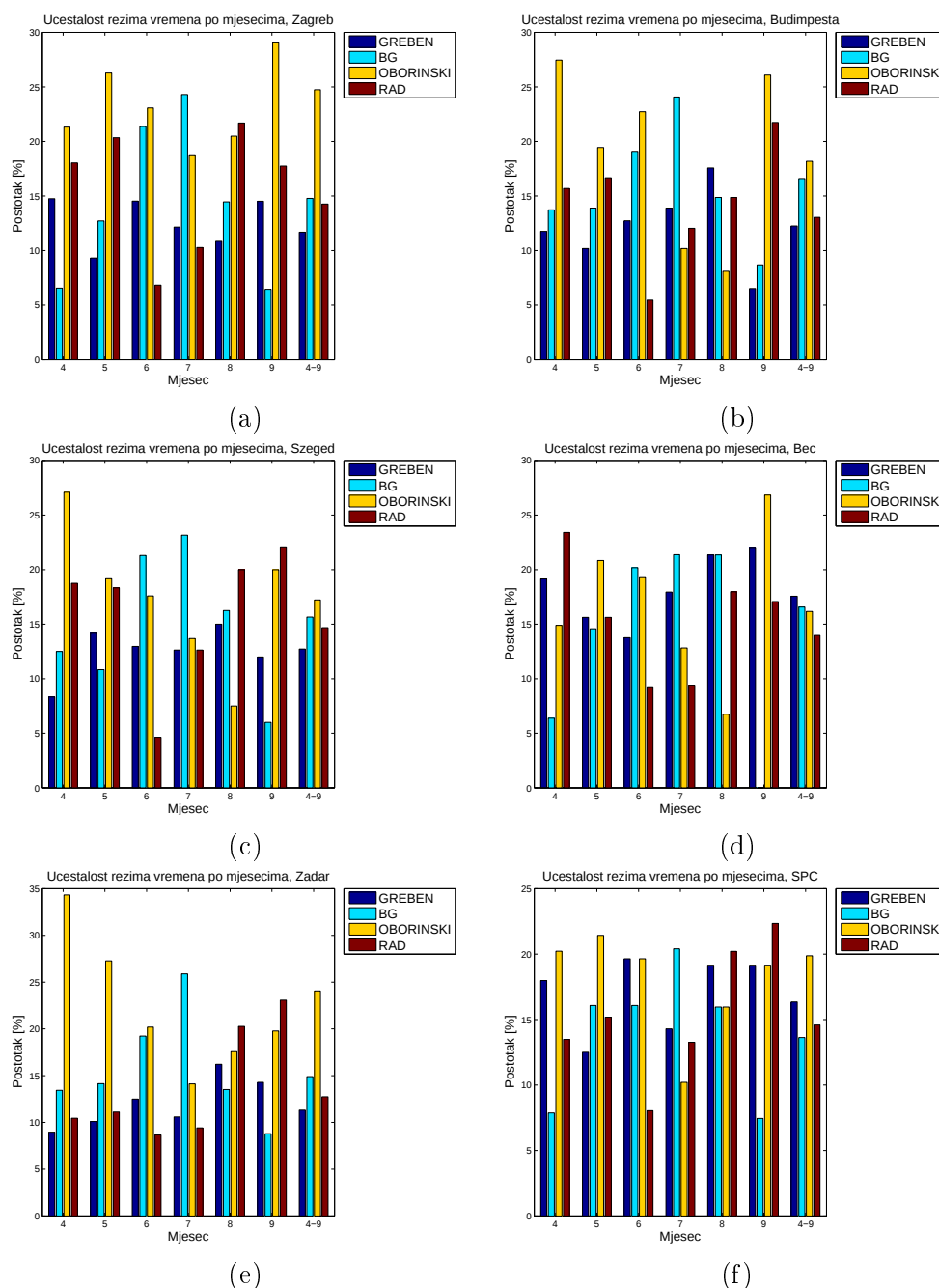


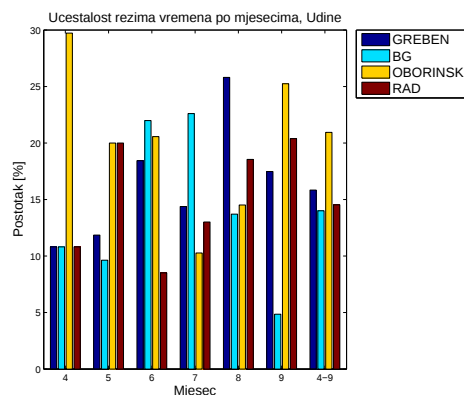
SLIKA 5.4: Udio dana sa zabilježenim pražnjenjem za vremenske režime.

Na slici 5.5 prikazane su mjesečne varijacije 4 vremenska tipa za sve postaje. Tijekom toplog dijela godine, oborinski režim dostiže minimum u srpnju i kolovozu na svim postajama, dok je maksimum najčešće u travnju ili rujnu. Radijacijski režim dostiže minimum najčešće u srpnju i lipnju, a maksimum u rujnu. To se slaže

s rezultatima Mikuš i sur. (2012) gdje su ciklonalni i anticiklonalni tipovi vremena minimum dosegli u srpnju. Bezgradijentno strujanje ima minimum u rujnu, a maksimum u lipnju i srpnju. Greben visokog tlaka zraka pokazuje najkonstantniju raspodjelu među mjesecima, a minimumi i maksimumi variraju među postajama.

Tipovi strujanja podijeljeni su na osam smjerova: N, NE, E, SE, S, SW, W i NW. Učestalosti smjerova vjetra za dane s pražnjenjem u 00 i 12 UTC prikazani su na slici 5.6 Najčešći tip strujanja u danima kada je zabilježeno pražnjenje u oba termina je SW. SW tip strujanja obično nastaje pod utjecajem dobro razvijene

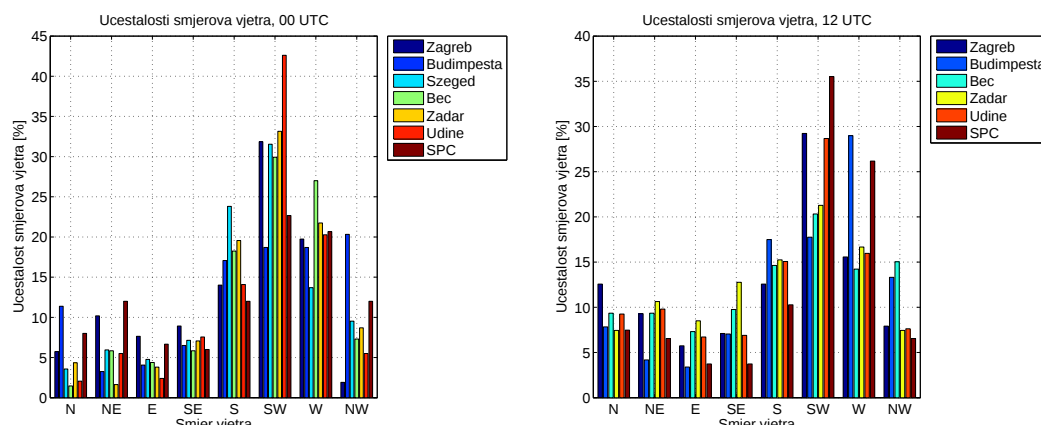




(g)

SLIKA 5.5: Učestalost režima vremena po mjesecima za Zagreb (a), Budimpeštu (b), Szeged (c), Beč (d), Zadar (e), SPC (f) i Udine (g).

ciklone ili doline s centrom smještenim iznad zapadne ili sjeverozapadne Europe i često ga se povezuje s oborinskim režimom. U Mikuš i sur. (2012) najčešći tip strujanja u danima s konvekcijom također je SW, s učestalošću od 38%.



(a)

(b)

SLIKA 5.6: Učestalosti smjerova vjetra za dane s pražnjenjem u 00 UTC (a) i 12 UTC (b).

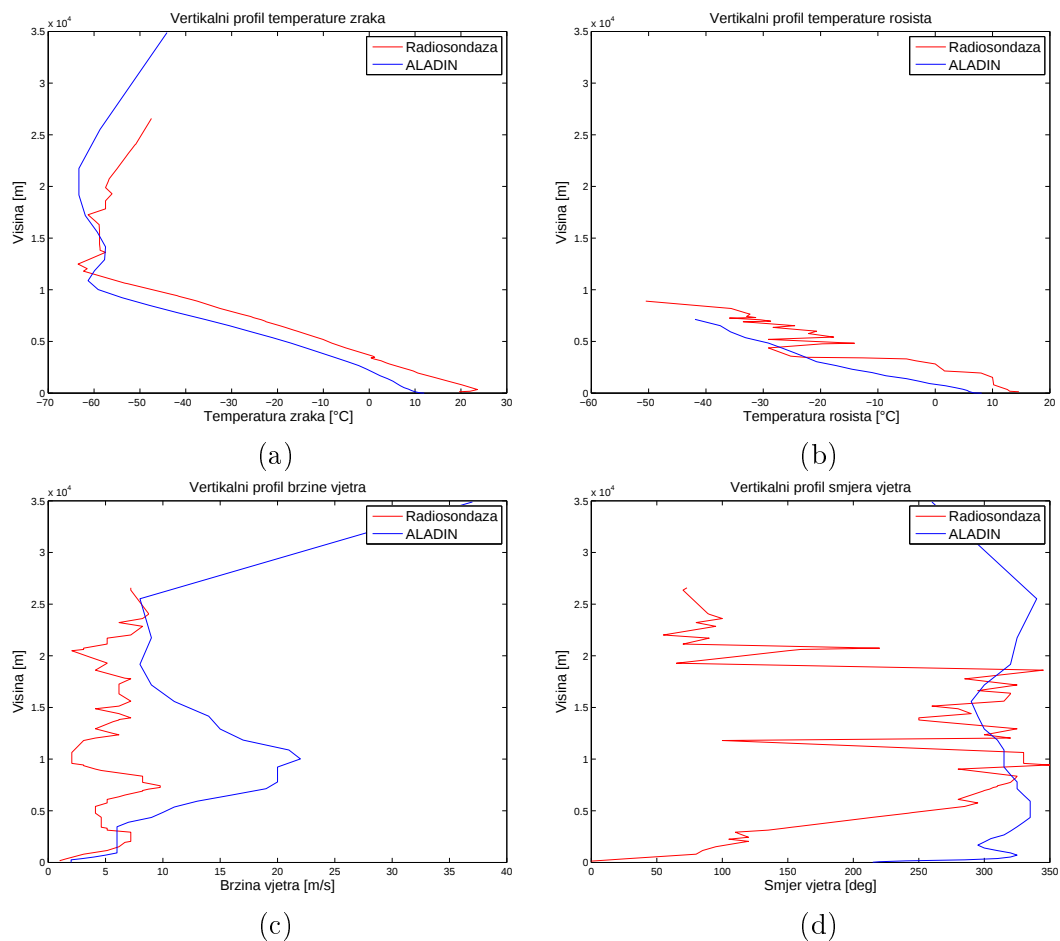
Promjene tipova strujanja po mjesecima za sve postaje u podnevnom i ponoćnom terminu prikazane su u prilogu D. U Zagrebu, Udinama i SPC-u u svim mjesecima u danima sa zabilježenim pražnjenjem dominira SW tip vjetra. Beč se izdvaja od ostalih postaja zato što u terminu 12 UTC u svim mjesecima dominira zapadno strujanje. Kod noćnih rezultata imamo podjednako zastupljene sve smjerove vjetra, osim u travnju kada dominira NW tip strujanja. U Budimpešti i Szegedu s konvektivnim danima možemo povezati W, SW i S tipove strujanja, pogotovo u noćnom terminu. Sličnu situaciju imamo u Zadru u ponoćnom terminu, dok u podnevnom terminu različiti tipovi strujanja dominiraju po mjesecima. U travnju dominira SE vjetar, u svibnju SW, u lipnju S i u srpnju, kolovozu i rujnu W vjetar.

Na slikama u prilogima E i F prikazane su srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti za promatrane režime vremena i tipove strujanja. Najveće srednje vrijednosti CAPE indeksa i najmanje srednje vrijednosti LI indeksa pojavljuju se kod bezgradijentnog strujanja i oborinskog režima. Velike srednje vrijednosti K i TPW indeksa su u većini slučajeva povezane s bezgradijentnim strujanjem, dok se najveće vrijednosti SWEAT indeksa javljaju u oborinskom režimu. Maksimalne (ili minimalne) srednje vrijednosti ostalih indeksa nestabilnosti jako variraju po režimima vremena s promjenom postaja pa ih nismo mogli pridijeliti određenom režimu vremena. Kod povezivanja režima strujanja i indeksa nestabilnosti imamo zamršeniju situaciju. Jedino je SWEAT indeks moguće povezati s određenim tipom strujanja. Maksimalne srednje vrijednosti SWEAT indeksa u većini slučajeva javljaju se kod SW tipa strujanja. Može se zaključiti da je povezanost indeksa nestabilnosti i tipova strujanja lokalizirana zato što se kod različitih postaja maksimalne (ili minimalne) srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti javljaju za različite tipove strujanja.

5.5 Veza između radiosondažnih i modeliranih indeksa nestabilnosti atmosfere

Dobro je znati u svakodnevnoj prognostičkoj praksi koji su indeksi iz modela (tzv. “pseudotempova”) dobro prognozirani, radi korištenja samo onih uspješnih kao dodatak već postojećem setu radiosondažnih indeksa. Usporedbom profila iz ALADIN modela (slika 4.5) i radiosondaža (tablica 5.8) vidi se da radiosondaže daju informacije s više nivoa, njih 83 u ovom slučaju, dok ALADIN model daje informacije s 37 nivoa i prizemnog sloja. Broj nivoa promatranih u radiosondaži nije konstantan i varira po terminima mjerenja, ali je u rijetkim slučajevima manji od 38.

Na slici 5.7 prikazani su vertikalni profili temperature zraka, temperature rosišta, brzine vjetra i smjera vjetra dobiveni iz radiosondaža i ALADIN modela za Zagreb 2. 6. 2008. Temperatura zraka u troposferi opada do otprilike 11 km visine i u mjerenjima i u modelu iako model podcijenjuje iznose temperature za 5 do 10°C. Iz podataka ALADIN modela vidi se da temperatura rosišta pada s visinom, ali model nije uspješno prognozirao varijacije temperature. U promatranom slučaju model je jako precijenio brzinu vjetra u višim slojevima, s maksimalnim odstupanjem od približno 20 m/s na oko 10 km. U prizemnim slojevima odstupanje je manje od 1 m/s. Smjer vjetra je lošije prognoziran u prvih 5 km i iznad troposfere.



SLIKA 5.7: Vertikalni profili dobiveni iz radiosondaža (crvena linija) i ALADIN modela (plava linija) za temperaturu zraka (a), temperaturu rosišta (b), brzinu vjetra (c) i smjer vjetra (d) za Zagreb 2. 6. 2008.

Treba spomenuti da radiosondažni indeksi daju dijagnostičke indekse nestabilnosti koji se koriste u prognostičke svrhe (Doswell i Schultz, 2006). Koliko točno numerički model ALADIN prognozira te dijagnostičke varijable nije jednostavno procijeniti jer neki prognostički parametri dopuštaju relativno točnu prognozu samo za kraći period u kratkom vremenu oko njihove dijagnostičke procjene, dok drugi pokazuju veliku korelaciju u vremenu s vremenskim pojavama.

