

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Damjan Jelić

Diplomski rad

Analiza radarskih procjena oborine

Voditelj: Prof. dr. sc. Branko Grisogono

Zagreb, 2013.

Ovim putem želim se zahvaliti cijelom odjelu obrane od tuče pri DHMZ-u na podacima, stručnoj pomoći i podršci, a posebno Zvonku Komeričkom na utrošenom vremenu, tehničkoj podršci, svim komentarima i savjetima.

Posebno bih zahvalio svom mentoru prof. dr. sc. Branku Grisogonu na podršci, korisnim savjetima, velikom strpljenju i razumijevanju.

Sadržaj

Sažetak	I
Kratice	II
1. Uvod	1
1.1. Radar i radarska jednadžba	1
1.2. Z-R relacija	3
1.3. Nepouzdanosti pri mjerenju i procjenjivanju oborine	4
1.3.1. Atenuacija	5
1.3.2. Atmosferska refrakcija	6
1.3.3. Pojas pojačane reflektivnosti	7
1.3.4. Razdioba kapljica	7
1.3.5. Refleksija od nemeteoroloških meta	8
1.3.6. Fizikalne karakteristike radarske zrake	9
1.4. Računanje oborine pomoću radara, metode definiranja Z-R relacija	9
1.5. Utjecaj vjetrova na horizontalni pomak kapljica	10
2. Podatci i metode	12
2.1. Kišomjerne postaje	12
2.2. Radarski podatci	13
2.3. Rješavanje problema nepouzdanosti	14
2.4. Prilagodba podataka	15
2.5. Postupak obrade	15
2.5.1. Metoda određivanja koeficijenata a i b	16
2.6. Metoda korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljica	17
3. Rezultati	19
3.1. Verifikacija Marshall-Palmerove relacije i usporedba s novom relacijom	20
3.2. Analiza po gradovima	25
3.3. Primjena metode korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljica	28
3.4. Verifikacija na nezavisnom skupu podataka	30
3.4.1. Cijeli niz	30
3.4.2. Analiza po gradovima	33
3.4.3. Metode korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljica na postaji Zagreb Grič	33

4. Diskusija	35
4.1. Računanje Z-R relacije pomoću višesatnih vrijednosti	35
4.2. Računanje Z-R relacije bez određenog dijela podataka	35
4.3 Indikativna metoda za procjenjivanje evaporacije	35
4.4. Metoda korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljica	36
4.5. Metoda dobivanja relacije za konvektivne procese	36
4.6. Alternativne metode za dobivanje radarskih podataka	37
5. Zaključak	38
6. Literatura	40
7. Prilog A	42

Sažetak

Dobro poznavanje i praćenje oborine od velike je važnosti ne samo u znanstvenim i stručnim krugovima već i u drugim granama ljudskog djelovanja koje koriste meteorološke informacije. Kako je oborina varijabilna na svim prostornim i vremenskim skalama, nužno je koristiti alate koji osiguravaju dobru prostornu i vremensku razlučivost te pojave. U tu svrhu, primjena daljinskih mjerenja (radara) nezaobilazna je metoda proučavanja oborine jer jedina može dati zadovoljavajuću prostornu i vremensku razlučivost. No da bi ta mjerenja bila vjerodostojna potrebno je uzeti u obzir cijeli niz faktora koji se nameću kao poteškoća u mjerenju oborine pošto radar mjeri vrlo slab reflektirani elektromagnetski signal te ga pomoću Z-R relacije pretvara u oborinu.

U ovom radu napravljeni su prvi koraci u smjeru kvalitetnijeg opisivanja radarskih procjena oborine na području Hrvatske za ljetni period (lipanj-rujan). Dobivena je nova Z-R relacija za procjenjivanje oborine: $Z = 57R^{2.13}$ koja je smanjila ukupna odstupanja sa -36% podcjenjivanja na svega 7% precjenjivanja. Pokazano je da postoji prostorna varijabilnost Z-R relacije te da nije svejedno s kojim se utjecajnim područjem na radarskoj slici predstavlja postaja. Konkretno, pokazano je da su postaje bliže radaru bolje opisane s manjim utjecajnim područjem dok su udaljenije postaje bolje opisane s većim utjecajnim područjem. Kroz rad su se kao glavni uzroci nepouzdanosti pokazali: razdioba kapljica, radarsko “razmazivanje” podataka zbog širenja radarske zrake i horizontalni pomak kapljice zbog prisutstva jačeg horizontalnog vjetera.

Kao iskorak u znanstvenom smislu, u ovom je radu razvijena i nova metoda korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljice. Proučavanjem vjetera na tri vertikalna nivoa dobivena iz radiosondažnih podataka, dobivene su informacije o srednjem vjetru unutar sloja između dva nivoa. Time se dalje izračunao horizontalni pomak kapljice i ta korekcija uvrštena je u sustav radarskih procjena. Tako korigirani podatci dali su bolje rezultate u odnosu na nekorrigirane vrijednosti odnosno vidljivo je dodatno poboljšanje na promatranim parametrima za oko 10 %.

Kratice

EM - elektromagnetski

RADAR - eng. RADio Detecting And Ranging

BB - eng. bright banda

DSD - eng. drop size distribution

NWS - eng. National Weather Service

RC - radarski centar

DHMZ - Državni hidrometeorološki zavod

IRIS - eng. Interactive Radar Information System

UTC - eng. Universal Time Code

1. Uvod

Oborina je jedan od najvažnijih parametara u meteorologiji, a ujedno i jedan od najnepredvidljivijih. Mogućnost dobrog poznavanja i predviđanja ove pojave od velike je važnosti ne samo u znanstvenim i stručnim krugovima (dinamika atmosfere, klimatologija, vremenske prognoze, sustavi upozorenja), već i u drugim granama ljudskog djelovanja koje koriste meteorološke informacije (poljoprivreda, gospodarstvo, promet, turizam, ekonomija...).

Glavna karakteristika oborine je jaka prostorna i vremenska varijabilnost na puno skala što u konačnici uzrokuje velike nepouzdanosti u prognozi. Osnovni izvori podataka o oborini su prizemna mjerenja na kišomjernim postajama (disdrometri, pluviografi, nifografi, ombrometri, totalizatori) koja su prostorno još uvijek prerijetka što također doprinosi ukupnoj nepouzdanosti, posebice prilikom konvektivnih procesa. Gušća pak mjerenja najčešće nisu moguća zbog financijskih razloga (npr. Borga, 2002.) pa se time nameće potreba za alternativnim metodama mjerenja.

Daljinska mjerenja “*Long range sensing*” (npr. radari) u zadnjih 50-ak godina poprimaju sve širu i važniju ulogu u promatranju fenomena u prirodi te se puno pažnje pridodaje njihovom razvoju (npr. Rinehart, 2004.). Njihova glavna odlika je visoka prostorna i vremenska rezolucija što je poželjan alat za promatranje vrlo promjenjivih prostornih i vremenskih polja (oborina, vlažnost, naoblaka, vjetar, turbulencija...).

Iako na području Hrvatske postoji nekoliko radarskih centara, njihova primjena u znanstvene i istraživačke svrhe gotovo je zanemariva. Razlog su velike nepouzdanosti u procjenama željenih veličina kao što su oborina, vlažnost, vjetar i dr. Cilj ovog rada je identificirati i ukloniti glavne uzroke nepouzdanosti vezane uz oborinu čime se otvaraju vrata ka boljem poznavanju i razumijevanju spomenutog fenomena.

1.1. Radar i radarska jednadžba

Radar se sastoji od četiri osnovna dijela. To uključuje odašiljač koji proizvodi elektromagnetske (EM) valove, antenu koja te valove emitira u određenom smjeru u atmosferu te natrag prima jako oslabljene reflektirane valove, prijemnik koji detektira i pojačava povratni signal te prikladan tip zaslona pomoću kojeg se prikazuje primljeni signal P_r . Taj signal računa se pomoću radarske jednadžbe (npr. Rinehart, 2004.):

$$P_r = \frac{\pi^3 p_t g^2 \theta \varphi c t (K)^2 l z}{1024 \ln(2) \lambda^2 r^2} \quad (1)$$

pri čemu je :

- p_t - snaga emitiranog signala
- g - dobitak antene (*gain*)
- θ, φ - horizontalna i vertikalna kutna širina zrake
- c - brzina svjetlosti
- t - trajanje pulsa
- $(K)^2$ - parametar povezan s kompleksnim indeksom refrakcije promatranog materijala
- l - atenuacija signala
- z - faktor reflektivnosti
- r - udaljenost od radara
- λ - valna duljina

Za meteorološke radare faktor reflektivnosti (u nastavku reflektivnost) ovisi o količini i dimenziji meta (kapljice i ledeni kristali) u promatranom volumenu te se definira relacijom:

$$z = \sum N_i D_i^6 \quad (2)$$

pri čemu je N_i količina meta promjera D_i . Iz ovoga je jasno vidljivo da će veće mete puno više doprinositi reflektivnosti. Kako su u stvarnosti poznate sve varijable osim reflektivnosti z , jdb. (1) možemo preurediti na sljedeći način:

$$z = C_1 P_r r^2 \quad (3)$$

pri čemu je z u $[mm^6/m^3]$, P_r u $[mW]$, r u $[km]$ i C_1 radarska konstanta koja sadrži sve ostale varijable iz jdb. (1), a izražena je u $[mm^6/(m^3 mW km^2)]$ (npr. Rinehart, 2004.). Budući da vrijednost z varira od jako malih vrijednosti $10^{-3} [mm^6/m^3]$ pa sve do $10^7 [mm^6/m^3]$, prikladno ju je promatrati u logaritamskoj skali čime se definira logaritamska reflektivnost Z u $[dBZ]$:

$$Z = 10 \log_{10} \left(\frac{z}{1 \text{ mm}^6 / \text{m}^3} \right) \quad (4)$$

Oznaka dBZ je bezdimenzionalna veličina koja predstavlja logaritamski omjer snage u decibelima (dB) u odnosu na radarsku reflektivnost z . Tako definirana reflektivnost može poprimiti vrijednosti od -32 dBZ do 96 dBZ pri čemu se oborinom smatraju vrijednosti od 0 do oko 55 dBZ za snijeg i kišu te oko 55 dBZ na više za tuču (npr. Frugis i Wasula, 2011.).

1.2. Z-R relacija

Kao što je pokazano u jednadžbi (2), radarska reflektivnost ovisi o promjeru kapljica na šestu potenciju i brojnosti pojedinih promjera. Jednadžba (2) prevedena je u integralni oblik opisan izrazom:

$$z = \int N(D) D^6 dD \quad (5)$$

Računanjem integrala po svim promjerima u promatranom volumenu dolazimo do informacije o radarskoj reflektivnosti u tom volumenu. Intenzitet oborine može se definirati kao:

$$R = \frac{\pi}{6} \int N(D) D^3 V_t(D) dD \quad (6)$$

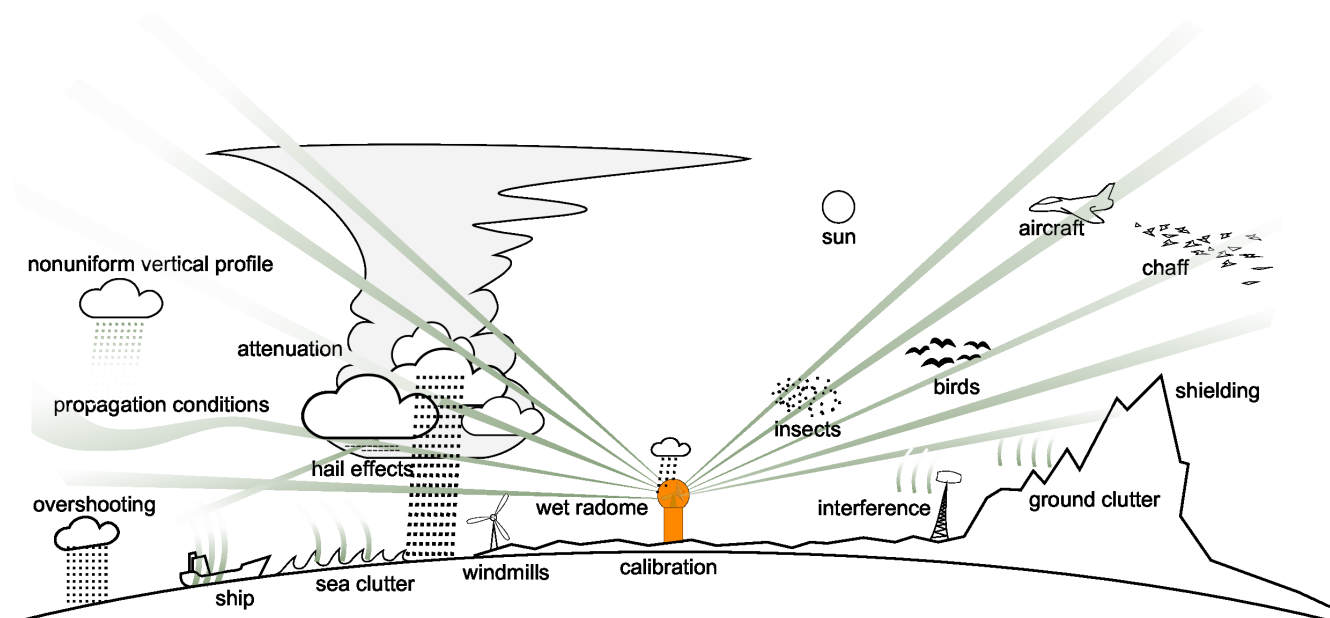
pri čemu je D također promjer kapljice, $N(D)$ brojnost pojedinih kapljica, a $V_t(D)$ terminalna brzina pojedine kapljice. Računanjem integrala po svim promjerima s pripadnim terminalnim brzinama u promatranom volumenu dolazimo do informacije o intenzitetu oborine u tom volumenu. Korištenjem izraza (5) i (6) te uvrštavanjem Marshall-Palmerove eksponencijalne distribucije kapljica $N(D) = N_0 e^{-\lambda D}$ (Marshall i Palmer, 1948.) i terminalne brzine padanja kapljica $V_t(D) = 1400 D^{1/2}$ (Spilhaus, 1948.), moguće je izvesti empirijsku Z-R relaciju koja povezuje reflektivnost i intenzitet oborine:

$$z = a R^b \quad (7)$$

gdje je $R[mm/h]$ intenzitet oborine, a a i b empirijski koeficijenti (Wilson i Brandes, 1979.). Vrijednosti tih koeficijenata mogu se kretati u velikom rasponu, $a \in [0,500]$ i $b \in [1,2]$ (Shelton, 2009). Danas postoji cijeli niz različitih Z-R relacija, a svaka je povezana s određenim tipom oborine, područjem, sezonom i sl. Prilikom određivanja koeficijenata a i b , prizemna mjerenja uzimaju se kao točna tj. referentna vrijednost, odnosno prilikom usporedbe prizemnih mjerenja i radarskih procjena zahtijeva se da radarske vrijednosti što bolje opisuju prizemne vrijednosti oborine. Idealno, ukoliko se radarske procjene u potpunosti poklapaju sa svim prizemnim mjerenjima, može se s velikom sigurnošću tvrditi da i sve ostale točke unutar radarskog područja pokazuju stvarnu vrijednost oborine. No takve je uvjete nemoguće postići. Radar ne mjeri oborinu, već ju procjenjuje temeljem izmjerene reflektivnosti koja dolazi iz oblaka na nekoj visini. Radar uzorkuje promatrani volumen u jednoj ms te se na isti volumen vrati za 5 do 15 min ovisno o postavkama radara. Također, prisutan je i vremenski odmak između radarske procjene i prizemnog mjerenja pošto kapljice trebaju prijeći određeni put da padnu na tlo. Postoji još cijeli niz faktora koji utječu na odstupanja radarskih procjena i prizemnih mjerenja. Glavni faktori izloženi su u nastavku teksta.

1.3. Nepouzdanosti pri mjerenju i procjenjivanju oborine

Prilikom razmatranja spomenutog odstupanja treba imati na umu da i sama kišomjerna postaja zbog svojih tehničkih izvedbi (širina zjala, debljina stijenki, nagib terena i smjer vjetra) u sustav mjerenja unosi pogrešku. Posebno, ako je pri velikom intenzitetu oborine prisutan i jak prizemni horizontalni vjetar, pogreška mjerenja može prijeći i 40% (Wilson i Brandes, 1979.). Nadalje, postaja pokriva jako malu površinu u odnosu na područje koje predstavlja te se prilikom lokalnih konvektivnih procesa može dogoditi da se oborina uopće ne zabilježi. S druge strane, postoji cijeli niz faktora koji direktno utječu na povratni signal tj. reflektivnost z te uzrokuju nepouzdanosti (sl. 1). Neki od njih su: atenuacija signala, atmosferska refrakcija, pojas pojačane reflektivnosti, distribucija kapljica, refleksija od nemeteoroloških meta (npr. Hunter, 1999.; Rinehart, 2004.; Lee i Zawadzki, 2004.; Holleman, 2006). Također, zbog fizikalnih karakteristika same radarske zrake u procesu obrade signala može doći do velikih pogrešaka u radarskim procjenama.



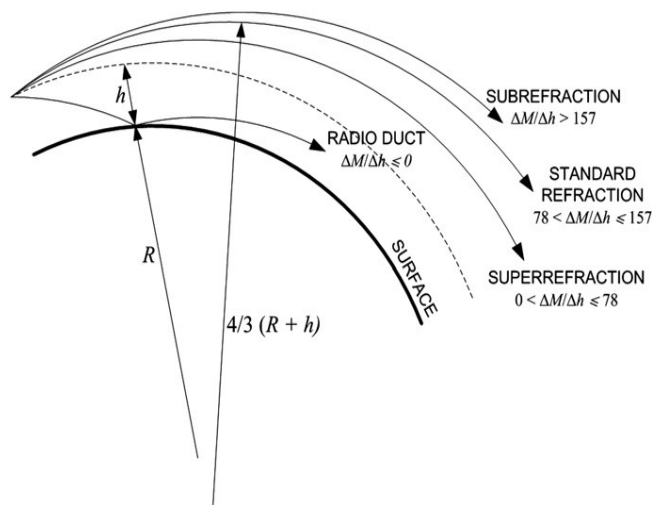
Slika 1. Shematski prikaz glavnih uzroka nepouzdanosti koji utječu na kvalitetu radarskih podataka (Holleman, 2006.).

1.3.1. Atenuacija

Prolazak elektromagnetskih valova kroz sredstvo za posljedicu ima prigušenje za faktor uvjetovan sredstvom. Prolaskom kroz čistu atmosferu atenuacija za meteorološke radare iznosi oko 0.01 dB/km , što je na udaljenosti od 100 km oko 1 dB . Dio vala se reflektira te promatrana zraka prelazi dvostruki put i time se atenuacija povećava na 2 dB . Prolaskom kroz oblake atenuacija postaje varijabilna. Ona ovisi o sastavu i dimenzijama oblaka kao i o valnoj duljini EM vala. Ukoliko je riječ o ledenim oblacima, atenuacija je gotovo zanemariva (oko 0.2 dB/100km za $\lambda = 3.2 \text{ cm}$). No pri vodenim oblacima može doseći i do 4.8 dB/100km za $\lambda = 3.2 \text{ cm}$ (npr. Rinehart, 2004.). Ako pak oblak sadrži oborinske elemente, za očekivati je da će i atenuacija porasti, s time da se atenuacija od snijega može zanemariti (do 2 dB/100km za male valne duljine). U jakim konvektivnim sustavima popraćenim kišom i/ili tučom atenuacija može biti dovoljno velika da u potpunosti priguši signal u tom volumnom smjeru, čime se gubi informacija o procesima iza tih sustava.

1.3.2. Atmosferska refrakcija

Kako se gustoća zraka (funkcija temperature, vlažnosti i tlaka) mijenja visinom, tako se mijenjaju i optička svojstva zraka (Snellov zakon). Drugim riječima, EM val koji putuje od antene do mete neće putovati po pravcu. Ova pojava posebno je izražena u donjoj trećini troposfere. U normalnim uvjetima zakrivljenost zrake bit će nešto veća od zakrivljenosti Zemlje, što nazivamo standardna refrakcija. Ako je gradijent gustoće veći od normalnog, doći će do subrefrakcije tj. zakrivljenost zrake će se dodatno smanjiti. Smanjenjem gradijenta gustoće pojavljuje se superrefrakcija. U slučaju negativnog gradijenta, zakrivljenost zrake bit će veća od zakrivljenosti Zemljine površine te se može dogoditi da zraka pogodi tlo. To nazivamo radio kanalima (eng. *radio duct*). Grafički prikaz navedenih tipova refrakcije dan je korištenjem vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma $\Delta M / \Delta h$ na slici 2. Modificirani indeks loma M predstavlja samo značajne znamenke običnog indeksa loma N na nekoj visini (npr. Horvat, 2013.). Osim u slučaju radio kanala, nemoguće je ustanoviti točnu putanju zrake jer bismo morali imati minutne informacije o gore navedenim parametrima u svakoj točki prostora unutar radarskog područja (npr. Hunter, 1999.; Rinehart, 2004.; Holleman, 2006.; Viher i sur., 2013.).



Slika 2. Shematski prikaz četiri osnovna tipa refrakcije (subrefrakcija, standardna refrakcija, superrefrakcija i radio kanal) kao funkcija vertikalnog gradijenta modificiranog indeksa loma pri čemu je R radijus Zemlje, h visina izvora elektromagnetskih valova, a M modificirani indeks loma (Viher i sur., 2013.).

1.3.3. Pojas pojačane reflektivnosti

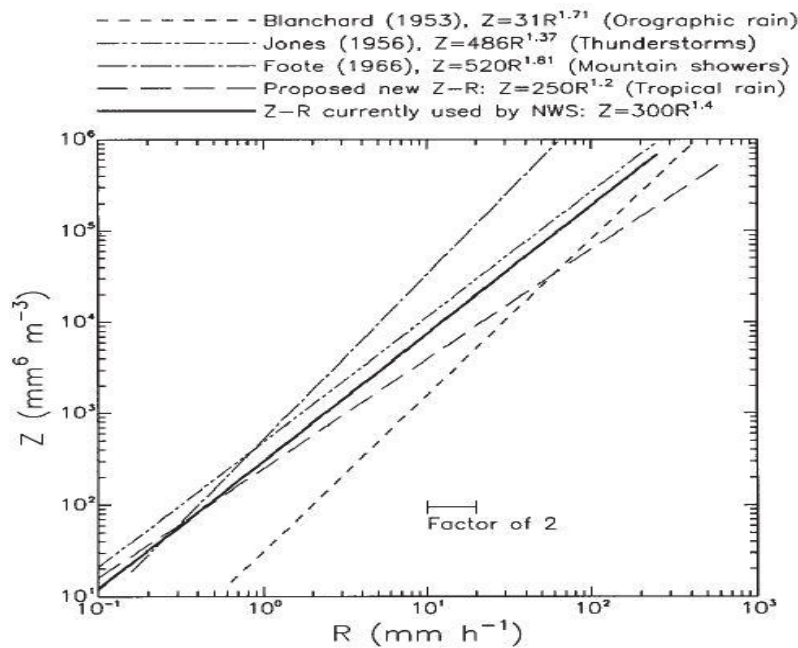
Pojas pojačane reflektivnosti (eng. *bright band*) javlja se u području gdje kristali leda prelaze u kapljice vode (eng. *melting layer*). Kako se kristal leda počinje topiti izvana prema unutra, tako se isprva oko njega stvara tanki film vode čineći prividno veliku kapljicu. Pošto voda puno bolje reflektira EM valove, u takvom se sloju javlja pojačana reflektivnost. Širina tog sloja ovisi o vertikalnom temperaturnom profilu, a počinje prolaskom snijega kroz nultu izotermu (npr. Hunter, 1999.; Rinehart, 2004.; Holleman, 2006.). Najčešće je vezan uz stratiformnu naoblaku jer nema naglašenog vertikalnog strujanja koje bi moglo narušiti gradijente. Visina *bright banda* (BB) na području Zagreba za razdoblje (1980-2011.) kreće se od maksimalnih 3971 m u kolovozu do 0 m tokom zimskog razdoblja, a detaljnija analiza dana je u prilogu A.

1.3.4. Razdioba kapljica (eng. *drop size distribution*)

Prilikom stvaranja oborinskih elemenata važnu ulogu imaju tri procesa: kondenzacija, difuzija i koalescencija. Svaki od procesa dominantno je odgovoran za određenu fazu razvoja kapljice, no prisutan je i u ostalim fazama razvoja (npr. Ćurić, 2001.). Upravo iz tog razloga svakim nastajanjem oborinskih elemenata nastaje i nova razdioba kapljica. Štoviše, kada kapljica dosegne kritični radijus, počinje padati i napušta promatrani volumen zraka te se spomenuta razdioba mijenja. Lee i Zawadzki su 2004. godine pokazali da se razdioba kapljica, tj. *drop size distribution* (u nastavku DSD), mijenja na svim vremenskim skalama unutar pet godina. Treba dodati da se prilikom prolaska kapi kroz atmosferu odvija i proces evaporacije zbog čega se razdioba izmjerena na postaji dodatno razlikuje od one snimljene radarom iznad šireg područja postaje. Kako je već istaknuto, za radarsku reflektivnost vrijedi $z \sim D^6$ pa veće kapi puno jače doprinose reflektivnosti. Drugim riječima, različite DSD mogu rezultirati istom reflektivnosti, što će se u konačnici manifestirati kao nasumično odstupanje od prizemnih mjerenja (Lee i Zawadzki, 2004.).

Postoji nekoliko različitih mehanizama zbog kojih može doći do stvaranja oborine. Dobrim poznavanjem, odnosno prepoznavanjem tih mehanizama, moguće je smanjiti odstupanje između radarskih procjena i prizemnih mjerenja oborine definiranjem Z-R relacija karakterističnih za pojedini mehanizam. Na slici 3 prikazane su Z-R relacije za opisivanje nekih tipičnih mehanizama nastajanja

oborine. Jasno je vidljivo da za istu reflektivnost možemo imati potpuno različite vrijednosti oborine te da se različito definirane relacije mogu preklapati za određene iznose reflektivnosti.



Slika 3. Z-R relacije za opisivanje tipičnih mehanizama nastajanja oborine. Puna linija predstavlja trenutno korištenu relaciju u NWS (*National Weather Service*), (---) predstavlja oborinu zbog utjecaja orografije, (-.-.-) predstavlja oborinu olujnih procesa, (-.-.-) predstavlja oborinu nastalu strujanjem preko planine, (_ _ _) predstavlja oborinu u tropskim predjelima (Ulbrich i Lee, 1999.).

1.3.5. Refleksija od nemeteoroloških meta

Refleksije od nemeteoroloških meta mogu biti uzrokovane prašinom, kukcima, pticama i avionima ili statičnim metama kao što su šume, visoke zgrade, planine i dr. Statične mete ne predstavljaju poteškoće pošto se lako prepoznaju na radarskoj slici pa se čak i koriste za preliminarnu kontrolu radara (npr. Hunter, 1999.; Rinehart, 2004.; Holleman, 2006.).