U tablicama 5.9 i 5.10 prikazani su uspoređivani indeksi nestabilnosti i izračunati statistički parametri u 12 i 00 h UTC. Broj promatranih konvektivnih dana u 12 UTC je 349, a u 00 UTC 153. Indeksi nestabilnosti u tablicama poredani su po vrijednostima koeficijenta linearne determinacije, od najvećeg prema najmanjem.

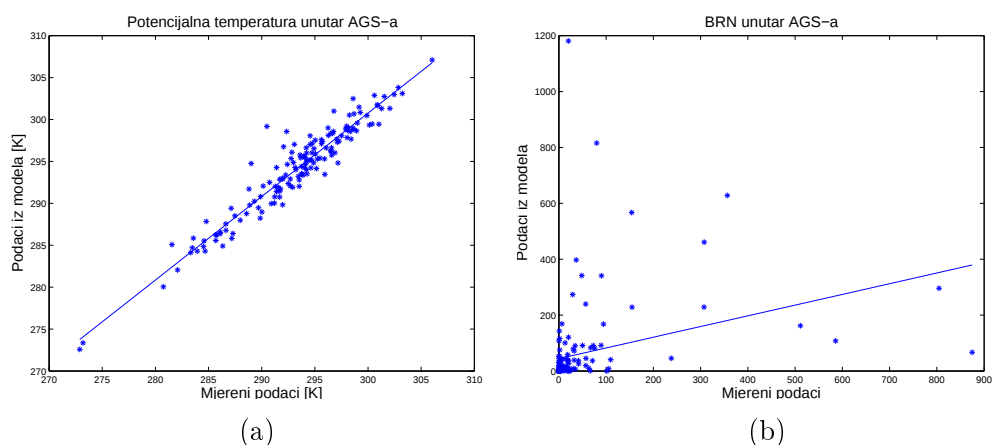
Najbolju povezanost u oba termina pokazuje temperatura na 850 hPa, $r^2 = 0.98$ u 00 UTC i 0.99 u 12 UTC. Slijedi MLTHETA, potencijalna temperatura unutar prvih 100 hPa, s koeficijentom determinacije $r^2 = 0.96$ u oba termina. Ovi rezultati

TABLICA 5.8: Vertikalni profil zagrebačke radiosondaže 2.6.2008. u 00 UTC. U stupcima se nalaze: tlak (PRESS), geopotencijalna visina (HGHT), temperatura zraka (TEMP), temp. rosišta (DWPT), relativna vlažnost (RELH), omjer miješanja (MIXR), smjer vjetra (DRCT), brzina vjetra (SKNT), potencijalna temp. (THTA), ekvivalentna potencijalna temp. (THTE) i virtualna potencijalna temp. (THTV).

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1000	119									
999	128	19.6	14.6	73	10.56	0	2	292.8	323.1	294.7
993	180	22	13	57	9.56	6	2	295.7	323.6	297.4
975	340	23.6	12.6	50	9.48	25	3	298.9	326.9	300.6
925	797	20.2	10.2	53	8.51	80	6	300	325.3	301.5
887	1156	17.2	10.1	63	8.82	85	10	300.5	326.8	302.1
850	1520	14.2	10	76	9.15	95	12	301	328.3	302.7
808	1946	10.6	8	84	8.4	115	13	301.6	326.7	303.1
799	2040	10.1	5	70	6.88	120	14	302	322.9	303.3
789	2144	9.6	1.6	57	5.47	113	14	302.6	319.3	303.6
779	2250	8.8	1.4	60	5.45	105	14	302.8	319.5	303.8
761	2442	7.3	0.9	64	5.39	120	14	303.2	319.8	304.2
727	2818	4.4	0	73	5.29	112	14	304	320.3	305
717	2931	3.7	-1.2	70	4.9	110	14	304.5	319.7	305.4
700	3126	2.6	-3.4	65	4.27	135	10	305.3	318.7	306.1
684	3312	1	-5	64	3.87	147	10	305.6	317.8	306.3
676	3407	0.4	-12.6	37	2.16	153	9	305.9	313	306.3
671	3466	1.2	-22.8	15	0.92	157	9	307.5	310.6	307.6
662	3574	0.8	-25.2	12	0.75	164	9	308.2	310.8	308.4
599	4367	-5.1	-29.1	13	0.58	215	9	310.3	312.4	310.4
569	4768	-7.7	-19.7	38	1.42	242	8	311.9	316.7	312.1
565	4822	-8.1	-14.1	62	2.29	245	8	312	319.6	312.4
538	5201	-10.1	-29.1	20	0.64	270	8	314	316.3	314.1
523	5418	-11.7	-17.7	61	1.83	285	8	314.6	320.9	315
500	5760	-14.1	-22.1	51	1.31	295	10	315.8	320.3	316
485	5991	-15.7	-20.7	65	1.53	285	10	316.6	321.9	316.9
478	6101	-16.5	-23	57	1.27	280	10	316.9	321.4	317.2
462	6357	-18.3	-28.3	41	0.81	286	12	317.8	320.7	317.9
452	6521	-19.5	-24.5	65	1.17	290	13	318.2	322.4	318.5
429	6908	-22.5	-33.5	36	0.53	299	16	319.2	321.2	319.3
426	6959	-22.7	-28.7	58	0.84	300	16	319.6	322.7	319.8
418	7099	-23.5	-30.5	53	0.73	304	17	320.3	323	320.4
409	7258	-24.9	-35.9	35	0.44	307	19	320.5	322.1	320.6
406	7312	-25.3	-31.3	57	0.69	309	19	320.7	323.2	320.8
403	7366	-25.6	-32.1	55	0.65	310	19	320.9	323.3	321.1
400	7420	-25.9	-32.9	52	0.6	310	19	321.2	323.5	321.4
388	7639	-27.9	-32.3	66	0.66	317	17	321.4	323.9	321.6
382	7750	-28.8	-33	67	0.63	320	16	321.6	324	321.8
359	8191	-32.5	-35.6	74	0.52	324	16	322.5	324.4	322.6
351	8348	-33.6	-38.9	59	0.38	325	16	323.1	324.5	323.2
324	8905	-37.5	-50.5	24	0.12	289	9	325.2	325.6	325.2
318	9033	-38.6				280	8	325.4		325.4
303	9363	-41.5				338	6	325.8		325.8
300	9430	-41.9				350	6	326.2		326.2
293	9587	-43.4				330	4	326.3		326.3
252	10588	-52.7				330	4	326.8		326.8
250	10640	-53.3				330	4	326.7		326.7
208	11798	-62.3				100	6	330.2		330.2
200	12040	-61.5				320	8	335.2		335.2
190	12357	-62.9				300	12	337.9		337.9
186	12488	-63.5				306	11	339		339
173	12939	-61.1				325	8	350		350
155	13623	-57.5				264	11	367.4		367.4
151	13788	-58.5				250	12	368.5		368.5
150	13830	-58.7				250	12	368.8		368.8
146	14000	-58.7				250	14	371.6		371.6
137	14400	-58.8				290	12	378.3		378.3
127	14877	-58.8				280	8	386.6		386.6
122	15129	-58.8				260	12	391		391
113	15611	-58.8				315	14	399.6		399.6
101	16317	-58.9				320	12	412.5		412.5
100	16380	-59.1				320	12	413.3		413.3
96	16634	-59.7				295	12	416.9		416.9
88	17175	-61.1				325	12	424.7		424.7
86.8	17260	-61.3				319	12	425.9		425.9
80	17770	-57.9				285	14	442.9		442.9
79.2	17832	-57.5				290	13	445		445
70	18610	-57.5				345	8	461		461
63	19277	-56.1				65	10	478.1		478.1
62.8	19297	-56.1				66	10	478.6		478.6
57.2	19889	-57.5				108	7	488.4		488.4
52	20492	-56.9				150	4	503.2		503.2
51	20615	-56.8				160	6	506.3		506.3
50	20740	-56.7				220	6	509.4		509.4
47	21137	-56				70	10	520.1		520.1
43	21708	-55				90	10	535.9		535.9
41	22014	-54.5				55	14	544.6		544.6
36	22849	-53.1				95	16	568.9		568.9
34	23216	-52.5				80	12	579.9		579.9

su jako važni zato što se temperatura na 850 hPa i potencijalna temperatura koriste za računanje drugih indeksa nestabilnosti i kada bi model radio veliku pogrešku u prognozi ovih parametara, indeksi izračunati iz njih ne bi bili pouzdani. Najmanji koeficijent determinacije ima indeks MLBRN: $r^2 = 0.31$ u 00 UTC i 0.06 u 12 UTC.

Na slici 5.8 prikazani su točkasti dijagrami potencijalne temperature (a) i BRN-a (b) kako bi vizualno pokazali važnost i značenje koeficijenta determinacije. Pravac na grafovima izračunat je metodom najmanjih kvadrata. Na slici 5.8 (a) prikazan je indeks s visokim koeficijentom determinacije i vidimo jako dobru povezanost uspoređivanih podataka, dok na slici 5.8 (b), gdje je prikazan indeks s niskim koeficijentom determinacije, vidimo lošu povezanost podataka.



SLIKA 5.8: Točkasti dijagrami potencijalne temperature (a) i BRN indeksa (b), dobiveni iz podataka radiosondaža i modela ALADIN za Zagreb od 1. 1. 2008. do 31. 12. 2013. Pravci su dobiveni metodom najmanjih kvadrata.

Ostali indeksi koji se ističu većim koeficijentom determinacije su Bulk Shear (BS06), ukupna oboriva voda (TPW), omjer mješanja unutar AGS-a (MLMIX) i brzina vjetra na 850 hPa (W850). U oba termina samo 4 promatrana indeksa imaju koeficijent determinacije manji od 0.5. Provjera točnosti modela napravljena je računom pristranosti (*bias*). Što je pristranost bliža nuli model je pouzdaniji. Vrijednosti pristranosti najbliže nuli u 00 UTC dobivene su za temperaturu i vjetar na 850 hPa, K indeks, SI indeks i stopu promjene virtualne temperature s visinom od 3 do 6 km, dok su u 12 UTC vrijednosti najbliže nuli imali TT i SI indeksi.

Najveću pristranost imali su indeksi MULCL, MUEL, MLCD, MLEL, MLLCL i MUCD. Indeksi koji u sebi sadrže LCL⁵, LFC⁶ i EL⁷ koriste tzv. kritične nivoe.

⁵Nivo na kojem će čest, koja se dizala po suhoj adijabati, postati zasićena.

⁶Nivo na kojem čest, koja se prvo dizala po suhoj adijabati do zasićenja, a zatim po mokroj adijabati, prvi put postane toplija (rjeđa) od okolnog zraka.

⁷Ravnotežni nivo - čest i okolina imaju istu temperaturu.

TABLICA 5.9: Statistički parametri dobiveni usporedbom 32 indeksa nestabilnosti iz radiosondaža i ALADIN modela za Zagreb od 1. 1. 2008. do 31. 12. 2013. u 00 UTC.

Indeks	r^2	Bias	RMSE	RMSD	RAE	MAE	d
T850 [°C]	0.98	0.16	0.92	0.13	0.04	0.16	0.99
MLTHETA [K]	0.96	0.79	1.77	0.21	0.19	0.79	0.97
BS06 [m/s]	0.92	-0.87	3.62	0.41	0.12	0.87	0.95
TPW [mm]	0.90	-1.13	3.47	0.38	0.18	1.13	0.94
MLMIX [g/kg]	0.86	0.27	1.30	0.10	0.15	0.27	0.92
W850 [m/s]	0.84	-0.25	2.84	0.01	0.06	0.25	0.91
LR3-6 [°C/km]	0.81	0.13	0.39	0.05	0.25	0.13	0.89
MLLCL [m]	0.81	19.86	279.63	72.71	0.06	19.86	0.89
MLLI [°C]	0.80	-0.78	2.58	0.25	0.27	0.78	0.88
BS01 [m/s]	0.79	-1.22	2.94	0.74	0.34	1.22	0.86
MUCD [m]	0.72	489.67	2710.83	108.46	0.16	489.67	0.85
MUEL [m]	0.71	247.67	2430.15	4.05	0.09	247.67	0.84
MULI [°C]	0.71	-0.78	2.22	0.02	0.39	0.78	0.82
LR0-3 [°C/km]	0.69	0.23	0.67	0.06	0.38	0.23	0.81
MaxBuo [K]	0.69	-0.38	4.15	0.03	0.10	0.38	0.83
MLEL [m]	0.68	465.53	3220.93	50.95	0.13	465.53	0.83
MLCIN [J/kg]	0.68	21.12	92.91	12.22	0.29	21.12	0.82
SRH01 [m2/s2]	0.68	-9.81	46.51	24.05	0.23	9.81	0.76
SRH03 [m2/s2]	0.67	-31.35	102.62	54.16	0.36	31.35	0.73
MLCD [m]	0.66	445.67	3309.46	114.14	0.13	445.67	0.82
TT	0.65	-0.09	3.27	0.01	0.03	0.09	0.81
MUCAPE [J/kg]	0.64	192.03	620.91	71.75	0.40	192.03	0.79
K [°C]	0.64	-1.43	5.00	0.28	0.34	1.43	0.78
SI [°C]	0.62	0.04	2.47	0.22	0.02	0.04	0.79
MLCAPE [J/kg]	0.61	107.19	465.24	53.14	0.33	107.19	0.77
MUCIN [J/kg]	0.53	0.23	75.79	7.30	0.00	0.23	0.73
MUCAPE3 [J/kg]	0.52	19.96	53.12	18.25	0.63	19.96	0.65
MULCL [m]	0.52	-242.01	804.81	3.05	0.39	242.01	0.71
W850dir [deg]	0.48	-3.55	85.58	0.04	0.05	3.55	0.73
SWEAT	0.46	-5.17	72.20	2.22	0.09	5.17	0.69
MLCAPE3 [J/kg]	0.46	10.05	36.25	12.87	0.49	10.05	0.63
MLBRN	0.31	18.23	161.79	27.19	0.31	18.23	0.48

Dakle, može se zaključiti da ALADIN model nije pouzdan za određivanje kritičnih nivoa. Korijen srednje kvadratne pogreške, RMSE, najmanji je za stope promjene virtualne temperature s visinom, LR3-6 i LR0-3, i temperaturu na 850 hPa. Najveće vrijednosti RMSE dobivene su za indekse koji u sebi sadrže kritične razine kao što su ravnotežni nivo (EL), nivo slobodne konvekcije i dr. Male vrijednosti korijena srednje kvadratne devijacije dobivene su za indekse W850, TT, MULI, MLLI, MaxBuo, LR3-6 i LR0-3, dok se najveće vrijednosti javljaju za indekse MUCD, MLCD, MLLCL, MLEL i MLBRN. Relativna apsolutna pogreška najmanja je za indekse MUCIN, SI, TT, K, T850 i W850, dok je najveća za indekse MUCAPE, MUCAPE3, MLCAPE, MULCL i MUBRN. Srednja apsolutna pogreška ima najmanje vrijednosti za indekse SI, TT, LR3-6, LR0-3, T850, K i W850. Najveće vrijednosti pojavljuju se kod indeksa povezanim s kritičnim nivoima i CAPE indeksom. Indeks slaganja je u većini slučajeva proporcionalan s koefici-

TABLICA 5.10: Isto kao tablica 5.9, ali za 12 UTC.