1.3.6. Fizikalne karakteristike radarske zrake

U radarskoj jednadžbi (1) pokazano je da reflektivnost ovisi i o širini radarske zrake. Također, radijus područja obuhvaćenog radarom je oko 240 km. Uzmemo li u obzir da je širina radarske zrake 2° , na udaljenosti od 50 km širina te zrake iznosi 1746 m, a na udaljenosti od 100 km širina je dvostruko veća, odnosno 3492 m, što u konačnici uvjetuje rezoluciju radara. Stoga, procesi koji su relativno mali te udaljeniji od radara, krivo se interpretiraju. Pretpostavimo da radar neovisno promatra dvije identične oluje na različitim udaljenostima (sl. 4). Obje oluje obuhvaćene su samo jednom radarskom zrakom. Zbog širine zrake, povratni signal od oluje 1 bit će veći od povratnog signala oluje 2. Dodatno, zbog gubitka rezolucije u sustavu obrade informacija oluja 2 bit će razvučena po cijeloj širini zrake i time dodatno utjecati na krivu interpretaciju; npr. mali olujni oblak popraćen jakim pljuskom interpretirat će se kao oblak širine radarske zrake sa slabom oborinom.



Slika 4. Ilustracija dvije identične oluje na različitim udaljenostima obuhvaćene jednom radarskom zrakom.

(slika preuzeta s: http://forecast.weather.gov/jetstream/doppler/beam_max.htm)

1.4. Metode definiranja Z-R relacija

Z-R relacija se može dobiti na nekoliko načina. Prvi je usporedbom prizemnih mjerenja i radarske reflektivnosti (npr. Hunter, 1999.; Rinehart, 2004.). Drugi način je korištenje disdrometarskih podataka. Distrometar je uređaj koji osim ukupne količine oborine u nekom vremenu mjeri i pripadnu raspodjelu kapljica. Pomoću tih količina i raspodjele definira se reflektivnost koja se dalje koristi za kalibraciju radara (npr. Rinehart, 2004.; Alfieri i sur., 2010.). Treći način definiranja Z-R relacije ide uz korištenje kumulativnih funkcija razdiobe (Atlas i sur., 1990.; Mushore, 2012.).

Zbog svoje jednostavnosti, usporedba prizemnih mjerenja i reflektivnosti je najrasprostranjenija metoda. Iako se fiksne Z-R relacije nisu pokazale kao dobro rješenje za praćenje trenutnih i satnih

vrijednosti, višesatne sume i ukupne količine oborine u zadovoljavajućoj se mjeri mogu slagati s prizemnim mjerenjima. Nadalje, korištenje disdrometra za računanje Z-R relacije nije se pokazalo kao obećavajuća metoda zbog velike prostorne i vremenske varijabilnosti DSD (Wilson i Brandes, 1979.), no uvođenje kontinuirane kalibracije reflektivnosti u zadnje je vrijeme privuklo dosta pozornosti. Na malim udaljenostima od radara (do 25 km) postavi se sustav disdrometara koji radio vezom kontinuirano šalju podatke radaru. Podatci prikupljeni u nekom kratkom vremenskom intervalu (do 5h) koriste se za izračun reflektivnosti i vrši se kalibracija radara za taj vremenski interval (Alfieri i sur., 2010.). Metoda ekonomski nije najprihvatljivija pošto je za takvu kalibraciju potrebna mreža disdrometara, a i tada je upitno hoće li glavnina konvektivnih procesa biti detektirana. Korištenje metode s kumulativnom funkcijom razdiobe na kraćim vremenskim skalama nije se pokazalo ništa bolje od Z-R relacije dobivene usporedbom prizemnih mjerenja i radarske reflektivnosti (Mushore, 2012.).

1.5. Utjecaj vjetra na horizontalni pomak kapljica

Prvi koji su identificirali problem horizontalnog utjecaja vjetra na pouzdanost podataka su bili Gunn i Marshall (1955.). Usprkos tomu, jako malo radova uzimalo je u obzir utjecaj vjetra na horizontalni pomak kapljice. Feng (2007.) navodi kako je utjecaj horizontalnog vjetra analiziralo svega par autora te ističe važnost daljnjeg proučavanja ovog fenomena. Taj se efekt uglavnom pokušavao zaobići korištenjem niskih elevacija na malim udaljenostima od radara, niskim rezolucijama reflektivnosti i korištenjem većeg utjecajnog područja, npr. radijus od 3 ili više km oko promatrane postaje. Uzme li se u obzir da je terminalna brzina kapljice oko 1–10 m/s (Foote i Du Toit, 1969.), srednja visina pulsa koji ih je detektirao 700 m, kapljica će padati 70–700 s. Ako je prisutan srednji horizontalni vjetar od 10 m/s, kapljica može prijeći put od 0.7–7 km. Drugim riječima, ono što radar vidi na području iznad postaje, uz prisutnost vjetra neće biti zabilježeno na toj postaji. Ako se ovaj problem pokuša riješiti uzimanjem velikog utjecajnog područja, npr. 9 km, velika je vjerojatnost da će se zbog usrednjavanja izgubiti prava informacija o reflektivnosti (odnosno oborini), posebno u slučaju konvektivnih procesa koji nerijetko imaju prostornu skalu manju od 1 km. U proteklih nekoliko godina počelo se pridavati više pažnje navedenom problemu te su se počele razvijati prikladne statističke i numeričke metode za uvođenje korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljice (npr. Mittermaier, 2004.; Lack i Fox, 2004., 2007.; Feng, 2007.).

U ovom radu korištena je metoda usporedbe radarske reflektivnosti i prizemnih mjerenja. Kako do sada na području Hrvatske nije bilo istraživanja u tom smjeru, bilo je potrebno razviti osnovne metode usporedbe kao temelj za sva daljnja istraživanja. U tu će se svrhu izložiti preliminarna verifikacija radarskih procjena i prizemnih mjerenja oborine za do sada korištenu Marshall-Palmerovu Z-R relaciju. Predložit će se nove Z-R relacije dobivene metodom usporedbe radarske reflektivnosti i prizemnih mjerenja, razviti metoda korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljice te svi dobiveni rezultati verificirati na nezavisnom skupu podataka. Na taj način ova je radnja doprinos radarskoj meteorologiji u Hrvatskoj, temi koja je desetljećima bila znanstveno i stručno zanemarena, a može biti od koristi za kratkoročnu prognozu vremena, klimatologiju, poljoprivredu, promet, turizam i dr.

2. Podatci i metode

Kako je glavni cilj ovog rada verifikacija radarskih procjena oborine, promatrano je područje središnje Hrvatske, odnosno područje obuhvaćeno radarskim centrom (RC) Bilogora s fokusom na Zagreb, Križevce, Bjelovar, Daruvar, Sisak i Varaždin gdje su smještene automatske meteorološke postaje. Radarski podatci stariji od 7 dana arhiviraju se na CD u neobrađenom obliku (*raw data*), a na jedan CD stane otprilike 5-10 dana neobrađenih podataka. Proces obrade jednog takvog seta trajao bi predugo da se u okviru ovog rada obuhvati duža kontinuirana analiza. Kompromis je napravljen izvlačenjem samo onih dana u kojima je na svim gore navedenim gradovima, ujedno i kišomjernim postajama, zabilježena kontinuirana oborina u trajanju duljem od pola dana čime se htjela osigurati dovoljna količina podataka za obradu. S navedenih postaja od DHMZ-a su preuzeti podatci o oborini (lipanj-rujan) u razdoblju od 2007. - 2012. godine. Pomoću gore navedenih uvjeta izdvojeno je 10 oborinskih epizoda u trajanju od 1 do 4 dana. Nakon toga uzeti su radarski podatci s RC Bilogora. Drugi uvjet je bio neprekidnost radarskih podataka unutar epizoda. Time se eliminirala jedna epizoda.

2.1. Kišomjerne postaje

Kako bi se mogle promatrati satne varijacije oborine, bilo je nužno koristiti automatske postaje, a promatrano se područje moralo nalaziti unutar 100 km oko radara kako bi se izbjegla prevelika elevacija zrake i njeno širenje. Unutar tog područja izabrano je 7 postaja (tab. 2.1).

Tablica 2.1. Geografske karakteristike postaja.

Postaja	Geografske koordinate	Nadmorska visina	Udaljenost od radara
Zagreb-Maksimir	45°49'19"N 16°02'01"E	123 m	91 km
Križevci	46°01'43"N 16°33'17"E	157 m	53 km
Bjelovar	45°54'35"N 16°51'10"E	141 m	27 km
Daruvar	45°35'29"N 17°12'37"E	154 m	31 km
Zagreb Grič	45°58'53"N 15°58'19"E	157 m	96 km
Varaždin	46°16'57"N 16°21'51"E	167 m	78 km
Sisak	45°30'00"N 16°22'00"E	96 m	78 km
RC Bilogora	45°53'01"N 17°12'02"E	262 m	0 km

Sve navedene postaje za sustav praćenja oborine imaju Helmanov pluviograf otvora 200 cm^2 koji kontinuirano mjeri oborinu. Raspodjela epizoda po godinama i mjesecima dana je u tablici 2.2.

Tablica 2.2. Datumi izabranih epizoda.

mjesec godina	lipanj	srpanj	kolovoz	rujan
2007	x	x	x	04. - 07.
2008	06. - 07.	23. - 24.	x	14.
2009	x	x	x	x
2010	01. - 02. ; 20.	x	x	17. - 19.
2011	x	24. - 25.	x	x
2012	x	x	x	13. - 15.

Tablica 2.2. sugerira da se dulje oborinske epizode pojavljuju samo u rujnu, no to nije točno. One su se pojavile i u ostalim mjesecima, ali za njih nije bilo kontinuiranih radarskih podataka. Razlog je prisutnost jakih konvektivnih procesa i opasnosti od tuče pa se radar stavljao u drugi režim rada. Konkretno, riječ je o datumima 05.06.2008., 21.06.2010., 23.07.2011. Isti razlog bio je odbacivanje nekih datuma u rujnu: 11.-13.09.2008.

2.2. Radarski podatci

Za gore navedene datume prikupljeni su sirovi radarski podatci. Za obradu podataka koristila se besplatna verzija programskog paketa *IRIS*. Originalna verzija je izrazito skupa i vezana je uz računalo, što znači da je u ovom slučaju originalni softver smješten na računalo u RC Bilogora. Zbog toga, mnoge praktične funkcije nisu bile dostupne pa se glavni dio obrade podataka radio u programskom paketu *Matlab*. Iz sirovih podataka napravljene su *PPI* (*plan position indicator*) mape logaritamske reflektivnosti Z što je zapravo prikaz reflektivnosti dobiven iz jednog kuta elevacije (u ovom radu 0.5°). Rezolucija mapa je 480×480 piksela što u konačnici rezultira dimenzijama piksela od oko $1 \times 1\text{ km}^2$ (ovisno o geografskoj širini). Kako je širina pulsa EM vala 2° , na udaljenosti od 100 km širina pulsa iznosi 3492 m , čime će puls pokrivati oko tri piksela. Spomenute mape su u biti matrice brojeva dimenzije (480×480) koje se u obliku HDF5 formata mogu spremiti i poslati u neki drugi

programski paket na obradu. Sami brojevi skalirani su od 0 do 255 i predstavljaju reflektivnost na intervalu od -32 dBZ do 96 dBZ s korakom od 0.5 dBZ .

2.3. Rješavanje problema nepouzdanosti

Glavni uzroci koji mogu značajno doprinosti nepouzdanosti između radarskih procjena i prizemnih mjerenja oborine su atenuacija, *bright band* (BB), atmosferska refrakcija, razdioba kapljica i fizikalne karakteristike radarske zrake. U uvodu smo pokazali da je atenuacija uvijek prisutna, a posebno predstavlja poteškoće kad su u pitanju veliki intenziteti oborine ili tuče. Radar koji je korišten u ovom radu (tzv. S-band radar) ima valnu duljinu 10.71 cm , stoga je doprinos atenuaciji jako mali, čak i za najveće oborinske elemente. S druge strane, unutar samog sustava obrade podataka moguće je postaviti koeficijent atenuacije pa se nepouzdanosti nastale zbog atenuacije mogu zanemariti.

Izbor elevacije od 0.5° , ograničenje na radijus od 100 km te promatranje samo ljetnog dijela godine, u dobroj su mjeri osigurali da zraka ne prolazi kroz BB. Naime, kako je pokazano u prilogu A, najmanja srednja visina BB-a za Zagreb (koji je ujedno i najudaljenija točka mjerenja) je u rujnu i iznosi oko 2600 m . Uzmemo li u obzir da je visina zrake pod kutem elevacije od 0.5° na udaljenosti od 100 km oko 1.5 km , širina pulsa 3492 m te da je dubina BB-a oko 500 m ispod nulte izoterme (Smith, 1986.), utjecaj je moguć samo iznad Zagreba u lipnju i rujnu uz uvjet normalne refrakcije. Ako pak dođe do subrefrakcije, taj se utjecaj može dodatno povećati. S druge strane, superrefrakcija eventualno može spustiti puls ispod oblaka, no to neće značajno utjecati na sama mjerenja pošto S-band radar ionako prepoznaje samo oborinske elemente. Radio kanal je iznimno rijedak te relevantan samo kada je zraka relativno blizu podloge (neposredna blizina radara, blizina planine). U uvodu je istaknuto da fizikalne karakteristike radarske zrake na većim udaljenostima dovode do smanjenja rezolucije pa se prostorno manji procesi (posebno konvektivna naoblaka) mogu krivo interpretirati. Iz dosad navedenog možemo zaključiti da će razdioba kapljica i lošija rezolucija na većim udaljenostima biti glavni uzrok nepouzdanosti između radarskih procjena oborine i prizemnih mjerenja.

2.4. Prilagodba podataka

Da bi usporedba radarskih procjena i prizemnih mjerenja bila moguća, potrebno je uskladiti radarske i prizemne podatke. Prizemna mjerenja količine oborine bila su raspoloživa u satnim vrijednostima. Radar je svakih 15 min uzimao novi uzorak, odnosno 4 uzorka su u jednom satu. Da bi se predstavio intenzitet oborine od jednog sata, svaki je uzorak pomoću Z-R relacije pretvoren u oborinu te je uzeta srednja vrijednost uzoraka u tom satu. Nadalje, za svaku prizemnu postaju potrebno je definirati odgovarajući radarski piksel. To je napravljeno pomoću koordinata postaja i radara (tab. 2.1).