Indeks	r^2	Bias	RMSE	RMSD	RAE	MAE	d
T850 [°C]	0.99	−0.07	0.84	0.12	0.02	0.07	0.99
MLTHETA [K]	0.96	−0.69	1.71	0.23	0.15	0.69	0.98
TPW [mm]	0.95	0.73	2.51	0.23	0.12	0.73	0.97
MLMIX [g/kg]	0.91	0.63	1.22	0.09	0.31	0.63	0.94
BS06 [m/s]	0.91	−0.65	3.55	0.11	0.10	0.65	0.95
LR3−6 [°C/km]	0.87	0.05	0.32	0.08	0.11	0.05	0.93
W850 [m/s]	0.86	−0.05	2.34	0.25	0.01	0.05	0.93
MLLCL [m]	0.83	−182.24	329.35	4.85	0.48	182.24	0.88
MLLI [°C]	0.83	−0.33	2.03	0.01	0.13	0.33	0.91
MUEL [m]	0.80	423.16	1946.26	109.15	0.16	423.16	0.89
MULI [°C]	0.79	−1.07	2.28	0.13	0.45	1.07	0.86
SRH03 [m2/s2]	0.79	−20.86	58.50	20.54	0.35	20.86	0.86
TT	0.79	−0.17	2.67	0.50	0.05	0.17	0.88
MUCD [m]	0.78	684.68	2224.65	24.28	0.26	684.68	0.87
BS01 [m/s]	0.77	−0.87	2.62	0.79	0.29	0.87	0.85
MaxBuo [K]	0.77	0.67	3.85	0.61	0.17	0.67	0.87
LR0−3 [°C/km]	0.76	−0.22	0.87	0.04	0.25	0.22	0.86
MUCAPE [J/kg]	0.75	304.18	695.36	146.95	0.47	304.18	0.83
MLEL [m]	0.74	102.43	2714.22	154.64	0.03	102.43	0.86
SI [°C]	0.73	0.08	1.95	0.36	0.04	0.08	0.85
MLCD [m]	0.71	284.67	2816.39	162.35	0.09	284.67	0.85
SWEAT	0.70	−5.45	52.15	5.84	0.10	5.45	0.84
MLCAPE [J/kg]	0.70	50.84	380.29	12.88	0.15	50.84	0.83
SRH01 [m2/s2]	0.70	−7.68	29.29	13.38	0.31	7.68	0.78
K [°C]	0.65	−0.02	5.17	0.99	0.00	0.02	0.79
MULCL [m]	0.61	−261.52	630.85	106.49	0.59	261.52	0.75
MUCAPE3 [J/kg]	0.59	47.99	93.95	30.26	0.83	47.99	0.68
W850dir [deg]	0.55	4.45	94.29	3.60	0.05	4.45	0.77
MLCAPE3 [J/kg]	0.48	5.94	35.68	3.69	0.23	5.94	0.69
MLCIN [J/kg]	0.45	23.23	103.21	42.68	0.36	23.23	0.62
MUCIN [J/kg]	0.34	5.51	41.96	8.51	0.23	5.51	0.55
MLBRN	0.06	116.00	2313.54	622.11	0.49	116.00	0.10

jentom determinacije, tj. za veće vrijednosti koeficijenta determinacije vrijednosti indeksa slaganja su veće.

Analizom statističkih parametara neki indeksi su se izdvojili kao bolje prognozirani, dok za druge dobivamo lošije rezultate. Indeksi koje ALADIN model uspješno prognozira 12 h unaprijed su: SI, TT, K, T850, W850, MLTHETA, MLMIX, LR3-6, LR0-3 i MaxBuo. Uspješno prognozirani indeksi uglavnom su izvedeni iz temperature i vjetra na značajnim plohama. Najlošiji rezultati dobiveni su za indekse koji su ovisni o visinama specifičnih nivoa: MLCD, MUCD, MLLCL, MULCL, MLEL i MUEL. Loši rezultati također su dobiveni za MUCAPE, MLCAPE, MLCAPE3, MUCAPE3, MLCIN, MUCIN i MLBRN. Te indekse je teško modelirati zato što sama vrijednost indeksa ne znači mnogo za konvekciju, nego je jako bitan oblik profila na termodinamičkom dijagramu. Također, za izračun CAPE, CIN i BRN indeksa važno je da su točno određene kritične plohe.

Manzato (2008) je u svojoj studiji uspoređivao 40 indeksa nestabilnosti dobivenih iz ECMWF modela i indekse iz radiosondaža na području Udina. Neki promatrani indeksi definicijom se podudaraju s našima pa ih možemo uspoređivati. ECMWF model je najuspješnije prognozirao potencijalnu temperaturu, koja je i kod nas imala visoki koeficijent determinacije. Također se u radu vide manje vrijednosti koeficijenta determinacije kod indeksa povezanih s karakterističnim nivoima (EL, LFC i LCL).

6 Zaključci

U ovom radu analizirani su odabrani indeksi nestabilnosti u svrhu poboljšanja prognoze konvekcije nad područjem Hrvatske i područjima koja je okružuju, Italija, Austrija, Mađarska. Indeksi nestabilnosti moraju uvažavati fizikalne mehanizme uključene u konvekciju: (i) dovoljno vlažan i dubok sloj u nižoj ili srednjoj atmosferi, (ii) uvjetnu nestabilnost i (iii) pokretački mehanizam koji će započeti konvekciju. Njihov izvor u ovom radu su radiosondažni profili tijekom predkonvektivnih uvjeta i tijekom početka konvekcije; kada se može dobro odrediti vlažnost i nestabilnost. Odabrano je 7 radiosondažnih postaja (na području Zagreba, Zadra, Beča, Budimpešte, Szegeda, Udina i San Pietro Capofiume-a) za razdoblje od 1. siječnja 2007. do 31. prosinca 2013. godine. Kao mjera konvekcije korišteni su LINET podaci o munjama za odabrano razdoblje. Također je odabrano 11 različitih indeksa nestabilnosti (LI, CAPE, CIN, K, TT, SI, SWEAT, BRN, TPW, θ_{ml} i r_{ml}) jer je pojedini indeks dizajniran s ciljem da opiše jednu osobitu karakteristiku konvekcije. Osim prostorno-vremenske analize munja, ciljevi su bili:

- (i) određivanje granične vrijednosti 11 odabranih indeksa nestabilnosti prema metodi raspodjele frekvencija (Fontana, 2008), iznad kojih bi vjerojatnost uspješne prognoze konvekcije bila zadovoljavajuća;
- (ii) određivanje tipičnih vremenskih tipova i režima strujanja tijekom konvektivnih dana te njihova povezanost s vrijednostima 11 odabranih indeksa nestabilnosti;
- (iii) usporedba radiosondažnih indeksa nestabilnosti za zagrebačko područje između radiosondažnih vrijednosti i ALADIN modela za povećani set indeksa.

Rezultati godišnjeg hoda pražnjenja za sedmogodišnje razdoblje su potvrdili dosadašnje analize (Mikuš i sur., 2012; Feudale i sur., 2013). Najmanji broj pražnjenja odvija se tijekom zimskih mjeseci, a najveći broj pražnjenja u ljetnim mjesecima (na svim postajama). U izmjeni sezona od proljeća prema jeseni, sijevanje mijenja

svoju dominantnu poziciju ali i uzrok. U proljeće i ljeto dominiraju orografski inducirana konvekcija te konvekcija uzrokovana lokalnim zonama konvergencije uslijed pojave obalne cirkulacije (Poljak i sur., 2014), vjetra obronka ili dolinskog/planinskog vjetra) te je više vezana za planinska područja i kopno. Tijekom kasnog ljeta i u jesen, kopno smanjuje svoju konvektivnu aktivnost (Budimpešta, Beč, Szeged, Zagreb, Udine) ali nad morem i obalnim područjem ona ostaje ista (San Pietro Capofiume), ili se povećava (Zadar). Dobiveni srednji hodovi broja munja po satima mogu se opisati pomoću kvazi-sinusoidalnog vala s najslabijom pojavom munja u jutarnji satima i najizraženijom pojavom munja u kasno poslijepodne (14–18 UTC) gotovo na svim kontinentalnim postajama (Budimpešta, Beč, Szeged, Zagreb). Nasuprot tome, obalna područja nemaju jako izražen dnevni hod sa samo manjim razlikama u San Pietro Capofiume-u i gotovo ujednačenim hodom u Zadru. Time se pokazalo da treba uzeti u obzir i udaljenost od same obalne linije prilikom analize prostorne raspodjele munja i graničnih vrijednosti jer Jadran ujesen potiče konvektivnu aktivnost nad morem izmjenom vlažnosti s atmosferom što je skladu s Feudale i sur. (2013).

Ograničavanjem analize na razdoblje od travnja do rujna, smanjio se utjecaj sezonske varijabilnosti graničnih vrijednosti. Metodom raspodjele frekvencija (Fontana, 2008) određene su granične vrijednosti indeksa nestabilnosti. Kod određenih granica nestabilnosti za pojedine indekse nije bilo većih odstupanja po postajama. Međutim, vjerojatnosti za dan s pražnjenjem, koje su izračunate za te granice, razlikuju se kod ponoćnih i podnevnih rezultata. Vjerojatnosti za dan s pražnjenjem dobivene iz podnevnih sondaža veće su nego vjerojatnosti dobivene iz ponoćnih sondaža kao posljedica utjecaja AGS-a. Podnevne vjerojatnosti zadovoljavajuće su za prognozu konvekcije. Usporedbom među postajama vidljivo je da su najveće vjerojatnosti za konvektivan dan dobivene za Udine i San Pietro Capofiume, zatim slijede gradovi u unutrašnjosti (Zagreb, Budimpešta, Szeged i Beč) i na kraju Zadar.

Pojedini indeksi pokazali su se uspješnijima od drugih za prognozu konvekcije. Najviše vjerojatnosti za konvektivan dan dobivene su za CAPE indeks i iznose više od 60% za sve gradove osim Zadra. Ističu se SI ($< 3^{\circ}\text{C}$) i LI ($< 1^{\circ}\text{C}$) kod kojih podnevne vjerojatnosti za dan s pražnjenjem prelaze 60% u Udinama, San Pietro Capofiume-u, Beču i Budimpešti. Budući da su vjerojatnosti visoke i na drugim postajama, vidi se da su SI i LI uspješni prediktori konvekcije na promatranom području. U Udinama i San Pietro Capofiume-u za prognozu konvekcije mogu se koristiti i indeksi K ($> 27^{\circ}\text{C}$) i TT ($> 46^{\circ}\text{C}$), koji u ta dva grada imaju podnevne vjerojatnosti od 59% i više. Najmanje vjerojatnosti za konvektivan dan dobivene

su za θ_{ml} i r_{ml} na svim postajama u svim terminima.

Tipovi vremena grupirani su u četiri režima vremena: oborinski režim, radijacijski režim, greben visokog tlaka zraka i bezgradijentno strujanje. S pojavom električnog pražnjenja povezani su oborinski režim i bezgradijentno strujanje, dok su tipovi vremena koji uključuju formacije visokog tlaka zraka rijetko povezani s konvekcijom. Najčešći tip strujanja za dane s pražnjenjem je SW (jugozapadni) tip.

Najveće srednje vrijednosti CAPE i LI indeksa pojavljuju se kod bezgradijentnog strujanja i oborinskog režima. Velike srednje vrijednosti K i TPW indeksa povezane su s bezgradijentnim strujanjem, dok se najveće srednje vrijednosti SWEAT indeksa javljaju u oborinskom režimu. Od svih promatranih indeksa jedino je SWEAT indeks (> 161) povezan s određenim tipom strujanja, i to s SW tipom.

Veza između radiosondažnih i modeliranih indeksa nestabilnosti atmosfere određena je računanjem statističkih parametara (koeficijenta determinacije, pristranosti, RMSE, RMSD, MAE, RAE i d-indeksa slaganja). Indeksi koje je ALADIN model uspješno prognozirao 12 h unaprijed su SI, TT, K, T850, W850, MLT-HETA, MLMIX, LR3-6, LR0-3 i MaxBuo. Ti indeksi uglavnom su izvedeni iz temperature i vjetra na značajnim plohama. Najslabiji rezultati dobiveni su za indekse MLCD, MUCD, MLLCL, MULCL, MLEL i MUEL, MUCAPE, MLCAPE, MLCAPE3, MUCAPE3, MLCIN, MUCIN i MLBRN.

Pokazalo se da niti jedan indeks ne može sam u potpunosti opisati atmosferu, što se moglo i očekivati. Ponekad se mogu dobiti čak kontradiktorni rezultati prilikom odvojenog korištenja indeksa. Iako su indeksi dizajnirani da olakšaju prepoznavanje potencijala atmosfere za konvektivnu aktivnost, postoje poteškoće koje opterećuju korištenje indeksa.

- (1) Nisu svi indeksi dizajnirani na fizikalnoj osnovi.
- (2) Ne postoji indeks koji je jednako dobar u svim lokacijama.
- (3) Svi indeksi su pod utjecajem pogrešaka mjerenja koje mogu imati uzrok u instrumentu i uzorkovanju. To je posebno važno za indekse koji ovise o malom broju podataka tj. podatku s jednog novoa (npr. Showalter indeks koji ovisi o Td na 850 hPa, npr. Manzato, 2008).
- (4) Nema indeksa koji može definirati pokretački mehanizam konvekcije dobiven samo iz radiosondaža.

- (5) Indeksi predstavljaju dijagnostičku veličinu na temelju koje radimo prognozu.
- (6) U slučajevima prolaska fronte preko domene interesa i u slučaju advektirane oluje u samo područje, reprezentativnost indeksa je upitna (Sanchez i sur., 2009).

Ovi rezultati mogu se poboljšati povećanjem broja mjerenja (po mogućnosti originalnih) s radiosondažnih postaja te produljenjem perioda istraživanja. Također bi vrijedilo pokušati predefinirati veličinu reprezentativne prostorne i vremenske domene i provesti dodatnu statistiku. Jedan od načina je korištenje kombinacije varijabli koje su grupirane zajedno u statističkom regresijskom modelu. U slučaju regresijskog modela postoji jasno definirana statistička tehnika koja odabire varijable koje će uspješnije opisati eksperimentalne podatke matematičkom funkcijom što bi poboljšalo rezultate ove studije.

Predložene metode primjenit će se u daljnjem istraživanju ovdje obrađivane problematike.

Diplomski rad

VEZA IZMEĐU RADIOSONDAŽNIH I MODELIRANIH INDEKSA NESTABILNOSTI ATMOSFERE I POJAVE MUNJA

Autor:

Martina ČURIĆ

Voditelj:

doc. dr. sc. Maja TELIŠMAN PRTENJAK

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 kojima se procjenjuje stabilno ili nestabilno stanje atmosfere. U ovom radu proučavani su indeksi nestabilnosti na području Zagreba, Zadra, Beča, Budimpešte, Szegeda, Udina i San Pietro Capofiume-a za sedmogodišnje razdoblje od 1. siječnja 2007. do 31. prosinca 2013. godine te su promatrani indeksi povezani s podacima detekcije električnih pražnjenja.

Granice nestabilnosti određene su metodom raspodjele frekvencija, a za podnevne podatke dobivene su zadovoljavajuće vjerojatnosti za uspješnu prognozu konvekcije. Indeksi koji su se pokazali najboljima za prognozu konvekcije su CAPE, SI i LI, dok su najlošiji rezultati dobiveni za θ_{ml} i r_{ml} . Režimi vremena povezani s pojavom električnog pražnjenja su oborinski režim i bezgradijentno strujanje, a najčešći tip strujanja u konvektivnim danima je SW. Najveće srednje vrijednosti CAPE i LI indeksa pojavljuju se kod bezgradijentnog strujanja i oborinskog režima. K i TPW indeksi povezani su s bezgradijentnim strujanjem, dok se najveće srednje vrijednosti SWEAT indeksa javljaju u oborinskom režimu. SWEAT indeks povezan je i s SW tipom strujanja.

Veza između radiosondažnih i modeliranih indeksa nestabilnosti atmosfere, za područje Zagreba u vremenskom razdoblju od 1. siječnja 2008. do 31. prosinca 2013. godine, određena je računanjem statističkih parametara (koeficijenta determinacije, procjenitelja (*bias*), RMSE, RMSD, MAE, RAE i d-indeksa slaganja). Indeksi

koje je ALADIN model uspješno prognozirao 12 h unaprijed su SI, TT, K, T850, W850, MLTHETA, MLMIX, LR3-6, LR0-3 i MaxBuo. Najslabiji rezultati dobiveni su za indekse povezane s kritičnim nivoima. 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.

KLJUČNE RIJEČI: INDEKSI NESTABILNOSTI, ELEKTRIČNA PRAŽNJENJA, TIPOVI VREMENA, TIPOVI STRUJANJA, ALADIN MODEL

Literatura

- Belušić D., Grisogono B., Bencetić Klaić Z.: *Atmospheric origin of the devastating coupled air-sea event in the east Adriatic*, J. Geophys. Res. 112, 1-12, 2007.
- 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.
- Brooks C. E. P.: *The distribution of thunderstorms over the globe*, Geophys. Memo., 3(24), 147– 164, 1925.
- Byers H.R., Rodebush H.R.: *Causes of thunderstorms of the Florida peninsula*, J. Meteor. 5, 275–280, 1948.
- Chai T., Draxler R.R.: *Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? –Arguments against avoiding RMSE in the literature*, Geosci. Model Dev., 7, 1247–1250, 2014.
- 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), 2003.
- Cotton W. R., Bryan G., Van den Heever S.C.: *Storm and cloud dynamics.*, Elsevier Academic Press, Oxford, 2011.
- Doswell C.A. III, Schultz D.M.: *On the use of indices and parameters in forecasting severe storms*, Electronic J. Severe Storms Meteor., 1–22, 2006.
- Feudale L., Manzato A.: *Cloud-to-ground lightning distribution and its relationship with orography and anthropogenic emissions in the po valley*, J. Appl. Meteor. Climatol., 53, 2651–2670., 2014.

- Feudale L., Manzato A., Micheletti S.: *A cloud-to-ground lightning climatology for north-eastern Italy*, Adv. Sci. Res., 10, 77–84, 2013.
- Fontana D. A.: *Tuning of a thunderstorm index for north-eastern Italy*, Royal Met. Apps, 15, 475–482, 2008.
- 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.
- Galway, J. G.: *The lifted index as a pre-dictor of latent instability.*, Bull. Amer. Meteor. Soc., 43, 528–529, 1956.
- Grisogono B., Belušić D.: *Uvod u mezoskalnu meteorologiju i atmosfersku turbulenciju.*, Interne skripte, str. 148, PMF, Zagreb 2008.
- Groenemeijer P.H., van Delden A.: *Sounding-derived parameters associated with large hail and tornadoes in the Netherlands.*, Atmos. Res. 83, 473–487, 2007.
- Haklander A. J., van Delden A.: *Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands.*, Atmos. Res. 67–68, 273–299, 2003.
- Holton J. R., Curry J. A., Pyle J. A.: *Encyclopedia of atmospheric sciences*, Academic Press, San Diego, 2002.
- Horvath K., Lin Y.-L., Ivančan-Picek B.: *Classification of Cyclone Tracks over Apennines and the Adriatic Sea.*, Mon. Wea. Rev., 136, 2210–2227, 2008.
- 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.
- Huntrieser H., Schiesser H.H., Schmid W., Waldvogel A.: *Comparison of traditional and newly developed thunderstorm indices for Switzerland.*, Weather Forecast, 12, 108–125, 1997.
- Ivančan-Picek B., Glasnović D., Jurčec V.: *Analysis and ALADIN prediction of a heavy precipitation event on the Eastern side of the Alps during MAP IOP 5.*, Meteorol. Z., 12, 103–112, 2003.

- Ivatek-Šahdan S., Tudor M.: *Use of high-resolution dynamical adaptation in operational suite and research impact studies.*, Meteorol. Z., 13, 99–108, 2004.
- Kaltenböck R., Diendorfer G., Dotzek N.: *Evaluation of thunderstorms indices from ECMWF analyses, lightning data and severe storm reports.*, Atmos. Res. 93, 381–396, 2009.
- Lončar E., Vučetić V.: *Tipovi vremena i njihova primjena na sjeverni Jadran.*, Hrvatski meteorološki časopis, 38, 57–81, 2003.
- Manzato, A.: *A climatology of instability indices derived from Friuli Venezia Giulia soundings, using three different methods.*, Atmos. Res. 67–68, 417–454, 2003.
- Manzato A.: *The 6 h climatology of thunderstorms and rainfalls in the Friuli Venezia Giulia Plain.*, Atmos. Res., 83, 336–348, 2007.
- Manzato A.: *A verification of numerical model forecasts for sounding-derived indices above Udine, northeast Italy.*, Weather and Forecasting, 23, 477–495, 2008.
- 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.
- Mikuš Jurković P., Strelec Mahović N., Počakal D.: *Lightning, overshooting top and hail characteristics for strong convective storms in central Europe*, Atmos. Res., 161–162, 153–168, 2015.
- Pandžić K.: *Analiza meteoroloških polja i sustava.*, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, HINUS, Zagreb, 2002.
- Penzar B., Penzar I. i Orlić M.: *Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana.*, Nakladna kuća «Dr. Feletar», Hrvatski hidrografski institut Split, Zagreb, 258 str. 2001.
- 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.
- 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.

- Plačko-Vršnak D., Mikec K., Mokorić M.: *The comparison of weather types in years of extreme drought over Croatia.*, 14th EMS Annual Meeting and 10th European Conference on Applied Climatology (ECAC), 06 – 10 October 2014, Prague, Czech Republic, 2014.
- Počakal D., Štalec J.: *Statistical analysis of hail characteristics in the hail-protected western part of Croatia using data from hail suppression stations.*, Atmos. Res., 67/68, 533-540, 2003.
- Počakal D., Večenaj Ž., Štalec J.: *Hail characteristics of different regions in continental part of Croatia based on influence of orography.*, Atmos. Res., 93, 1/3 (S.I.); 516-525, 2009.
- Poje D.: *Tipovi vremena u Jugoslaviji i njihova ovisnost o cirkulaciji atmosfere nad Jugoslavijom.*, disertacija, Zagreb, pp 215, 1965.
- Poljak G., Telišman Prtenjak M., Kvakić M., Strelec Mahović N., Babić K.: *Wind patterns associated with the development of daytime thunderstorms over Istria.*, Ann. Geophys., 32, 401–420, 2014.
- 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.
- Sánchez J. L., Marcos J. L., Dessens J., López L., Bustos C., García-Ortega E.: *Assessing sounding-derived parameters as storm predictors in different latitudes.*, Atmos. Res. 93, 446-456, 2009.
- Sherwood S. C., Roca R., Weckwerth T. M., Andronova N. G.: *Tropospheric water vapour, convection and climate.*, Rev. Geophys. 48, RG2001, 2010.
- Showalter A. K.: *A stability index for forecasting thunderstorms.*, Bull. Amer. Meteor. Soc., 34, 250–252, 1947.
- Smiljanić I., Bahorić Z., Strelec Mahović N.: *The value of satellite-derived instability indices in the assessment of pre-convective conditions.*, Hrvatski meteorološki časopis. 48/49, 19-36, 2013./2014.
- Tudor M., Ivatek-Šahdan S., Stanešić A., Horvath K. i Bajic A.: *Croatia using ALADIN numerical weather prediction model.*, InTech, str. 59–88, 2013.
- Tuduri E., Ramis C.: *The environments of significant convective events in the western Mediterranean.*, Weather Forecast., 12, 294–306, 1997.

- 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.
- Uman M.A.: *The lightning discharge.*, Dover Publications, New York, USA, 2001.
- Yair Y., Lynn B., Price C., Kotroni V., Lagouvardos K., Morin E., Mugnai A., Llasat M. C. : *Predicting lightning density in Mediterranean storms based on the WRF model dynamic and microphysical fields.*, J. Geophys. Res., 115, 2010.
- Zaninović K., Gajić-Čapka M., Perčec Tadić M., Vučetić M., Milković J., Bajić A., Cindrić K., Cvitan L., Katušin Z., Kaučić D., Likso T., Lončar E., Lončar Ž., Mihajlović D., Pandžić K., Patarčić M., Srnec L., Vučetić V.: *Klimatski atlas Hrvatske, 1961–1990, 1971–2000.*, Meteorological and Hydrological Service of Croatia, Zagreb, 2008.

Popis slika

1.1	Štete uzrokovane prirodnim nepogodama u Hrvatskoj za razdoblje 1981.–2010.	1
1.2	Prikaz CAPE-a i CIN-a na termodinamičkom dijagramu.	5
1.3	Bočni prikaz kumulonimbusa (Cb) u njegovoj zreloj fazi (a), shematski prikaz naboja unutar oblaka (Holton, 2002)(b).	10
4.1	Mapa LINET senzora u Europi (preuzeto iz Uglešić i sur., 2009). . .	16
4.2	Prikaz podatkovne datoteke za detekciju električnog pražnjenja. . .	17
4.3	Prikaz domene s dostupnim LINET podacima (crni pravokutnik) i promatranih pod-domena.	18
4.4	Raspodjele frekvencija za LI za reprezentativno područje Zagreba u 12 UTC.	20
4.5	Primjer pseuotempa iz ALADIN modela za Zagreb 2.6.2008.	22
5.1	Godišnji hod prosječnog broja dana s električnim pražnjenjem za Zagreb (a), Udine (c) i Zadar (e); te godišnji hod ukupnog broja pražnjenja po mjesecima za Zagreb (b), Udine (d) i Zadar (f). . . .	27
5.2	Dnevni hod prosječnog broja dana s električnim pražnjenjem za Zagreb (a), Udine (c) i Zadar (e); te dnevni hod ukupnog broja pražnjenja po satima za Zagreb (b), Udine (d) i Zadar (f).	29
5.3	Reprezentativnost radiosondaža za Zagreb u ponoć (a) i podne (b). . .	37
5.4	Udio dana sa zabilježenim pražnjenjem za vremenske režime.	38

5.5	Učestalost režima vremena po mjesecima za dane s pražnjenjem za Zagreb (a), Budimpeštu (b), Szeged (c), Beč (d), Zadar (e), SPC (f) i Udine (g).	40
5.6	Učestalosti smjerova vjetra za dane s pražnjenjem u 00 UTC (a) i 12 UTC (b).	40
5.7	Vertikalni profili dobiveni iz radiosondaža (crvena linija) i ALADIN modela (plava linija) za temperaturu zraka (a), temperaturu rosišta (b), brzinu vjetra (c) i smjer vjetra (d).	42
5.8	Točkasti dijagrami potencijalne temperature (a) i BRN indeksa (b). Pravci su dobiveni metodom najmanjih kvadrata.	44
A1	Godišnji hod ukupnog broja pražnjenja za Beč (a), Budipmeštu (b), Szeged (c) i SPC (d)	i
A2	Godišnji hod prosječnog broja dana s električnim pražnjenjem za Beč (a), Budipmeštu (b), Szeged (c) i SPC (d)	ii
A3	Dnevni hod ukupnog broja pražnjenja po satima za Beč (a), Budipmeštu (b), Szeged (c) i SPC (d)	iii
A4	Dnevni hod prosječnog broja dana s električnim pražnjenjem za Beč (a), Budipmeštu (b), Szeged (c) i SPC (d)	iv
B1	Reprezentativnost radiosondaža za Budimpeštu 00 UTC (a), Budipmeštu 12 UTC (b), Szeged 00 UTC(c), Szeged 12 UTC(d), Beč 00 UTC(e), Beč 12 UTC(f)	v
B2	Reprezentativnost radiosondaža za Zadar 00 UTC (a), Zadar 12 UTC (b), Udine 00 UTC(c), Udine 12 UTC(d), SPC 00 UTC(e), SPC 12 UTC(f)	vi
C1	Učestalost režima strujanja po mjesecima za Zagreb 00 UTC (a), Zagreb 12 UTC (b), Beč 00 UTC(c), Beč 12 UTC (d), Budimpeštu 00 UTC (e) i Budimpeštu 12 UTC (f).	vii
C2	Učestalost režima strujanja po mjesecima za Zadar 00 UTC (a), Zadar 12 UTC (b), Udine 00 UTC(c), Udine 12 UTC (d), SPC 00 UTC (e), SPC 12 UTC (f) i Szeged 00 UTC (g).	viii

D1	Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po režimima vremena; BRN 00 UTC (a), BRN 12 UTC (b), CAPE 00 UTC (c), CAPE 12 UTC (d), CIN 00 UTC (e), CIN 12 UTC (f)	ix
D2	Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po režimima vremena; LI 00 UTC (a), LI 12 UTC (b), SI 00 UTC (c), SI 12 UTC (d), K 00 UTC (e), K 12 UTC (f)	x
D3	Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po režimima vremena; TT 00 UTC (a), TT 12 UTC (b), TPW 00 UTC (c), TPW 12 UTC (d), SWEAT 00 UTC (e), SWEAT 12 UTC (f)	xi
D4	Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po režimima vremena; θ_{ml} 00 UTC (a), θ_{ml} 12 UTC (b), r_{ml} 00 UTC (c), r_{ml} 12 UTC (d). . .	xii
E1	Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po tipovima strujanja; BRN 00 UTC (a), BRN 12 UTC (b), CAPE 00 UTC (c), CAPE 12 UTC (d), CIN 00 UTC (e), CIN 12 UTC (f)	xiii
E2	Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po tipovima strujanja; LI 00 UTC (a), LI 12 UTC (b), SI 00 UTC (c), SI 12 UTC (d), K 00 UTC (e), K 12 UTC (f)	xiv
E3	Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po tipovima strujanja; TT 00 UTC (a), TT 12 UTC (b), TPW 00 UTC (c), TPW 12 UTC (d), SWEAT 00 UTC (e), SWEAT 12 UTC (f)	xv
E4	Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po tipovima strujanja; θ_{ml} 00 UTC (a), θ_{ml} 12 UTC (b), r_{ml} 00 UTC (c), r_{ml} 12 UTC (d). . .	xvi