U ovom radu promatrana su dva skupa podataka. Jedan s utjecajnim područjem od jednog piksela (oko $1 \times 1 \text{ km}$) i drugi s utjecajnim područjem od 3×3 piksela (oko $3 \times 3 \text{ km}$). Oko svakog dobivenog piksela iz prvog skupa uzet je još jedan red piksela kako bi se dobio drugi skup podataka. Za taj skup od ukupno 9 piksela izračunata je srednja reflektivnost te se ona koristila za predstavljanje pripadne postaje. Osim toga, bilo je potrebno napraviti korekciju u vremenu pošto sve meteorološke postaje kroz cijelu godinu koriste zimsko računanje vremena (UTC+1) dok radar koristi i zimsko i ljetno.

2.5. Postupak obrade

Nakon što su dobivene, HDF5 mape su učitane u programski paket *Matlab* te su iz njih dobivene informacije s unaprijed izračunatim pikselima za pojedinu postaju. Kako bi se radarska procjena i prizemno mjerenje mogli usporediti, nužno je *a priori* odrediti koeficijente Z-R relacije, jdb. (7). Najčešća metoda je linearna regresija. Koristi se radarska reflektivnost i izmjerena oborina te se koeficijenti relacije a i b dobiju kao koeficijenti regresije. Nedostatak linearne regresije je činjenica da rubne i ekstremne vrijednosti mogu znatno utjecati na nagib pravca, stoga je postupak potrebno ponoviti za različite podskupove podataka te nekom prikladnom metodom izabrati najpovoljnije koeficijente za opis ukupnog niza (Fujiyoshi i sur., 1990.). Kako bi se ustanovila najbolja relacija za računanje radarskih procjena oborine, u ovom radu je primijenjen malo drugačiji pristup.

2.5.1. Metoda određivanja koeficijenata a i b

Napravljen je program koji koristi sve moguće kombinacije koeficijenata $a \in [1, 500]$ i $b \in [1, 3]$ s koracima od 1.0 za a i 0.01 za b . Za svaku iteraciju izračunati su korijen srednje kvadratne pogreške ($RMSE$), srednja apsolutna pogreška (MAE), ukupno odstupanje odnosno, pristranost nizova ($BIAS$):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (R_{p_i} - R_{r_i})^2} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |R_{p_i} - R_{r_i}| \quad (9)$$

$$BIAS = \sum R_{p_i} - \sum R_{r_i} \quad (10)$$

pri čemu je N ukupan broj parova podataka, a R_{p_i} i R_{r_i} i -ti par prizemnog mjerenja i radarske procjene oborine u nizu. Kako bi se izabrali najbolji koeficijenti za Z-R relaciju, svaki se od parametara spremao u zasebnu matricu te su se nakon iteriranja uzeli koeficijenti koji su dali minimume za svaki od parametara. Za dobivene koeficijente zatim je izračunat koeficijent korelacije pomoću *Matlab* funkcije $corrcoef(R_p, R_r)$. Koeficijenti a i b koji su dali najmanji $BIAS$ istovremeno su dali jako loš koeficijent korelacije i velike vrijednosti $RMSE$ i MAE . Daljnjom usporedbom ustanovljeno je da $RMSE$ daje nešto bolje koeficijente za opisivanje radarskih procjena oborine od MAE . Stoga je u ovom radu $RMSE$ najbolji izbor za određivanje koeficijenata a i b . Nakon što je dobiven vremenski niz radarskih procjena oborine, napravljen je rezidualni niz kao razlika između radarskog niza i niza prizemnih mjerenja. Za promatranje tog reziduala korištene su amplituda, srednja vrijednost i standardna devijacija reziduala. Također, prilikom razmatranja višesatnih suma uveden je faktor odnosa između radarskih procjena i prizemnih mjerenja kao zamjena za postotak odstupanja. Faktor odnosa se računao za (u apsolutnom smislu) najveću amplitudu pripadnog niza, a definiran je kao:

$$faktor = \frac{(R_r - R_p)}{(R_r + R_p)} \quad (11)$$

Ovaj faktor može poprimati vrijednosti iz intervala $[-1, 1]$. Ako je pozitivan, riječ je o precjenjivanju mjerene vrijednosti, a ako je negativan, radi se o podcjenjivanju mjerene vrijednosti. Na primjer,

precjenjivanje mjerenog podatka od 100% ($R_r=10\text{mm/h}$, $R_p=20\text{mm/h}$) rezultirat će faktorom odnosa od 0.3, dok će podcjenjivanje od 50% ($R_r=20\text{mm/h}$, $R_p=10\text{mm/h}$) dati faktor odnosa -0.3 . Što je faktor odnosa bliži nuli, to je maksimalno odstupanje manje.

2.6. Metoda korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljica

Da bi došlo do oborinskih procesa, gotovo uvijek je potreban neki oblik advekcije, posebice konvergencije zraka. Drugim riječima, u gotovo svim oborinskim procesima prisutan je vjetar. U uvodu je jasno pokazano da se utjecaj vjetra na horizontalni pomak kapljice ne bi smio zanemarivati jer pogreške mogu biti značajne. U ovom poglavlju izložit će se novi model za rješavanje navedene poteškoće.

U osnovi, ideja metode je: u promatranom vremenskom intervalu izračunati srednji vjetar u nekom sloju, procijeniti srednju vertikalnu brzinu kapljica u tom sloju te izračunati horizontalni pomak kapljice. Zatim u istom vremenskom intervalu taj pomak uvažiti prilikom lociranja piksela koji predstavlja promatranu postaju na radarskoj slici.

U ovom radu metoda će se primijeniti na postaju Zagreb-Maksimir. Podatci o vjetru dobiveni su iz radiosondažnog mjerenja s iste postaje. Iako je lako vidljivo da tako skupljeni podatci nisu najreprezentativniji za stanje vjetra u atmosferi jer je informacija dostupna svakih 12 h, oni su jedini bili raspoloživi. Dodatno, kako bi se definirao donekle dobar vektor srednje brzine, bilo je potrebno definirati dva sloja. Za tu svrhu iskorištene su dvije standardne plohe (850 hPa, 925 hPa) i prvi značajni nivo. Debljina slojeva između tih ploha bila je $700\text{ m} \pm 100\text{ m}$. Za svaki sloj se izračunala srednja brzina i pomak te na kraju dobio ukupni pomak kapljice za pripadnu točku. Kako bi se donekle poboljšala informacija o vjetru, između susjednih 12-satnih točaka uzeta je srednja vrijednost ukupnog pomaka kapljice u tim točkama. Time su prividno dobivene 6-satne vrijednosti vjetra. Kako bi se korekcije na vjetar mogle uvrstiti u sustav lociranja postaja, definiralo se utjecajno područje od $\pm 3\text{h}$ oko svake točke mjerenja. Svi radarski podatci koji su ušli u pripadno utjecajno područje bili su korigirani pomakom koji je dobiven iz pripadne točke mjerenja. Treba napomenuti da se za svaku novodobivenu koordinatu postaje definiralo utjecajno područje od 3×3 piksela oko te koordinate kako bi se umanjile pogreške nastale raznim nepouzdanostima (interpolacija u vremenu, varijacija u širini ploha, pogreške zaokruživanja...).

Pošto metoda ovisi o unaprijed definiranoj brzini kapljica, napravljen je niz iteracija kojima se ispitalo koja srednja brzina kapljice daje najbolje slaganje s prizemnim mjerenjima. Postupak je proveden za sve epizode pa je svaka epizoda predstavljena s vlastitim vremenom padanja kapljice kroz sloj. Nadalje, grafičkim i kvantitativnim proučavanjem *RMSE* parametra, koji je korišten kao indikator za najbolji izbor vremena, ustanovila se srednja brzina padanja kapljice.

3. Rezultati

Glavni ciljevi ovog rada su verifikacija radarskih procjena oborine i prizemnih mjerenja te razvoj metode korekcije horizontalnog pomaka kapljice. U tu svrhu napravljena je detaljna analiza dva skupa podataka. Oba skupa predstavljaju isti prostorni i vremenski niz, a razlikuju se po širini utjecajnog područja (1 i 9 piksela). Kao posljedica toga, u ovom se radu pojavljuje veći broj Z-R relacija i podskupova podataka. Radi jednostavnosti, u tablici 3.1 navedene su kratice koje će u nastavku biti korištene za predstavljanje skupa podataka iz kojeg je izvedena Z-R relacija. Ukoliko nije drukčije navedeno, kratica istovremeno predstavlja promatrani skup i pripadnu Z-R relaciju. Općenito, broj 1 predstavlja skup podataka dobiven korištenjem utjecajnog područja od 1 piksela. Broj 9 predstavlja skup podataka dobiven korištenjem utjecajnog područja od 3×3 piksela.

Tablica 3.1. Kratice korištenih Z-R relacija s kratkim opisom.

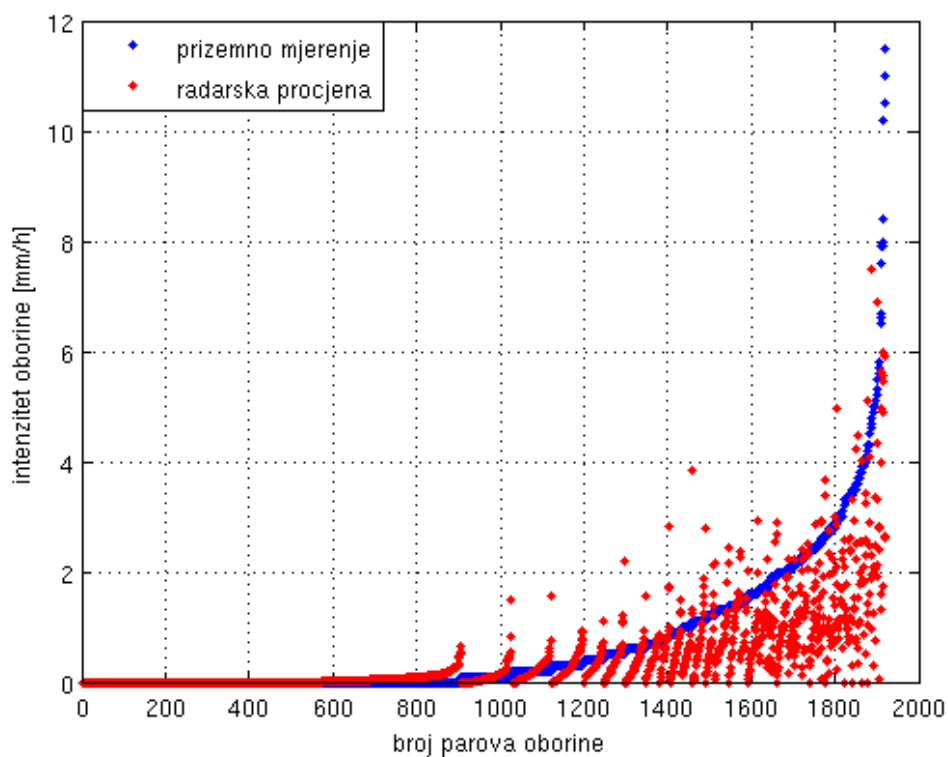
Kratice	Relacija	Opis
MPR1		Marshall-Palmerova relacija na skupu s utjecajnim područjem od 1 piksel
MPR9		Marshall-Palmerova relacija na skupu s utjecajnim područjem od 9 piksela
NR1		Nova relacija, utjecajno područje 1 piksel; sve postaje
NR9		Nova relacija, utjecajno područje 3 x 3 piksela; sve postaje
ZG1		Zagreb-Maksimir, utjecajno područje 1 piksel
ZG9		Zagreb-Maksimir, utjecajno područje 3 x 3 piksela
KZ1		Križevci, utjecajno područje 1 piksel
KZ9		Križevci, utjecajno područje 3 x 3 piksela
BJ1		Bjelovar, utjecajno područje 1 piksel
BJ9		Bjelovar, utjecajno područje 3 x 3 piksela
DR1		Daruvar, utjecajno područje 1 piksel
DR9		Daruvar, utjecajno područje 3 x 3 piksela
ZGW OR		Zagreb-Maksimir, korigirani podatci, izvorno vrijeme padanja kapljice
ZGW 150		Zagreb-Maksimir, korigirani podatci, srednje vrijeme padanja kapljice