Popis tablica

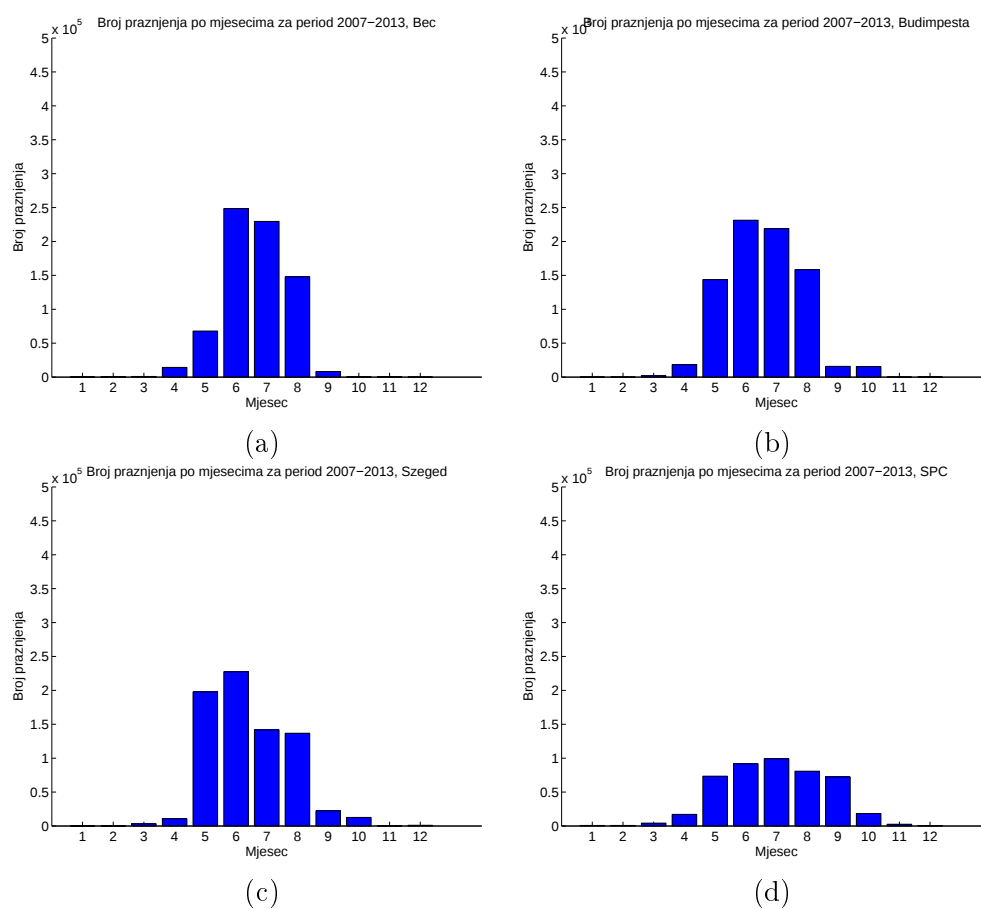
1.1	Indeksi nestabilnosti (http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices.php)	3
1.2	Vrijednosti LI ($^{\circ}\text{C}$) za različite uvjete u atmosferi za razvoj slobodne konvekcije (http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices.php). . .	4
1.3	Vrijednosti CAPE-a (J/kg) za različite uvjete u atmosferi za razvoj slobodne konvekcije (http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices.php)	5
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)	6
1.5	Vrijednosti TT indeksa ($^{\circ}\text{C}$) za različite uvjete u atmosferi izvan-tropskih širina za razvoj slobodne konvekcije (http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices.php).	7
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)	7
1.7	Vrijednosti BRN za različite uvjete u atmosferi (http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices.php).	8
4.1	Geografski položaj radiosondažnih postaja.	15
4.2	Reprezentativna područja za promatrane radiosondažne postaje. . .	18
4.3	Tipovi vremena korišteni u radu; predstavljaju poopćenu kategorizaciju klasifikacije vremenskih tipova po uzoru na Poje (1965). . .	21

4.4	Indeksi nestabilnosti korišteni za usporedbu ALADIN modela i radiosondaža	24
5.1	Broj registriranih munja, broj dana s registriranim munjama i udio dana s registriranim munjama iznad reprezentativnih područja promatranih postaja.	25
5.2	Broj dana s pražnjenjem po godinama za promatrane postaje. Osjenčan je najveći broj dana s pražnjenjem po godinama.	26
5.3	Broj električnih pražnjenja, broj dana s električnim pražnjenjem i udio broja dana s električnim pražnjenjem za razdoblje od travnja do rujna (2007.–2013.).	31
5.4	Granične vrijednosti i vjerojatnosti za dan s pražnjenjem za kontinentalne gradove u 12 UTC.	32
5.5	Granične vrijednosti i vjerojatnosti za dan s pražnjenjem za obalne gradove u 12 UTC.	33
5.6	Granične vrijednosti i vjerojatnosti za dan s pražnjenjem za kontinentalne gradove u 12 UTC.	34
5.7	Granične vrijednosti i vjerojatnosti za dan s pražnjenjem za obalne gradove u 12 UTC.	34
5.8	Vertikalni profil zagrebačke radiosondaže 2.6.2008.u 00 UTC	43
5.9	Statistički parametri dobiveni usporedbom 32 indeksa nestabilnosti iz radiosondaža i ALADIN modela za Zagreb od 1.1.2008. do 31.12.2013. u 00 UTC.	45
5.10	Isto kao tablica 5.9, ali za 12 UTC.	46

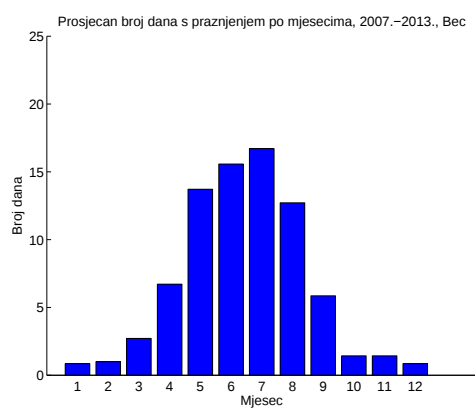
Prilozi

Prilog A

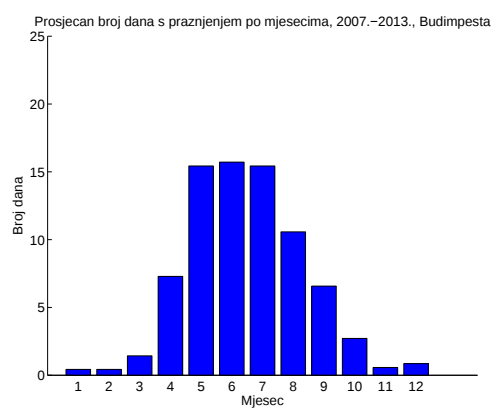
Godišnji i dnevni hodovi ukupnog broja električnih pražnjenja i prosječnog broja dana s pražnjenjem



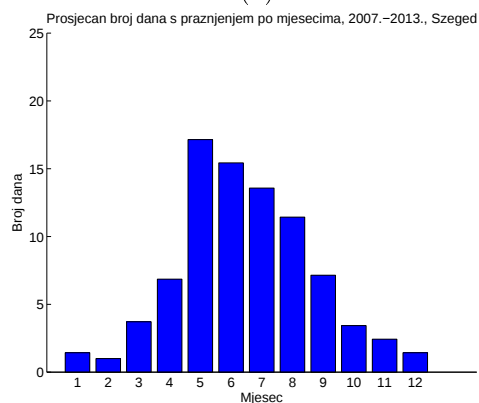
SLIKA A1: Godišnji hod ukupnog broja pražnjenja za Beč (a), Budimpeštu (b), Szeged (c) i SPC (d) za razdoblje 2007.-2013.



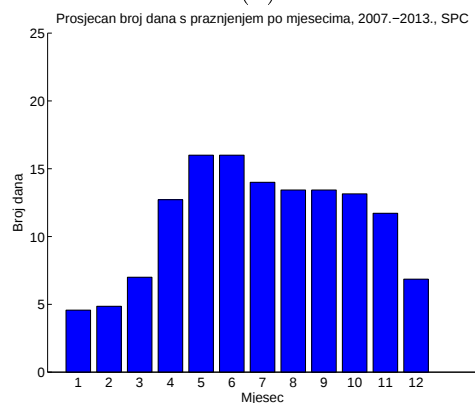
(a)



(b)



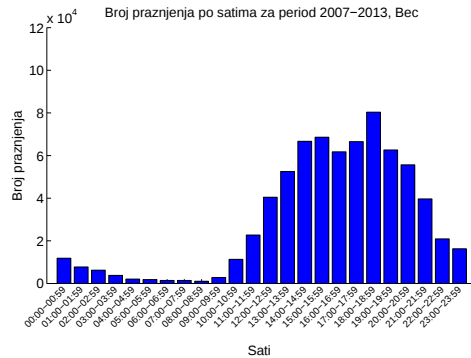
(c)



(d)

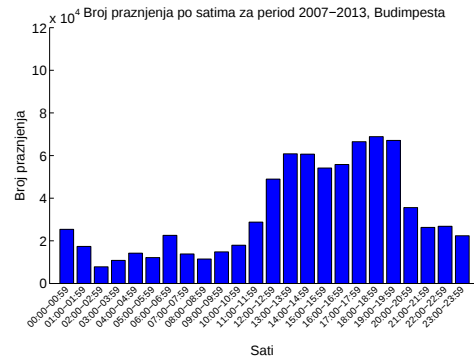
SLIKA A2: Godišnji hod prosječnog broja dana s električnim pražnjenjem za Beč (a), Budimpeštu (b), Szeged (c) i SPC (d) za razdoblje 2007.-2013.

Broj praznjenja po satima za period 2007–2013, Beč



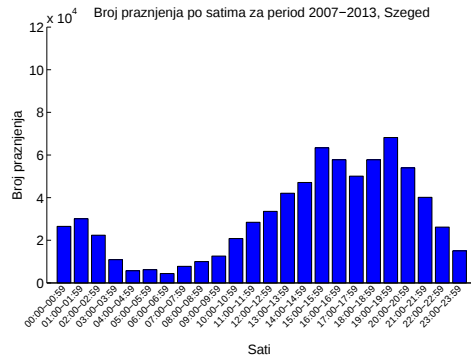
(a)

Broj praznjenja po satima za period 2007–2013, Budimpešta



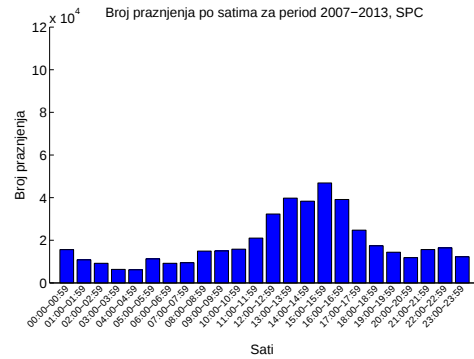
(b)

Broj praznjenja po satima za period 2007–2013, Szeged



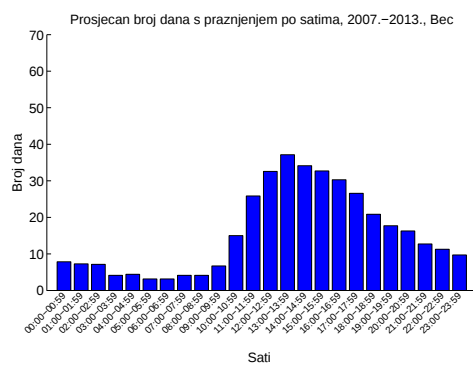
(c)

Broj praznjenja po satima za period 2007–2013, SPC

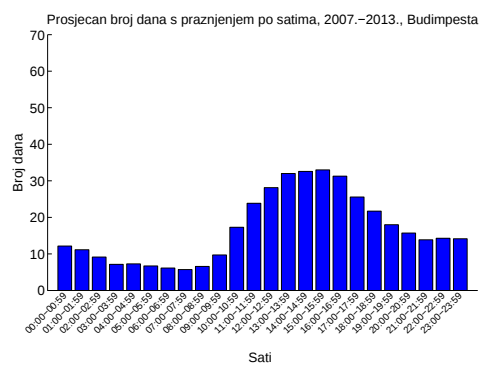


(d)

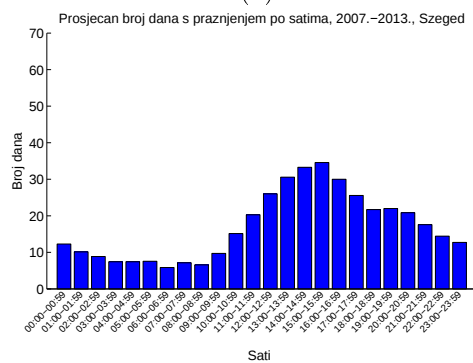
SLIKA A3: Dnevni hod ukupnog broja pražnjenja po satima za Beč (a), Budimpeštu (b), Szeged (c) i SPC (d) za razdoblje 2007.-2013.