3.1. Verifikacija Marshall-Palmerove relacije i usporedba s novom relacijom

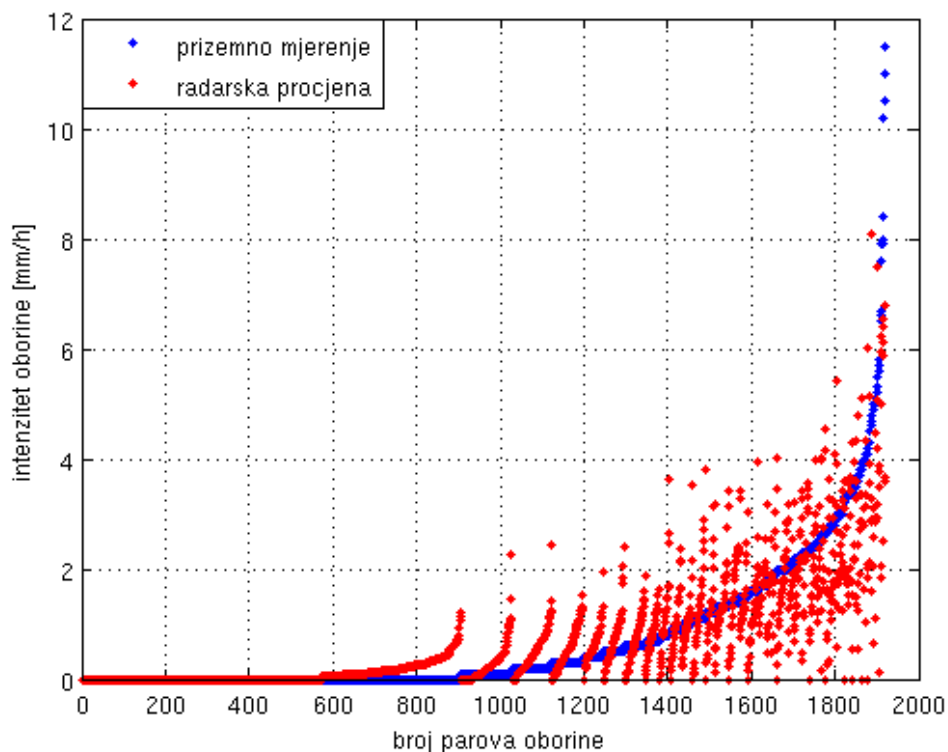
Analizirani su podatci s postaja Zagreb-Maksimir, Križevci, Bjelovar i Daruvar. Ukupna količina oborine zabilježena za vrijeme trajanja navedenih epizoda iznosi 1363 mm. Za iste epizode napravljena je radarska procjena uz korištenje Marshall-Palmerove Z-R relacije. Prethodno opisanom metodom za spomenute skupove dobivene su nove Z-R relacije, NR1 i NR9. Korištenjem utjecajnog područja od jednog piksela dobivena je relacija NR1, a korištenjem utjecajnog područja od 3×3 piksela dobivena je relacija NR9. Svi izračunati statistički parametri navedeni su u tablici 3.2. Kako u ovom dijelu rada nije bitan redoslijed događaja, već samo egzistencija parova prizemnog mjerenja i radarske procjene, te zbog jasnoće prikaza, podatci s navedenih postaja stavljeni su u bezvremenski niz. Također, sortirani su od najmanje do najveće vrijednosti prizemne oborine s pripadnom radarskom procjenom (sl. 5 i 6). Na slici 5 predstavljena je usporedba prizemnih mjerenja i radarskih procjena oborine korištenjem MPR1 uz utjecajno područje od jednog piksela. Grafičkom analizom vidljivo je da nakon intenziteta od 0.5 mm/h radarska procjena počinje značajno podcjenjivati prizemna mjerenja. Na slici 6 prikazana je ista usporedba uz korištenje NR1. Usporedbom navedenih slika vidi se da je slaganje prizemnih mjerenja i radarskih procjena bolje opisano relacijom NR1. Iako i na toj slici postoji podcjenjivanje nakon intenziteta od 3 mm/h, detaljnijom analizom, odnosno promatranjem podskupova podataka (npr. podatci s intenzitetom većim od 2 mm/h) ustanovljeno je da glavni uzrok odstupanja nije distribucija kapljica jer bi se u protivnom našla prikladna Z-R relacija koja bi bolje opisala taj podskup. Mogući uzroci su: neprikladno odabran radarski piksel za procjenu oborine, prigušenje signala zbog gubitka rezolucije, a također opravdana pretpostavka jest da u tom području nema podcjenjivanja, već je prividno podcjenjivanje posljedica malog broja podataka. Parametri prikazani u tablici 3.2 jasno pokazuju da su nove relacije puno uspješnije u opisivanju prizemnih mjerenja. Svi izračunati parametri idu u korist novim relacijama, a ukupna odstupanja smanjena su za jedan red veličine.

Tablica 3.2. Usporedba Marshall-Palmerove Z-R relacije ($Z=200R^{1.60}$) s novodobivenim relacijama na cijelim nizovima podataka. Rp predstavlja prizemno mjerenje oborine, a Rr predstavlja radarsku procjenu oborine.

	RMSE	MEA	koef. korel.	st.dev.	Oborina Rp / Rr	BIAS	$\frac{BIAS}{R_p}$
MPR9	0.98	0.46	0.74	0.90	1363 / 620	-743	-54.5 %
MPR1	0.87	0.40	0.78	0.81	1363 / 780	-583	-42.8 %
NR9	0.81	0.44	0.76	0.81	1363 / 1354	-9	-0.7 %
NR1	0.76	0.38	0.80	0.76	1363 / 1302	-61	-4.5 %



Slika 5. Odnos prizemnih mjerenja i radarske procjene oborine za sve promatrane postaje. Plavom bojom prikazana su prizemna mjerenja, a crvenom bojom pripadni par radarske procjene oborine dobiven korištenjem Marshall-Palmerove Z-R relacije za skup podataka s utjecajnim područjem od 1 piksel. (MPR1, tab. 3.1)



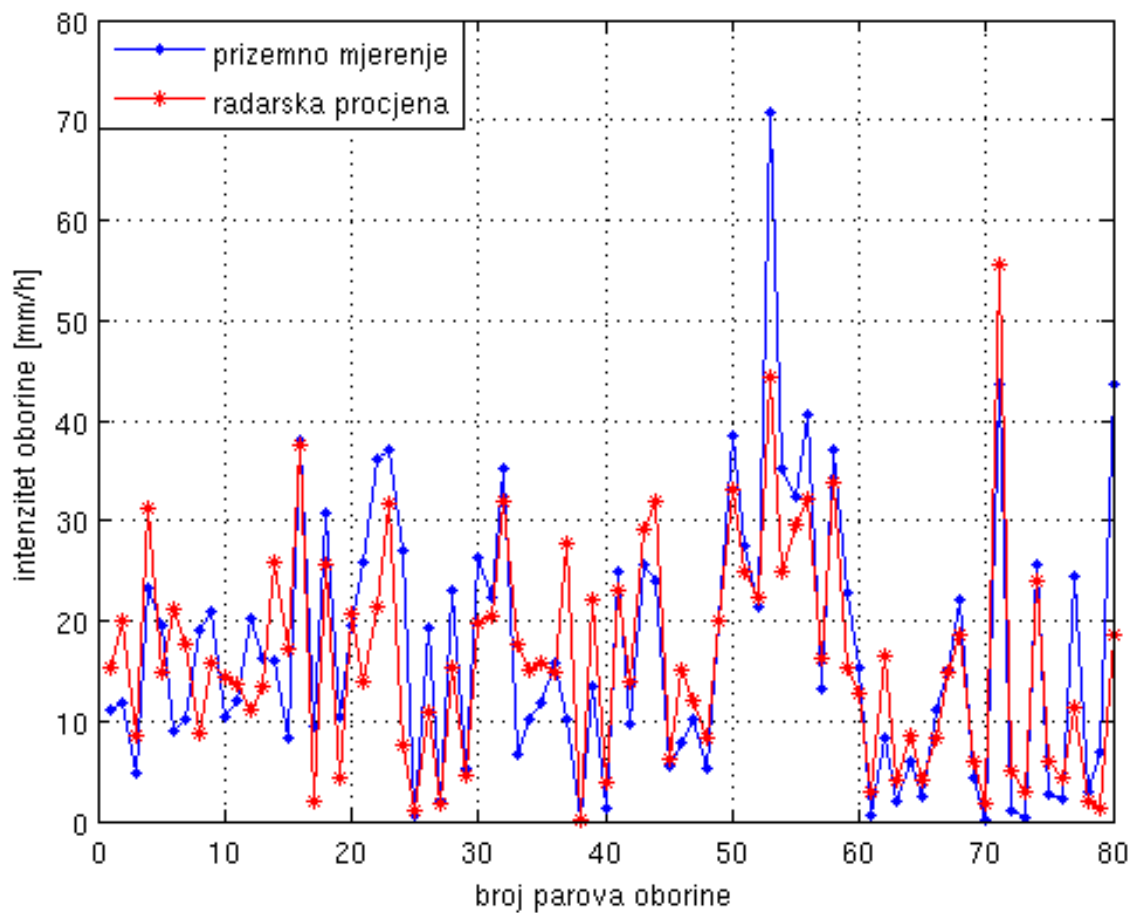
Slika 6. Odnos prizemnih mjerenja i radarske procjene oborine za sve promatrane postaje. Plavom bojom prikazana su prizemna mjerenja, a crvenom bojom pripadni par radarske procjene oborine dobiven korištenjem novodobivene Z-R relacije za skup podataka s utjecajnim područjem od 1 piksel. (NR1, tab. 3.1)

Pošto je prethodno pokazano da nove Z-R relacije bolje opisuju promatrani skup podataka, u nastavku analize one će se koristiti kao referentne relacije. Za promatrani skup podataka zatim su napravljene višesatne sume kako bi se ispitala odstupanja na većim skalama. U tablici 3.3 prikazane su 3, 6, 12, i 24-satne sume s pripadnom srednjom vrijednosti odstupanja, amplitudom odstupanja, koeficijentom korelacije te faktorom odstupanja između prizemnih mjerenja i radarskih procjena. Iz dobivenih rezultata vidljiv je znatno manji porast amplitude odstupanja od porasta vremenskog intervala. Srednja vrijednost odstupanja sugerira postojanje blagog podcjenjivanja, što je u skladu s ukupnim odstupanjem u tablici 3.2. Koeficijent korelacije stagnira s povećanjem vremenskog intervala do 12 h, a zatim počinje padati, što je i očekivano, pošto se smanjuje ukupan broj parova na kojima se može vršiti

korelacija. Faktor odstupanja uzima najveće odstupanje između prizemnog mjerenja i radarske procjene te gleda njihov relativni odnos. Vidljivo je smanjenje tog odnosa s porastom vremenskog intervala. Standardna devijacija računata je za rezidual između prizemnih mjerenja i radarskih procjena te nam govori unutar kojeg intervala odstupanja je smještena glavnina podataka. Ovdje RMSE također raste sporije od porasta vremenskog intervala. Usporedbom rezultata za NR1 i NR9 vidi se da su ukupno odstupanje odnosno BIAS (tab. 3.2) te srednja vrijednost odstupanja (tab. 3.3) jedini parametri bolje opisani relacijom NR9. Obzirom da to nije dovoljan argument za izbor relacije, u nastavku ovog rada relacija NR1, odnosno $Z = 57R^{2.13}$ (tab. 3.1) uzeta je kao reprezentativna relacija. Na slici 7 prikazane su 24-satne vrijednosti oborine za NR1 procjenu.

Tablica 3.3. Usporedba višesatnih suma i pripadnih parametara za skupove NR9 i NR1 (tab. 3.1) s pripadnom Z-R relacijom.

	3-satne vrijednosti		6-satne vrijednosti		12-satne vrijednosti		24-satne vrijednosti	
	NR9	NR1	NR9	NR1	NR9	NR1	NR9	NR1
- amplituda	-12.4	-9.0	-16.0	-15.2	-18.5	-19.6	-24.8	-26.4
sr. vrijednost	-0.01	-0.09	-0.03	-0.19	-0.06	-0.38	-0.11	-0.76
+ amplituda	6.1	5.0	9.8	8.8	16.0	14.0	21.2	17.6
koef. korel.	0.80	0.85	0.80	0.85	0.80	0.85	0.76	0.82
faktor	-0.36	-1.00	-0.33	-0.33	-0.34	-0.29	-0.40	-0.23
st.dev.	1.90	1.68	3.28	2.84	5.48	4.77	8.77	7.70
RMSE	1.90	1.68	3.28	2.85	5.47	4.77	8.71	7.69



Slika 7. 24-satne sume prizemnih mjerenja oborine (plavom bojom) i pripadni parovi radarskih procjena oborine (crvenom bojom) dobiveni iz relacije NR1, $Z = 57R^{2.13}$ za sve promatrane postaje.