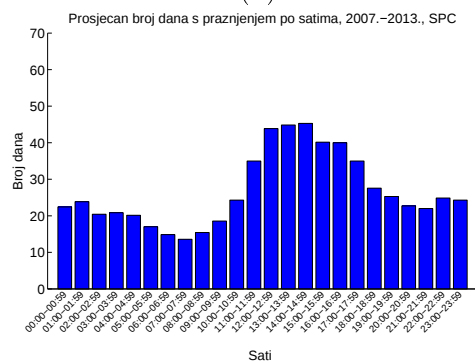
(a)



(b)



(c)

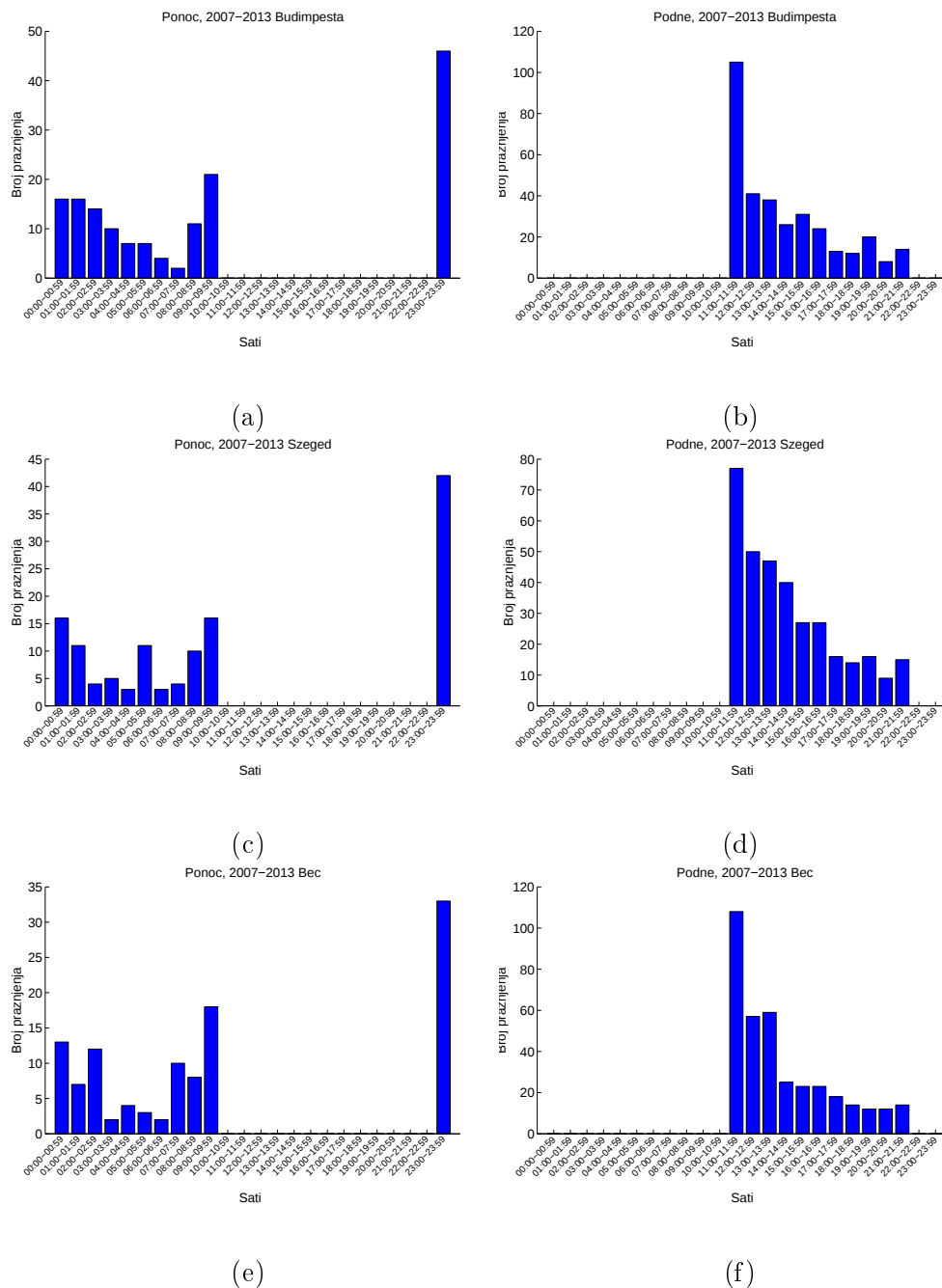


(d)

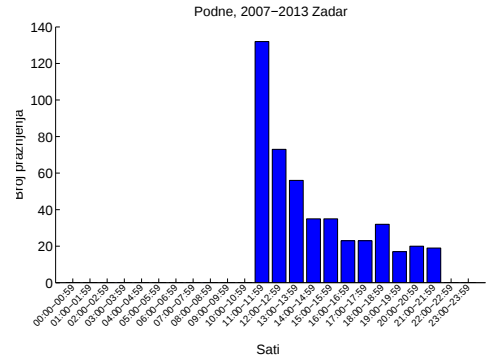
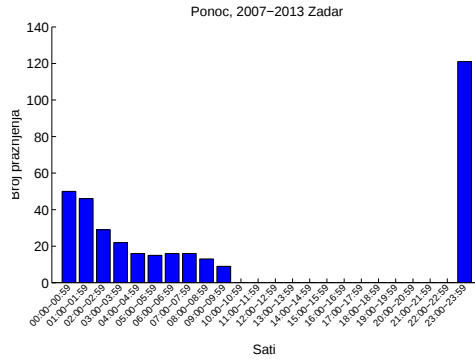
SLIKA A4: Dnevni hod prosječnog broja dana s električnim praznjenjem za Beč (a), Budimpeštu (b), Szeged (c) i SPC (d) za razdoblje 2007.-2013.

Prilog B

Reprezentativnost radiosondaža

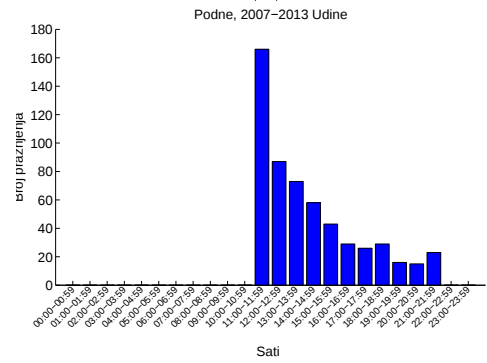
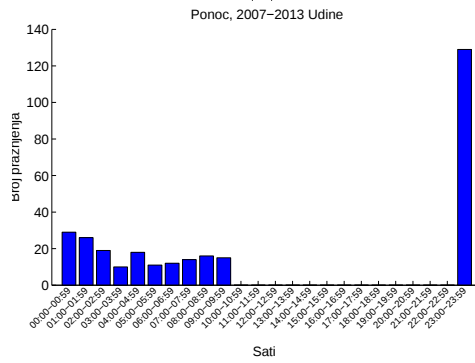


SLIKA B1: Reprezentativnost radiosondaža za Budimpeštu 00 UTC (a), Budimpeštu 12 UTC (b), Szeged 00 UTC(c), Szeged 12 UTC(d), Beč 00 UTC(e), Beč 12 UTC(f).



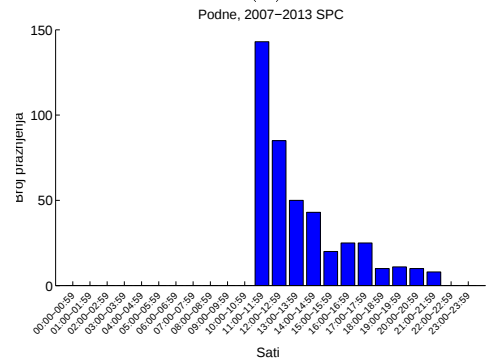
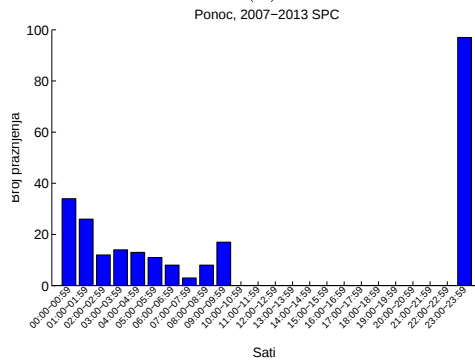
(a)

(b)



(c)

(d)



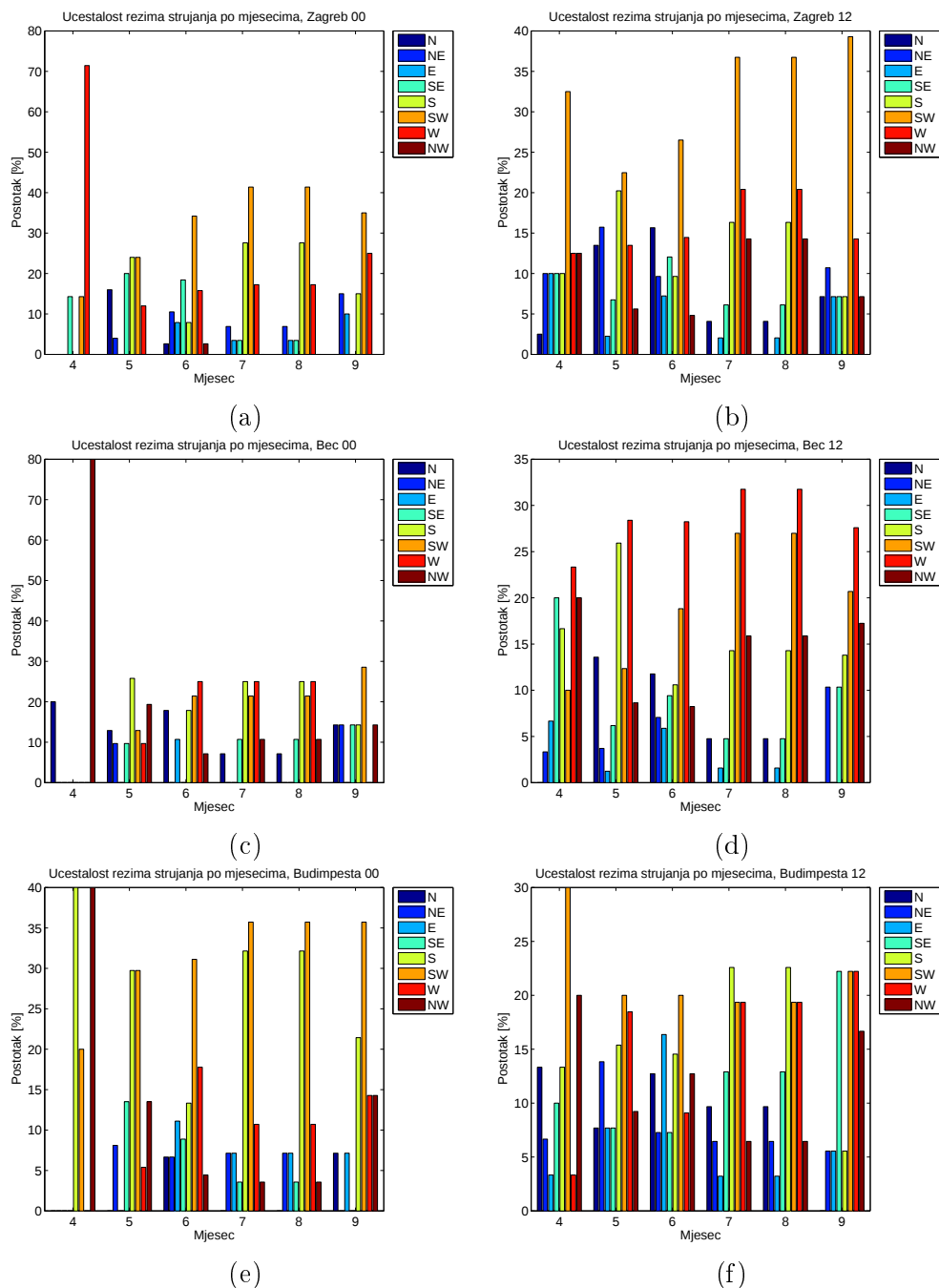
(e)

(f)

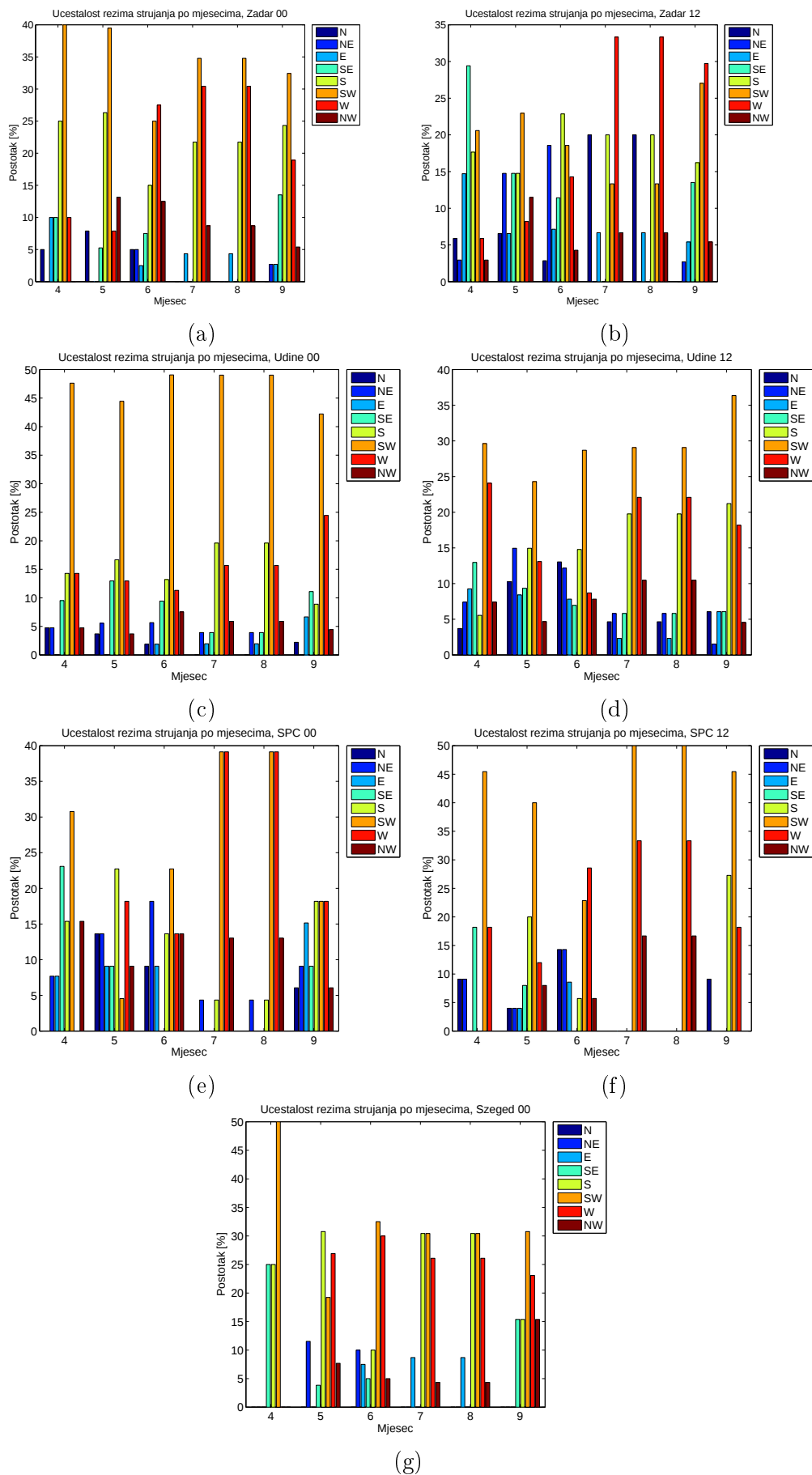
SLIKA B2: Reprezentativnost radiosondaža za Zadar 00 UTC (a), Zadar 12 UTC (b), Udine 00 UTC(c), Udine 12 UTC(d), SPC 00 UTC(e), SPC 12 UTC(f).