3.2. Analiza po gradovima

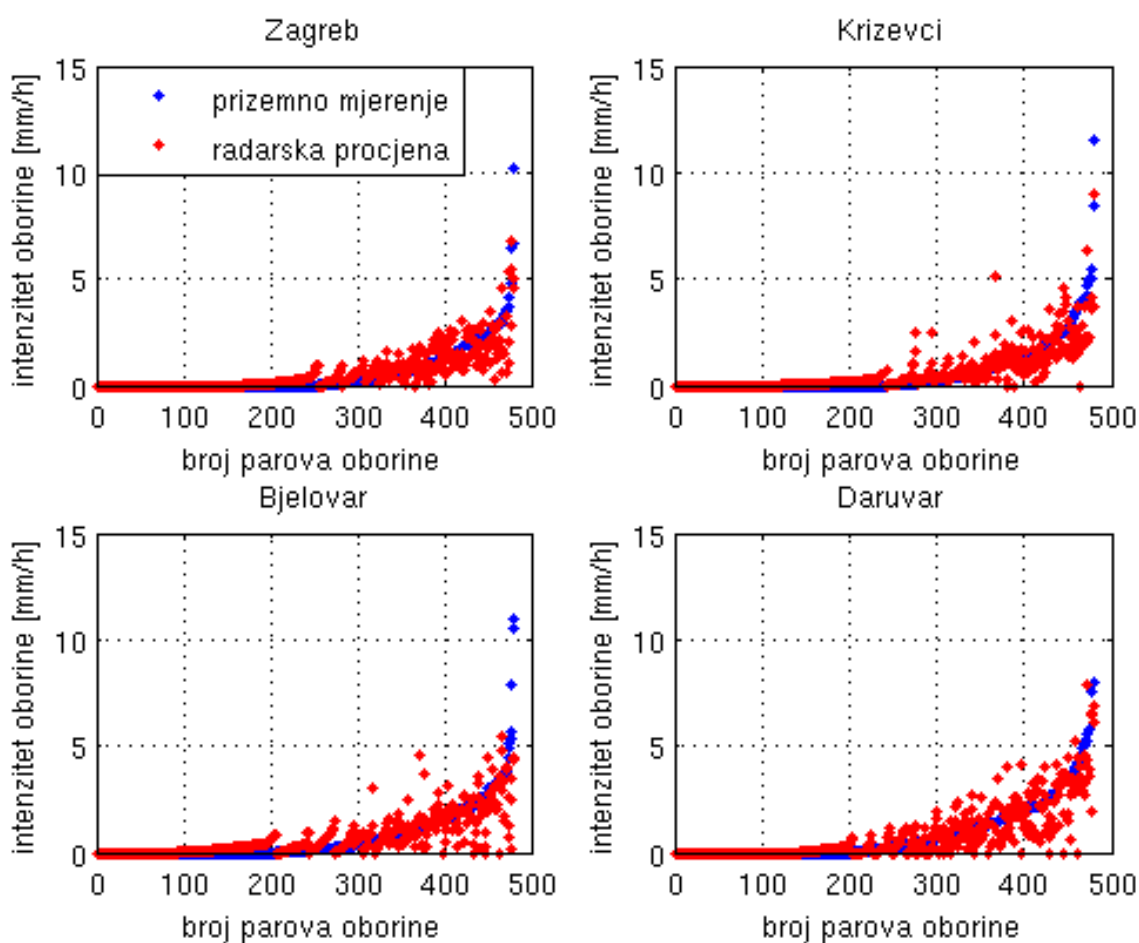
U sljedećem koraku analizira se svaki od navedenih gradova zasebno kako bi se provjerila potreba za eventualnim prostornim varijacijama koeficijenata Z-R relacije, jdb (7). Kako je spomenuto u drugom poglavlju, u ovom se radu koriste dva utjecajna područja. Jedno je širine 1 piksel, a drugo 3×3 piksela. Za svaki grad izračunate su relacije za oba utjecajna područja i pripadni parametri. Usporedba rezultata dana je u tablici 3.4. Izuzev Daruvara, relacije dobivene pomoću većeg utjecajnog područja bolje opisuju prizemna mjerenja. Analiza višesatnih suma (tab. 3.5) pokazuje da su postaje Zagreb Maksimir i Križevci bolje opisani relacijom većeg utjecajnog područja, dok su Bjelovar i Daruvar bolje opisani relacijom manjeg utjecajnog područja. Iako nije prikazano, napravljena je usporedba i s relacijama NR1 i NR9 (tab. 3.1) koje su bile nešto lošije u opisivanju gradova, što je bilo i očekivano pošto su one dobivene promatranjem cijelog skupa podataka. Slika 8 prikazuje vrijednosti prizemnih mjerenja i radarskih procjena po gradovima, a slika 9 prikazuje 24-satne sume za svaki grad posebno.

Tablica 3.4. Rezultati za promatrane nizove i pripadne Z-R relacije.

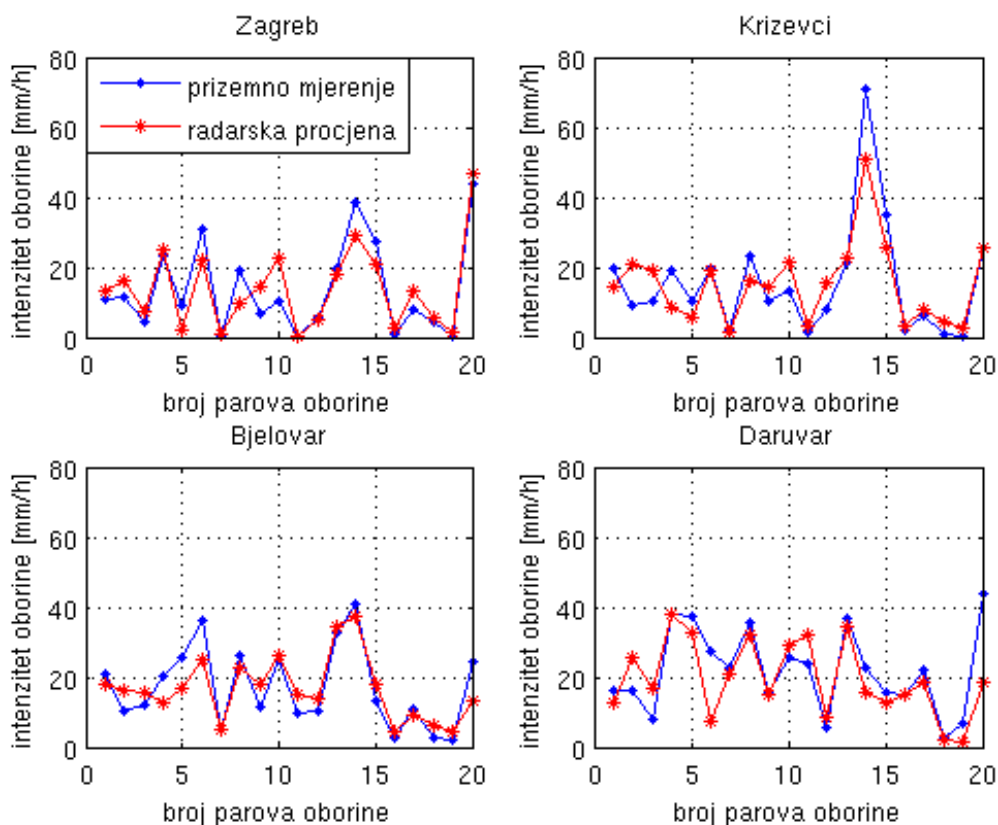
	ZG9	ZG1	KZ9	KZ1	BJ9	BJ1	DR9	DR1
RMSE	0.59	0.62	0.70	0.75	0.80	0.85	0.87	0.74
MEA	0.31	0.32	0.35	0.38	0.37	0.40	0.57	0.41
koef. korel.	0.83	0.82	0.82	0.79	0.77	0.74	0.78	0.85
Oborina Rp / Rr	276 / 275	276 / 272	308 / 304	308 / 311	343 / 320	343 / 333	437 / 465	437 / 380
BIAS	1	-4	-4	3	-23	-10	28	-47

Tablica 3.5. Usporedba višesatnih suma i pripadnih parametara za gradove s pripadnim Z-R relacijama.

Zagreb	3-satne vrijednosti		6-satne vrijednosti		12-satne vrijednosti		24-satne vrijednosti	
	ZG9	ZG1	ZG9	ZG1	ZG9	ZG1	ZG9	ZG1
- amplituda	-5.3	-5.6	-7.2	-7.7	-11.2	-11.8	-9.6	-10.9
sr. vrijednost	0.00	-0.02	0.01	-0.05	0.02	-0.10	0.04	-0.20
+ amplituda	3.1	3.3	6.0	6.4	9.7	10.3	12.6	12.9
koef. korel.	0.88	0.87	0.88	0.87	0.90	0.89	0.89	0.88
faktor	-0.50	-0.75	-0.38	-0.42	-0.46	-0.50	0.38	0.39
st.dev.	1.33	1.40	2.30	2.43	3.90	4.17	5.83	6.23
RMSE	1.33	1.39	2.28	2.41	3.85	4.12	5.68	6.08
Križevci	3-satne vrijednosti		6-satne vrijednosti		12-satne vrijednosti		24-satne vrijednosti	
	KZ9	KZ1	KZ9	KZ1	KZ9	KZ1	KZ9	KZ1
- amplituda	-9.0	-9.0	-11.5	-14.6	-15.3	-18.6	-19.5	-24.4
sr. vrijednost	-0.02	0.02	-0.04	0.04	-0.09	0.08	-0.18	0.16
+ amplituda	5.2	5.3	6.1	6.2	8.7	9.1	12.2	13.3
koef. korel.	0.84	0.81	0.86	0.82	0.87	0.84	0.9	0.87
faktor	-1.0	-1.0	-0.23	-0.32	-0.21	-0.27	-0.16	-0.21
st.dev.	1.65	1.8	2.79	3.07	4.75	5.21	7.60	8.47
RMSE	1.64	1.8	2.78	3.05	4.69	5.15	7.41	8.26
Bjelovar	3-satne vrijednosti		6-satne vrijednosti		12-satne vrijednosti		24-satne vrijednosti	
	BJ9	BJ1	BJ9	BJ1	BJ9	BJ1	BJ9	BJ1
- amplituda	-6.7	-6.7	-13.0	-10.5	-13.1	-12.0	-14.1	-11.5
sr. vrijednost	-0.14	-0.06	-0.28	-0.12	-0.57	-0.25	-1.14	-0.50
+ amplituda	8.4	5.2	6.6	4.3	7.8	5.3	7.9	6.2
koef. korel.	0.82	0.83	0.86	0.86	0.86	0.87	0.84	0.87
faktor	0.51	-1	-0.34	-0.26	-0.34	-0.61	-0.40	-0.30
st.dev.	1.70	1.67	2.64	2.60	4.16	4.07	6.26	5.70
RMSE	1.70	1.66	2.64	2.58	4.15	4.03	6.21	5.58
Daruvar	3-satne vrijednosti		6-satne vrijednosti		12-satne vrijednosti		24-satne vrijednosti	
	DR9	DR1	DR9	DR1	DR9	DR1	DR9	DR1
- amplituda	-9.2	-6.6	-11.1	-11.7	-11.4	-14.2	-15.0	-25.0
sr. vrijednost	0.17	-0.30	0.35	-0.60	0.69	-1.19	1.39	-2.38
+ amplituda	8.8	4.8	13.0	6.7	16.8	9.8	20.6	9.9
koef. korel.	0.82	0.89	0.83	0.90	0.79	0.87	0.70	0.74
faktor	-0.24	-0.65	0.40	-0.71	0.40	-0.35	0.39	-0.40
st.dev.	2.08	1.67	3.48	2.73	5.71	4.66	8.66	8.30
RMSE	2.08	1.67	3.47	2.78	5.68	4.75	8.55	8.43



Slika 8. Odnos prizemnih mjerenja i radarske procjene oborine sortiran po gradovima, a dobiven korištenjem ZG9, KZ9, BJ1 i DR1 (tab. 3.1).



Slika 9. 24-satne sume prizemnih mjerenja i radarskih procjena oborine, sortirane po gradovima i dobivene korištenjem: ZG9, KZ9, BJ1 i DR1 (tab. 3.1).

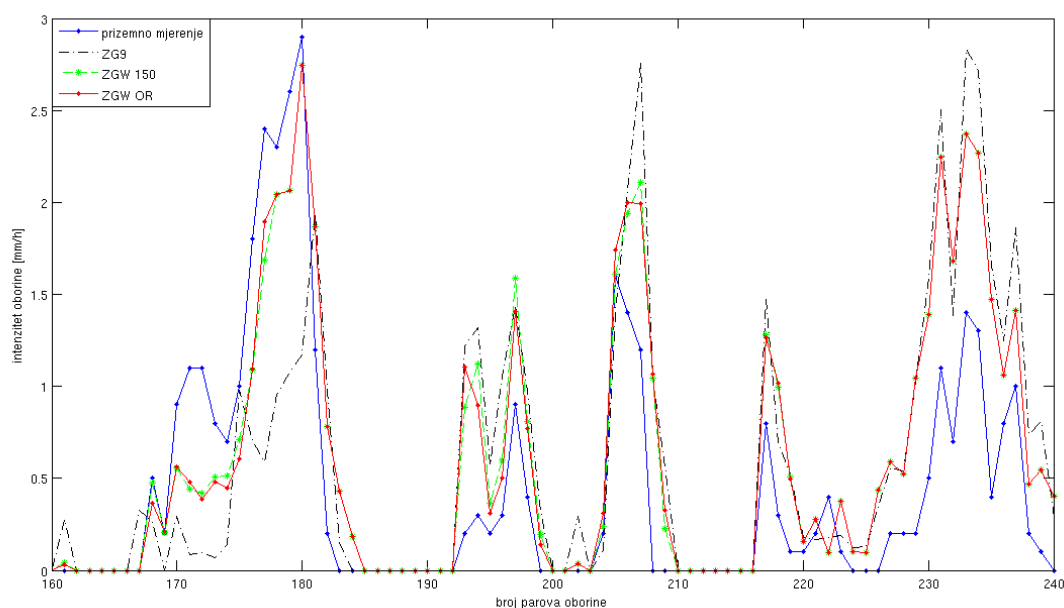
3.3. Primjena metode korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljice

U provedbi metode korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljice bilo je potrebno ustanoviti srednju brzinu i smjer horizontalnog vjetera te vrijeme padanja kapljice. Sukladno objašnjenju u poglavlju 2.7, svaka je epizoda imala jedinstveno vrijeme padanja kapljice, a vrijednosti su bile od 75 s do 400 s u sloju. Također, dobiveno je i ukupno srednje vrijeme od 150 s po sloju. Kako je i navedeno u tablici 3.1 *ZGW 150* predstavlja metodu korekcije koja koristi isto srednje vrijeme padanja kapljice u svim epizodama, dok kratica *ZGW OR* koristi originalna srednja vremena pojedinih epizoda. Podatci dobiveni u tablici 3.6 jasno govore da je niz *ZGW OR* uspješniji od niza *ZGW 150* u opisivanju prizemnih mjerenja oborine. Daljnjom usporedbom, vidljivo je da su obje metode bolje opisale promatrani niz prizemnih mjerenja od nekorigitiranog niza ZG9. Dodatno, za tako korigirane podatke

izračunate su i nove Z-R relacije, a dobiveni rezultati prikazani su na slici 10. Kako bi se dobivene vrijednosti mogle usporediti s nekorigiranim podatcima iz tablice 3.5, u tablici 3.7 prikazane su višesatne sume za oba korigirana niza, s relacijom ZG9 (tab. 3.1).

Tablica 3.6. Usporedba nekorigiranog i korigiranog niza podataka zbog horizontalnog pomaka kapljice. Prva tri stupca predstavljaju rezultate za pripadne nizove za koje je korištena zajednička relacija ZG9. Zadnja dva stupca predstavljaju navedene nizove i pripadnu Z-R relaciju.