Prilog C

Učestalost tipova strujanja po mjesecima



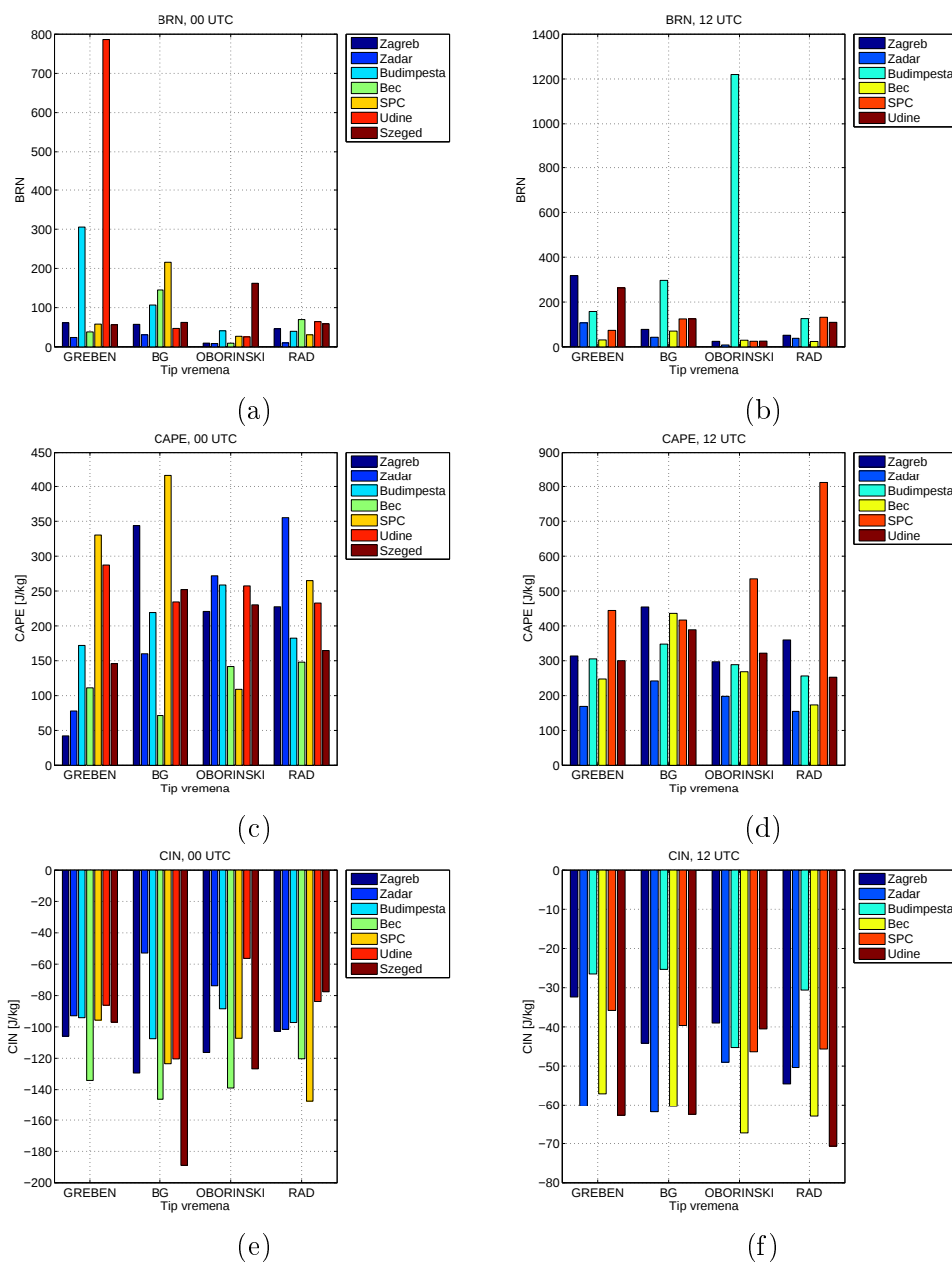
SLIKA C1: Učestalost režima strujanja po mjesecima za Zagreb 00 UTC (a), Zagreb 12 UTC (b), Beč 00 UTC(c), Beč 12 UTC (d), Budimpeštu 00 UTC (e) i Budimpeštu 12 UTC (f).



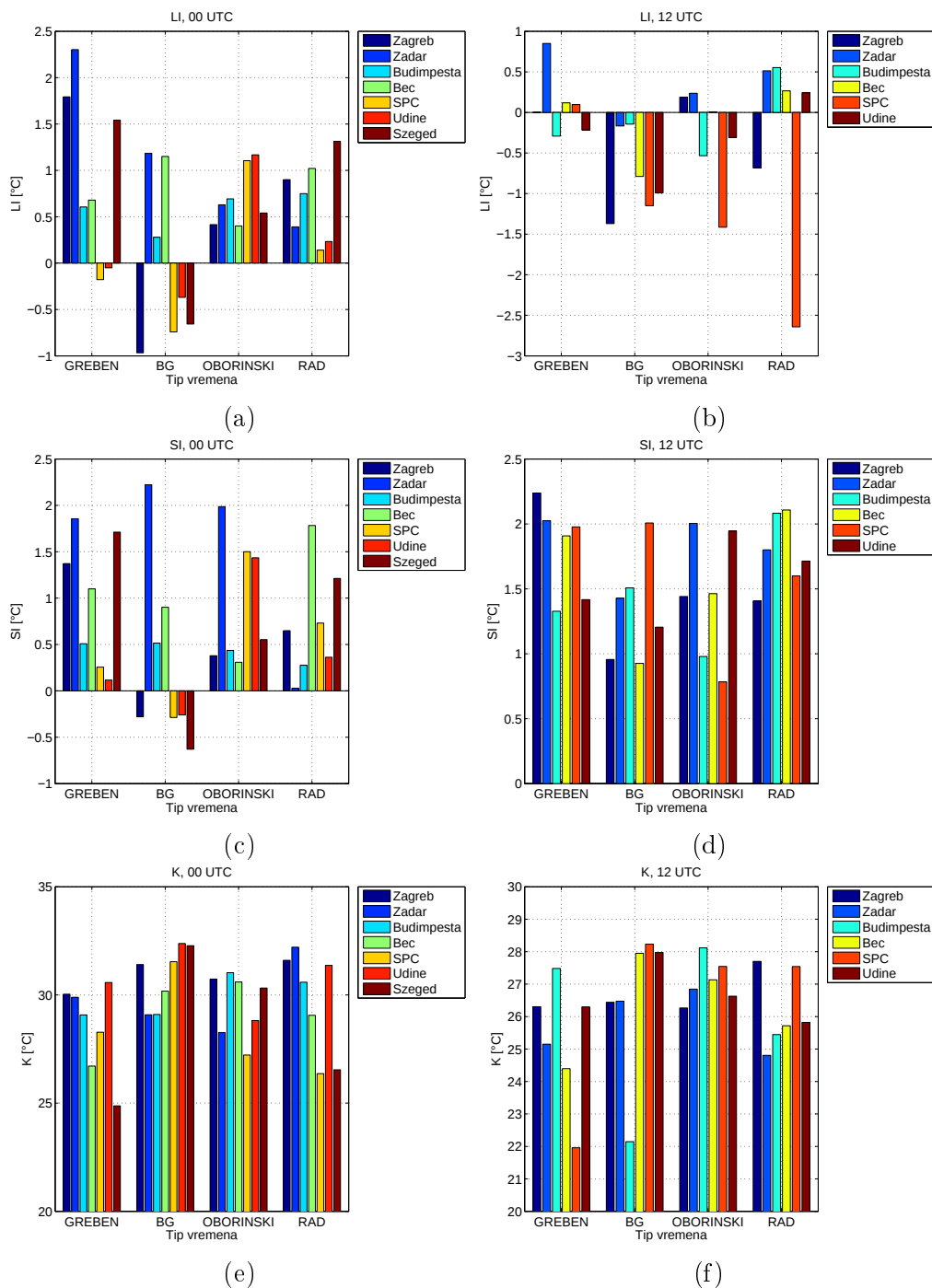
SLIKA C2: Učestalost režima strujanja po mjesecima za Zadar 00 UTC (a), Zadar 12 UTC (b), Udine 00 UTC (c), Udine 12 UTC (d), SPC 00 UTC (e), SPC 12 UTC (f) i Szeged 00 UTC (g). viii

Prilog D

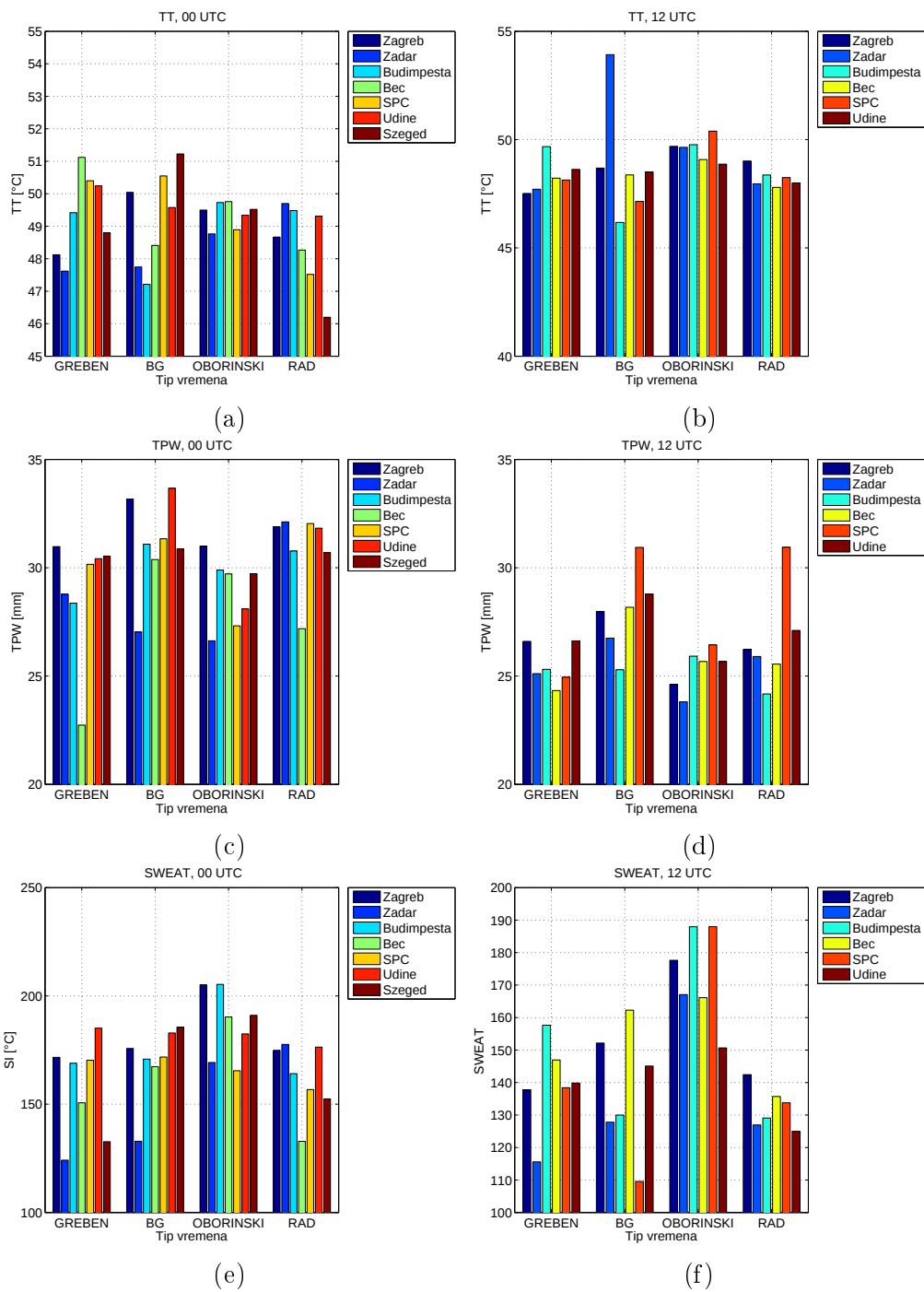
Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po režimima vremena



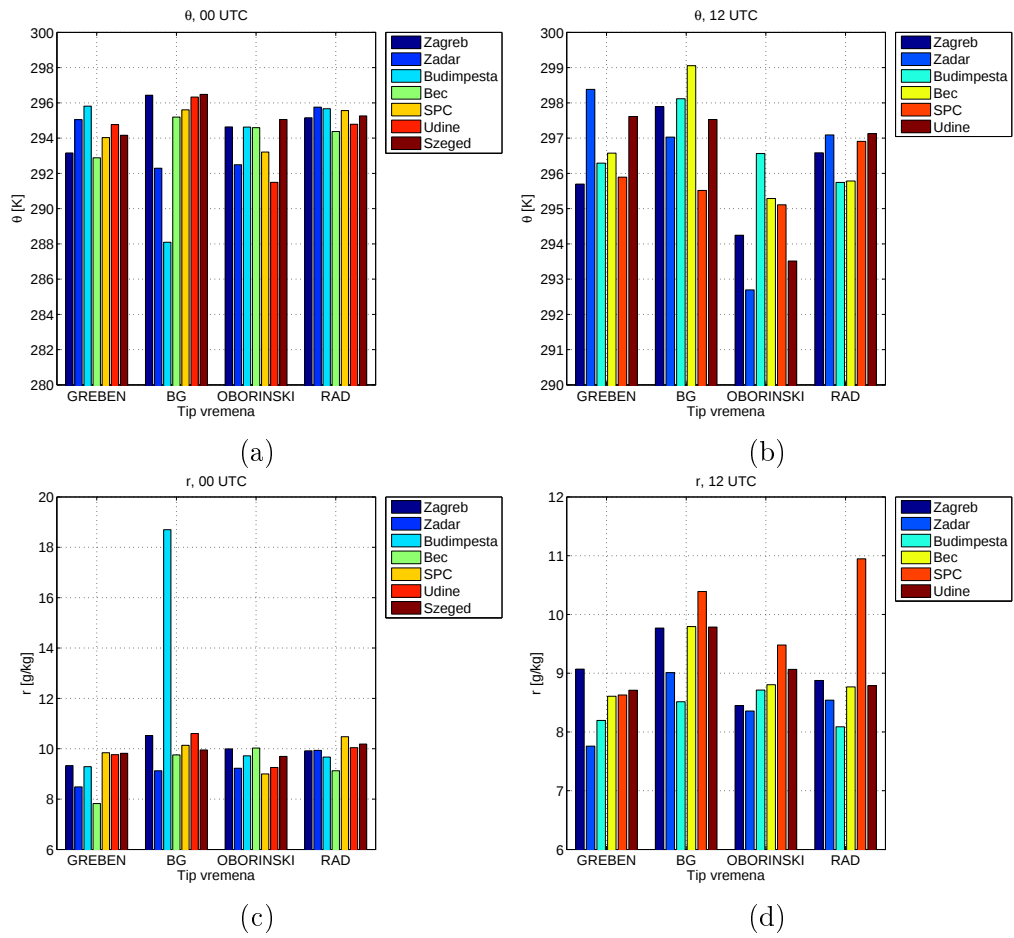
SLIKA D1: Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po režimima vremena; BRN 00 UTC (a), BRN 12 UTC (b), CAPE 00 UTC (c), CAPE 12 UTC (d), CIN 00 UTC (e), CIN 12 UTC (f).



SLIKA D2: Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po režimima vremena; LI 00 UTC (a), LI 12 UTC (b), SI 00 UTC (c), SI 12 UTC (d), K 00 UTC (e), K 12 UTC (f).