Relacije	ZG9			ZGW 150	ZGW OR
nizovi	ZG9	ZGW 150	ZGW OR		
RMSE	0.59	0.56	0.52	0.56	0.50
MEA	0.31	0.28	0.27	0.28	0.26
koef. korel.	0.83	0.85	0.88	0.86	0.89
Oborina Rp / Rr	276 / 277	276 / 280	276 270	276 / 281	276 / 271
BIAS	1	4	-4	5	-5



Slika 10. Usporedba prizemnih mjerenja (plava linija) s nekorigiranim procjenama oborine (linija ZG9), usrednjeno korigiranim procjenama oborine (linija ZGW 150) te originalno korigiranim procjenama oborine (linija ZGW OR) pri čemu su ZG9, ZGW 150 i ZGW OR definirani u tablici 3.1.

Tablica 3.7. Usporedba višesatnih suma i pripadnih parametara za skupove ZGW 150 i ZGW OR s Z-R relacijama ZG9, $Z = 80R^{2.10}$.

Zagreb	3-satne		6-satne		12-satne		24-satne	
nizovi	ZGW 150	ZGW OR	ZGW 150	ZGW OR	ZGW 150	ZGW OR	ZGW 150	ZGW OR
-amplituda	-7.2	-7.8	-6.9	-8.0	-9.0	-9.3	-8.7	-10.2
sr. vr.	0.03	-0.03	0.05	-0.07	0.11	-0.14	0.21	-0.27
+ amplituda	2.9	2.9	5.8	5.8	8.7	8.7	11.7	11.7
koef. korel.	0.90	0.90	0.90	0.90	0.93	0.92	0.92	0.92
faktor	-0.20	-0.22	-0.15	-0.17	-0.23	-0.13	0.37	0.37
st. dev.	1.31	1.30	2.14	2.16	3.57	3.69	5.10	5.16
RMSE	1.31	1.30	2.12	2.15	3.53	3.65	4.98	5.04

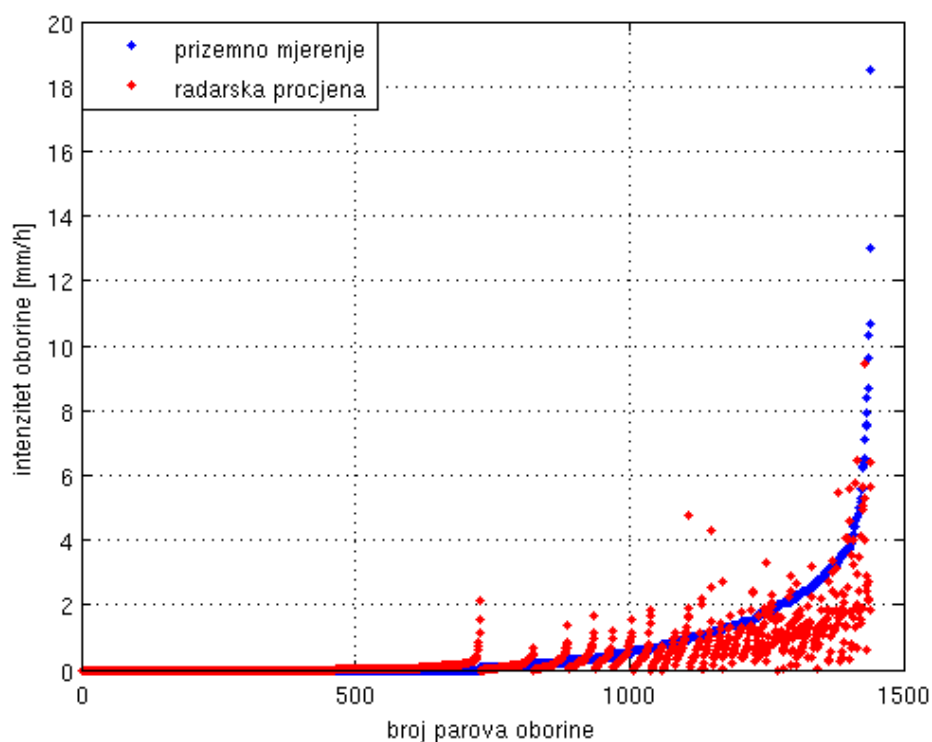
3.4. Verifikacija na nezavisnom skupu podataka

3.4.1. Cijeli niz

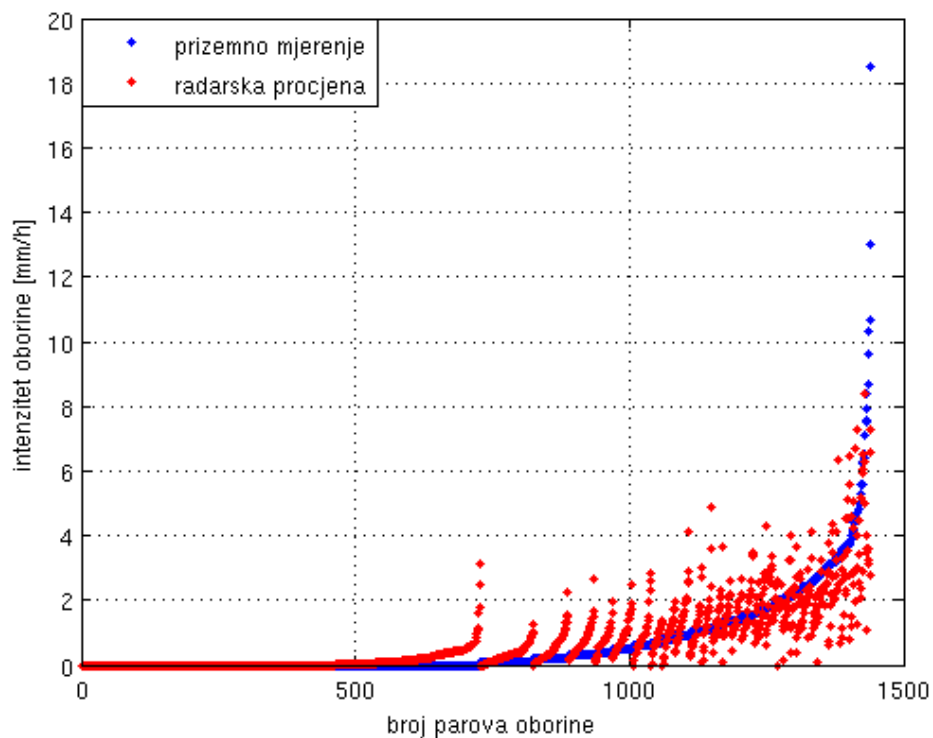
Kako bismo potvrdili valjanost metoda te opravdali korištenje novodobivenih Z-R relacija (tab. 3.1) uzeti su podatci s još tri automatske postaje (Sisak, Varašdin i Zagreb Grič). Prethodno je pokazano (tab. 3.5) da su gradovi udaljeniji od radara bolje opisani ako se u obzir uzme veće utjecajno područje. To se potvrdilo i na ovom skupu podataka pa će se u nastavku prikazivati samo podatci dobiveni korištenjem utjecajnog područja od 3×3 piksela. Iz tablice 3.8 jasno je vidljivo da nove relacije puno bolje opisuju prizemna mjerenja. Najistaknutije su relacije NR1 i ZG9. Grafička usporedba između relacija MPR9 i NR1 dana je na slikama 11 i 12, a na slici 13 prikazane su 24-satne sume korištenjem relacije NR1.

Tablica 3.8. Verifikacija relacija MPR9 ($Z=200R^{1.60}$), NR1 ($Z=57R^{2.13}$), ZG9 ($Z=80R^{2.10}$) i ZG1 ($Z=85R^{2.12}$) na novom nezavisnom skupu podataka.

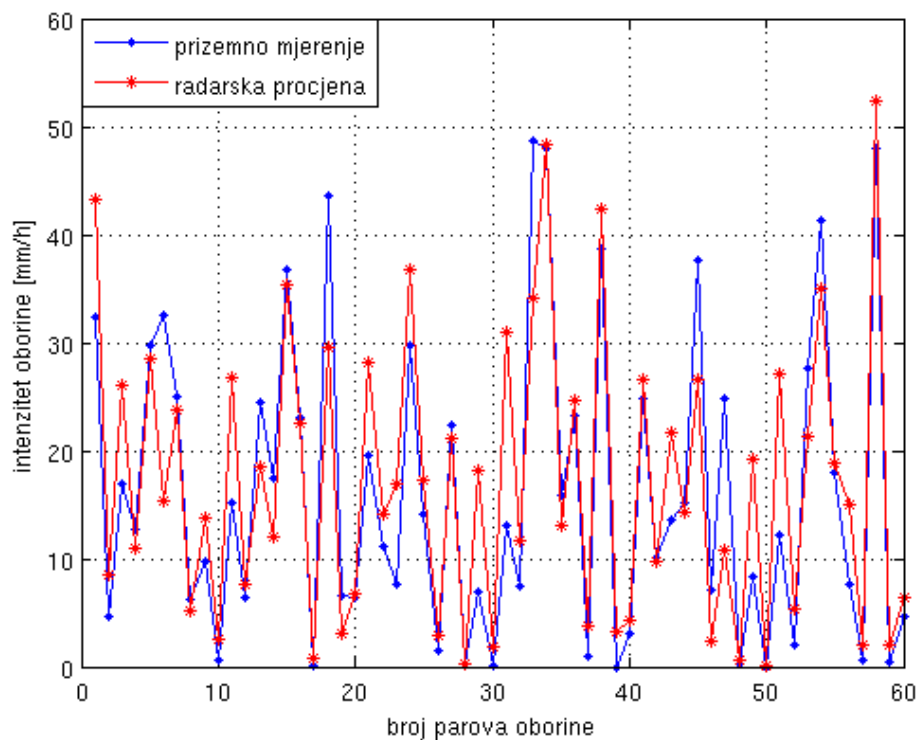
Svi podatci	RMSE	MEA	korelacija	Oborina Rp / Rr	BIAS	$\frac{BIAS}{R_p}$
MPR9	0.95	0.37	0.75	967 / 618	-349	-36.1 %
NR1	0.86	0.38	0.77	967 / 1032	65	6.7 %
ZG9	0.87	0.36	0.77	967 / 887	-80	-8.3 %
ZG1	0.87	0.36	0.77	967 / 856	-111	-11.5 %



Slika 11. Odnos prizemnih mjerenja i radarske procjene oborine. Plavom bojom prikazana su prizemna mjerenja, a crvenom bojom pripadni par radarske procjene oborine dobiven korištenjem Marshall-Palmerove Z-R relacije za skup podataka s utjecajnim područjem od 9 piksela. (MPR9, tab. 3.1).



Slika 12. Odnos prizemnih mjerenja i radarske procjene oborine. Plavom bojom prikazana su prizemna mjerenja, a crvenom bojom pripadni par radarske procjene oborine dobiven korištenjem NR1 relacije ($Z = 57R^{2.13}$) za skup podataka s utjecajnim područjem od 9 piksela.



Slika 13. 24-satne sume prizemnih mjerenja (plavom bojom) i radarskih procjena oborine (crvenom bojom) dobivenih iz relacije NR1 ($Z = 57R^{2.13}$) na novom skupu podataka.

3.4.2. Analiza po gradovima

Analizom po gradovima (tab. 3.9) vidljivo je da postaja Sisak ima relativno velike vrijednosti RMSE i MAE te nešto niži koeficijent korelacije. Kvantitativnom analizom ustanovljeno je da postoji 6 parova oborine u kojima je radar značajno podcijenio intenzitet oborine (za 4-16 mm/h), što je u konačnici dovelo do lošijih rezultata. Kako je došlo do tog podcjenjivanja? Daljnjom analizom radarskih podataka ustanovljeno je da nigdje u okolici postaje nije zabilježena dovoljno visoka reflektivnost koja bi objasnila ovo podcjenjivanje pa se utjecaj horizontalnog pomaka kapljica može zanemariti. Posljedica ovog podcjenjivanja je širina same radarske zrake na većim udaljenostima. Budući da je Sisak udaljen 78 km, širina radarske zrake iznosi 2724 km. Uzme li se u obzir da trag konvektivnog pljuska može biti manji od 0.5 km^2 , nije neobično da sam intenzitet bude prigušen. Ista podcjenjivanja primijećena su i na drugim udaljenim postajama, ali u nešto manjoj mjeri. Uz dodatnu provjeru ovime bi se mogao opravdati jedan dio podcjenjivanja, ali i precjenjivanja prizemnih mjerenja na udaljenim postajama jer radar zbog slabije rezolucije “razmazuje” izmjerene podatke.

Tablica 3.9. Analiza nezavisnog skupa podataka rastavljenog po gradovima. Svaki grad je promatran s dvije relacije, NR1 ($Z = 57R^{2.13}$) i ZG9 ($Z = 80R^{2.10}$).

Nizovi	Zagreb Grič		Sisak		Varaždin	
Z-R	ZG9	NR1	ZG9	NR1	ZG9	NR1
RMSE	0.78	0.78	1.13	1.11	0.61	0.63
MEA	0.34	0.36	0.40	0.42	0.33	0.36
koef. korel.	0.78	0.78	0.71	0.71	0.86	0.86
Oborina R_p / R_r	304 / 273	304 / 317	351 / 293	351 / 341	312 / 322	312 / 374
BIAS	-31	13	-58	-10	10	62

3.4.3. Metode korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljica na postaji Zagreb Grič

Zbog relativno male udaljenosti između postaja Grič i Maksimir uvedena je pretpostavka da će vjetar dobiven radiosondažnim mjerenjima biti reprezentativan za obje postaje. Očekivalo se da će metoda korekcije zbog horizontalnog vjetrova dati bolje rezultate u oba slučaja. Iako se analizom slike (nije

prikazano) vidjelo da u više od pola termina korigirane vrijednosti daju bolje rezultate, ukupno gledano, rezultati prikazani u tablici 3.10 ne govore tome u prilog. Uzme li se u obzir utjecaj terena oko postaja, moguće je da vjetar nad postajom Zagreb Grič ima nešto drukčiji iznos i smjer od podataka dobivenih radiosondažnim mjerenjima. Također, sam položaj pluviografa na Griču nije povoljan. Nalazi se u dvorištu DHMZ-a i u neposrednoj blizini relativno visokih objekata.