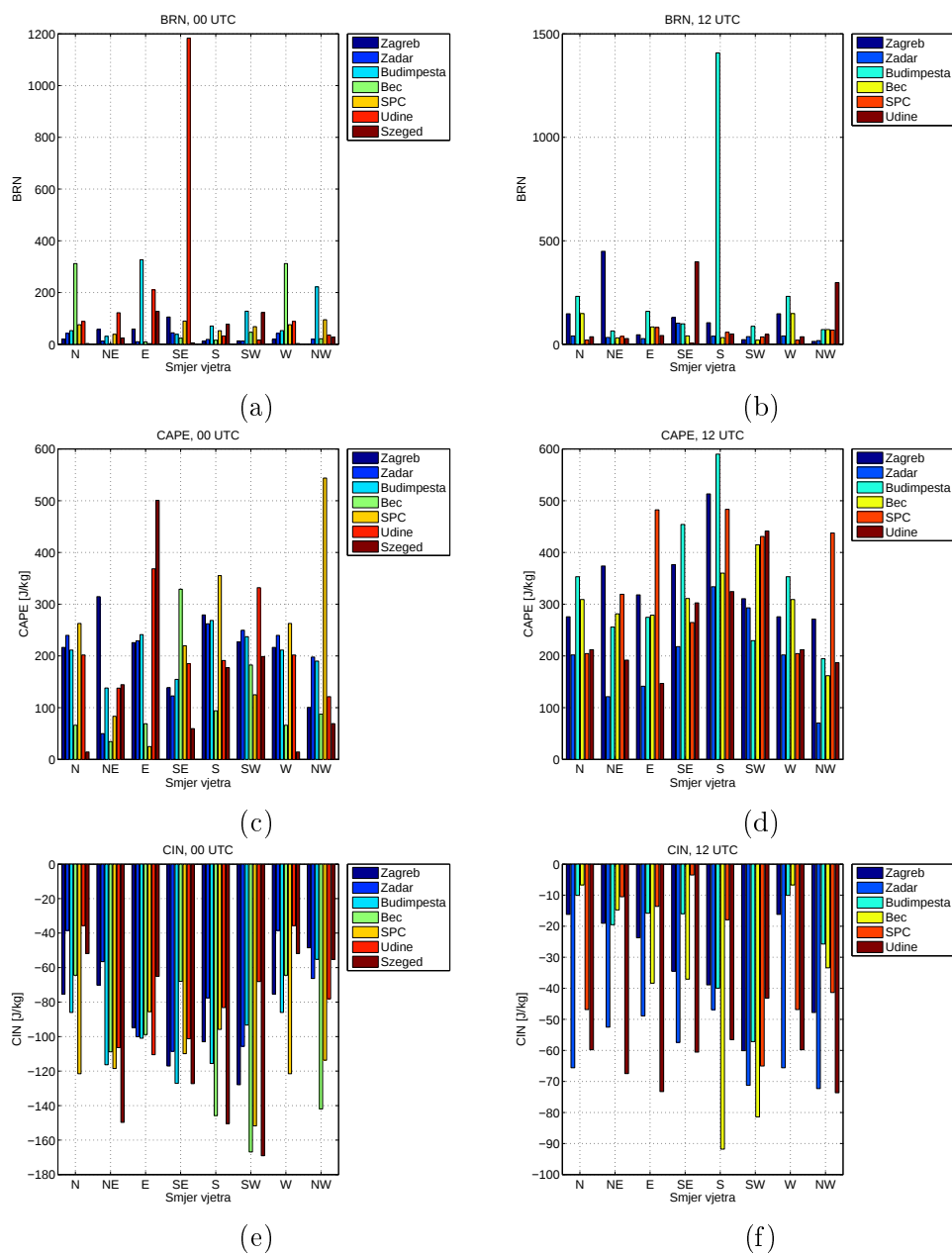
SLIKA D3: Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po režimima vremena; LI 00 UTC (a), LI 12 UTC (b), SI 00 UTC (c), SI 12 UTC (d), K 00 UTC (e), K 12 UTC (f).



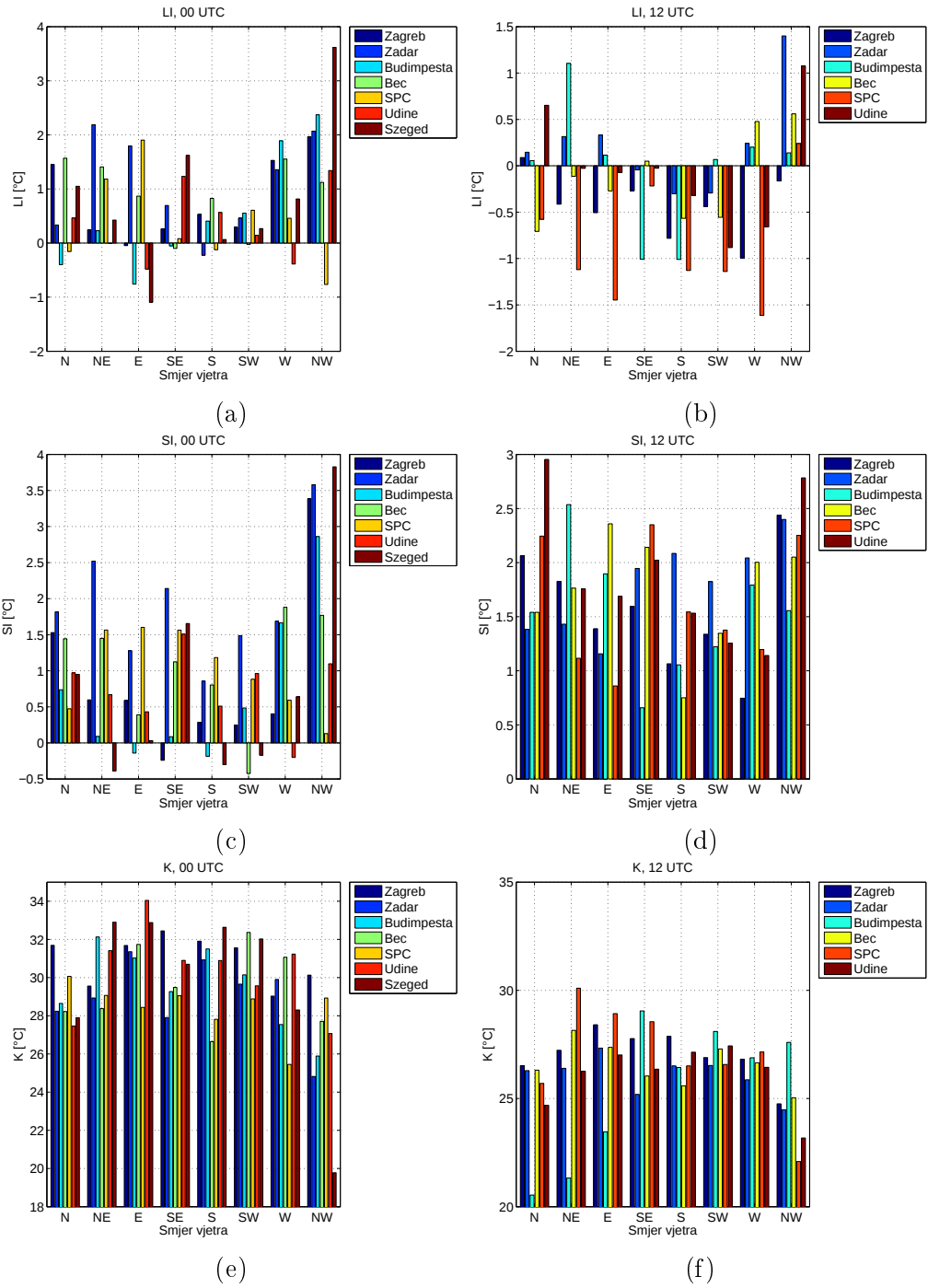
SLIKA D4: Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po režimima vremena; θ_{ml} 00 UTC (a), θ_{ml} 12 UTC (b), r_{ml} 00 UTC (c), r_{ml} 12 UTC (d).

Prilog E

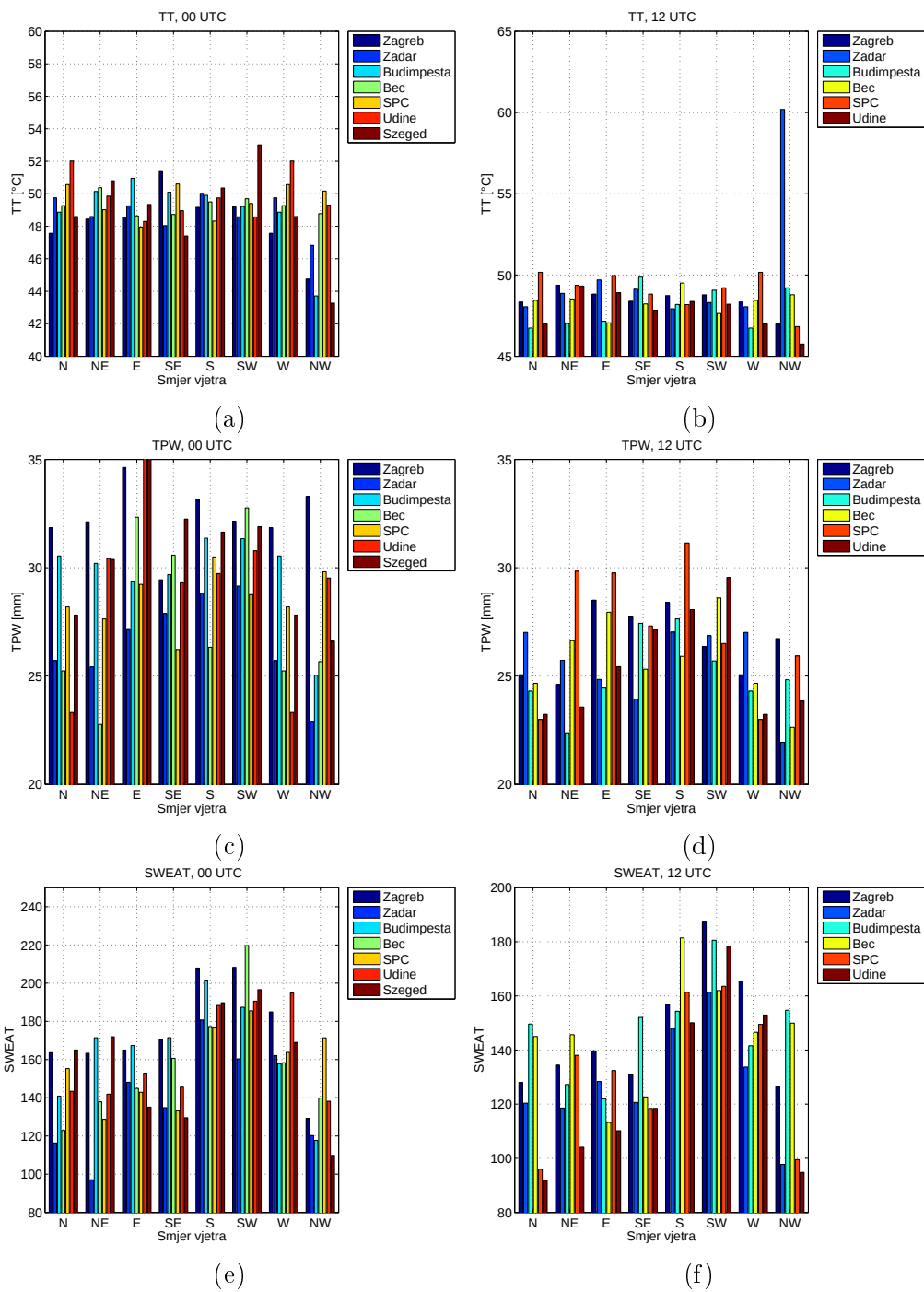
Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po tipovima strujanja



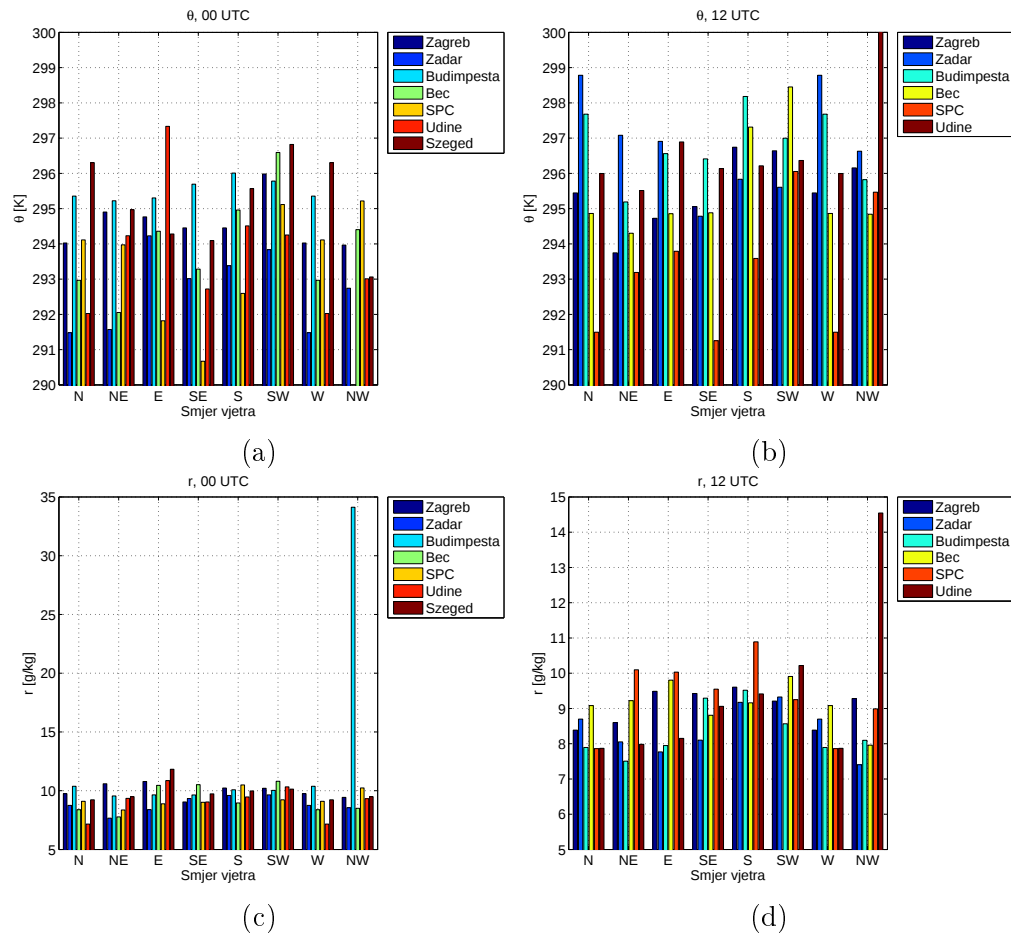
SLIKA E1: Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po tipovima strujanja; BRN 00 UTC (a), BRN 12 UTC (b), CAPE 00 UTC (c), CAPE 12 UTC (d), CIN 00 UTC (e), CIN 12 UTC (f).



SLIKA E2: Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po tipovima strujanja; LI 00 UTC (a), LI 12 UTC (b), SI 00 UTC (c), SI 12 UTC (d), K 00 UTC (e), K 12 UTC (f).



SLIKA E3: Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po tipovima strujanja; TT 00 UTC (a), TT 12 UTC (b), TPW 00 UTC (c), TPW 12 UTC (d), SWEAT 00 UTC (e), SWEAT 12 UTC (f).



SLIKA E4: Srednje vrijednosti indeksa nestabilnosti po tipovima strujanja; θ_{ml} 00 UTC (a), θ_{ml} 12 UTC (b), r_{ml} 00 UTC (c), r_{ml} 12 UTC (d).