Tablica 3.10. Primjena metode korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljice na podatke s postaje Zagreb Grič.

Za računanje je korištena relacija ZG9 ($Z = 80R^{2.10}$).

Relacija	ZG9		
Nizovi	ZG9	ZGW 150	ZGW OR
RMSE	0.78	0.78	0.80
MEA	0.34	0.34	0.34
koef. korel.	0.78	0.78	0.77
Oborina Rp / Rr	304 / 273	304 / 282	304 / 274
BIAS	-31	-22	-30

Za kraj ovog poglavlja istaknut će se neki detalji koji se provlače kroz cijeli rad. Očito je da su odstupanja radarskih procjena od prizemnih mjerenja zastupljena u gotovo svakom paru podataka. Pokazalo se da postoji nekoliko dominantnih uzroka ovih odstupanja. Najistaknutija odstupanja posljedica su radarskog “razmazivanja” podataka zbog gubitka rezolucije na većim udaljenostima (npr. sl. 2 i 7), varijacije u raspodjeli kapljica i nedostatka korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljice (sl. 10). Postoje također termini kada nema mjerene oborine, a radar prikazuje znatniju količinu oborine. Podrijetla tih neslaganja mogu biti u:

- dvama prostorno bliskim oborinskim procesima koja zbog loše rezolucije budu spojena u jedan veći;
- značajnijoj evaporaciji kapljica na putu do tla;
- postojanju značajnog horizontalnog vjetra te
- razdiobi kapljica (DSD).

Općenito, postoje termini tj. epizode kada je radarsko procjenjivanje gotovo konstantno po iznosu. Takav primjer može se vidjeti na desnom kraju slike 6. S obzirom da je DSD ipak varijabilna i odnosi se na manje skale, ovo procjenjivanje vjerojatno je posljedica prisutnosti BB-a. Ostalim odstupanjima, bez detaljnije analize nije moguće utvrditi podrijetlo, pa možemo reći da su ona posljedica superpozicije dosad nabrojanih faktora s naglaskom na DSD.

4. Diskusija

4.1. Računanje Z-R relacije pomoću višesatnih vrijednosti

Promatranjem višesatnih suma ukupnog niza podataka iz tablice 3.3 može se zaključiti da je slaganje podataka bolje kako povećavamo vremenski interval u kojem promatramo oborinu. To se dalje može iskoristiti kao motiv da se Z-R relacije računaju pomoću višesatnih suma, a ne iz satnih vrijednosti s ciljem još boljeg opisivanja promatranog skupa prizemnih mjerenja. Napravljena je preliminarna analiza u tom smjeru. Pokazalo se da relacije dobivene iz višesatnih suma bolje opisuju samo taj vremenski interval iz kojeg je napravljena relacija, dok vremenski intervali manji od korištenog daju lošije rezultate.

4.2. Računanje Z-R relacije bez određenog dijela podataka

Kako je ovo prvi rad na temu verifikacije radarskih procjena i prizemnih mjerenja oborine u Hrvatskoj, bilo je važno obuhvatiti sve raspoložive podatke bez ikakve prethodne selekcije. U procesu obrade primjećeno je da bi izdvajanjem nekih podskupova podataka bilo moguće dobiti bolji opis podataka. Tako se na primjer može primijetiti veliki udio 0-0 parova tj. satnih termina kada oborina nije izmjerena na postaji niti procijenjena radarom. Eliminiranjem tih podataka sama Z-R relacija se ne bi promijenila, ali bi se promatrani parametri (RMSE, MAE, STD) malo povećali. Detaljnijom analizom podataka s udaljenijih postaja mogu se identificirati parovi koji su posljedica radarskog “razmazivanja” podataka. Eliminiranjem tih parova dobila bi se pouzdanija Z-R relacija.

4.3. Indikativna metoda za procjenjivanje evaporacije

Prizemna mjerenja oborine razlikuju dva slučaja kada nema oborine. Prvi slučaj je kada oborine uopće nije bilo, a drugi kada je zabilježena količina oborine 0.0 mm/h , odnosno kada je zabilježena oborina manja od pogreške instrumenta. U ovom drugom slučaju radar je sigurno zabilježio određenu

reflektivnost. Detaljnom analizom tog podskupa podataka uz uvođenje korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljica te korištenjem radaru bližih postaja, bilo bi moguće dobiti okvirnu informaciju o evaporaciji kapljica. Bolje od indikativnog nije moguće pošto DSD nije poznat.

4.4. Metoda korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljica

U ovom radu korištena su radiosondažna mjerenja s postaje Zagreb Maksimir. Iako su informacije o vjetru u vremenskom smislu rijetke, podatci iz tablice 3.6 i slike 3.7 sugeriraju izvjesno poboljšanje u opisivanju podataka. Prognoistički modeli u pravilu imaju dobru prostornu rezoluciju i dovoljno vertikalnih nivoa. Metoda korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljica koja bi koristila satne podatke o vjetru dala bi još bolje slaganje prizemnih mjerenja i radarskih procjena.

4.5. Metoda dobivanja relacije za konvektivne procese

U ovom radu razmatrane su oborinske epizode koje su istovremeno obuhvaćale svih sedam spomenutih postaja. Time se nažalost u većoj mjeri obuhvatila stratiformna naoblaka. Bez obzira na to, pokušala se dobiti relacija koja bi bolje opisala veće intenzitete oborine, no bezuspješno. Osim nedostatka podataka, čak i uz korištenje svih raspoloživih podataka s većim intenzitetima, oni postojeći bili su loši, odnosno podcjenjivanja su najčešće bila posljedica radarskog “razmazivanja” podataka, razdiobe kapljica ili nedostatka korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljica.

U opisivanju konvektivnih procesa poželjno je koristiti radaru bliže postaje npr. Daruvar i Bjelovar te okolne klimatološke postaje za verifikaciju. Na tim je udaljenostima rezolucija radara dobra tj. širina radarske zrake je oko 1000 m pa je “razmazivanje” radarskih podataka znatno manje. Korištenjem pseudosondaža iz prognoističkih modela mogla bi se uvesti korekcija zbog horizontalnog pomaka kapljica. Također, bilo bi dobro uzeti što veći broj podataka.

4.6. Alternativne metode za dobivanje radarskih podataka

Zbog ograničenja na besplatnu verziju programskog paketa *IRIS* korišten je *PPI* prikaz reflektivnosti s kutom elevacije 0.5° . U procesu razvijanja algoritama za izračune relacije primjećeno je na jednoj epizodi da se postaja Zagreb Maksimir nešto bolje opisuje kutem elevacije 0.0° . Ukoliko je dostupan originalni programski paket *IRIS*, moguće je napraviti *CAPPI* (*Constant Altitude PPI*) prikaz reflektivnosti čime bi se dobila uniformna visina. Također *CAPPI* prikaz bilo bi dobro postaviti na što je niže mogući nivo kako bi se smanjio utjecaj BB-a, ili u sustav obrade uvrstiti kontinuirane podatke o visini nulte izoterme iz prognostičkog modela kako bi se filter za BB (koji je sastavni dio sustava obrade) mogao ispravno koristiti. Osim *PPI* i *CAPPI*-ja postoji mogućnost korištenja još nekih metoda.

5. Zaključak

Ciljevi ovog rada bili su: verificirati uspješnost Marshall-Palmerove Z-R relacije u opisivanju oborine izmjerene na tlu na području obuhvaćenom radarskim centrom Bilogora; predložiti nove Z-R relacije za opisivanje oborine te ih verificirati na nezavisnom skupu podataka; provjeriti kako širina utjecajnog područja oko postaje utječe na uspješnost opisivanja oborine na toj postaji; definirati Z-R relaciju za svaku promatranu postaju zasebno; ispitati prostornu ovisnost Z-R relacija u opisivanju prizemnih mjerenja; i razviti metodu korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljice.

U tu svrhu korišteni su podatci o oborini za razdoblje od 2007.-2012. godine u ljetnom periodu (lipanj - rujan). Prizemna mjerenja oborine dobivena su sa sedam pluviografskih postaja pri čemu su četiri postaje korištene za generiranje novih Z-R relacija i analizu, a tri postaje korištene su isključivo za verifikaciju podataka. Radarski podatci dobiveni su iz *PPI* prikaza reflektivnosti za kut elevacije 0.5° .

U prvom dijelu rada pokazano je da Marshall-Palmerova Z-R relacija znatno podcjenjuje prizemna mjerenja neovisno o tome je li promatran skup s utjecajnim područjem od 1 piksela ili od 9 piksela. Na tim su skupovima zatim definirane nove Z-R relacije (NR1 i NR9) koje su podcjenjivanje smanjile s 43% na svega 5%. Usporedbom relacija NR1 i NR9 na pripadnom skupu podataka ustanovljeno je da je relacija NR1 ($Z = 57 R^{2.13}$) bolja relacija za opisivanje podataka te se NR9 odbacila u daljnjem razmatranju. Zatim je napravljena prostorna analiza, odnosno svaka se postaja razmatrala odvojeno. Analizom višesatnih suma ustanovljeno je da su postaje bliže radaru bolje opisane manjim utjecajnim područjem odnosno korištenjem samo jednog piksela za predstavljanje postaje, dok su udaljenije postaje bile bolje opisane korištenjem većeg utjecajnog područja odnosno korištenjem 9 piksela za predstavljanje postaje.

Metoda korekcije zbog horizontalnog pomaka kapljice rađena je za postaju Zagreb Maksimir. Usporedbom korigiranih i nekorigiranih podataka pokazano je značajno poboljšanje u korist korigiranih podataka, što upućuje na to da horizontalni pomak ne bi smio biti zanemaren u procesu verifikacije radarskih podataka kao što to i navode Mittermaier i sur. (2004.), Lack i Fox (2004.) te Feng (2007.). U klimatološkom smislu horizontalni pomak kapljice možda ne igra važnu ulogu, no u analizama koje su vezane za određene koordinate iznimno je važan.

Za verifikaciju novodobivenih relacija i razvijenih metoda uzeti su podatci s postaja Zagreb Grič, Sisak i Varaždin s utjecajnim područjem od 9 piksela pošto se ono pokazalo bolje za opis udaljenijih postaja. I na ovom skupu podataka Marshall-Palmerova Z-R relacija dala je prilično lošije rezultate, dok je

relacija NR1 dala bolje rezultate. Primjera radi, ukupno odstupanje smanjeno je sa 36.1% na 8.3%. Također, primijećena je prostorna ovisnost Z-R relacije jer je relacija ZG9 dobivena za Zagreb također solidno opisala podatke.

S obzirom da je postaja Zagreb Grič svega 5 km udaljena od postaje Zagreb Maksimir, pokušala se provesti korekcija zbog horizontalnog pomaka kapljica. Iako je grafičkom analizom ustanovljeno da postoje dijelovi koji su bolje opisani metodom takve korekcije, ukupni rezultati nisu bili bolji od prijašnjih. Najvjerojatniji razlog je utjecaj orografije na horizontalni vjetar koji u konačnici ne odgovara vjetru dobivenom iz radiosondažnih mjerenja.

Na temelju rezultata u ovom radu možemo zaključiti da je Z-R relacija NR1: $Z = 57 R^{2.13}$ puno bolja za opis prizemnih mjerenja od dosad korištene Marshall-Palmerove Z-R relacije. Korekcija zbog horizontalnog pomaka kapljica se ne bi trebala zanemarivati pri verifikaciji podataka te bi se ubuduće trebali koristiti prognostički podatci o vjetru za izračun te korekcije. Prilikom verifikacije podataka treba voditi računa o “razmazivanju” radarskih podataka na većim udaljenostima te po mogućnosti takve podatke ukloniti iz analize. Relaciju NR1 potrebno je testirati na konvektivnoj naoblaci koja je u ovom radu bila znatno manje zastupljena. Također, treba napomenuti da je ovaj rad temeljen na uzorku od 1920 parova oborine te verifikacija napravljena na uzorku od 1440 parova koji su dobiveni iz istih epizoda. Obrada većih količina podataka, uvažavanje i razvijanje novih korekcija kao i detaljnija analiza pojedinih dijelova trebali bi biti sljedeći koraci u proučavanju radarskih procjena oborine.

6. Literatura

1. Alfieri, L.; Claps, P. i Laio, F. (2010): Time-dependent Z-R relationships for estimating rainfall fields from radar measurements, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 149-158.
2. Atlas, D.; Rosenfeld, D. i Wolff, D. B. (1990). Climatologically tuned reflectivity-rain rate relations and links to area-time integrals, *Journal of Applied Meteorology*, 29, 1120-1135.
3. Borga, M. (2002): Accuracy of radar rainfall estimates for streamflow simulation, *Journal of Hydrology*, 267, 26-39.
4. Ćurić, M. (2001): Mikrofizika oblaka, RHMZ, Beograd, 306.
5. Feng, L. (2007): Consider the wind drift effects in the radar-rain gauge comparisons, 33rd Conference on Radar Meteorology.
6. Foote, G. B. i Du Toit, P. S., (1969): Terminal velocity of raindrops aloft, *Journal of Applied Meteorology*, 8, 249–253.
7. Frugis, B. J. i Wasula, T. A. (2011): Development of warning thresholds for one inch or greater hail in the Albany New York County Warning Area, *Eastern Region Technical Attachment* No. 2011-05.
8. Fujiyoshi, Y., Endoh, T., Yamada, T., Tsuboky, K., Tachibana, Y., i Wakahama, G. (1990): Determination of a Z-R relationship for snowfall using a radar and high sensitivity snow gauges, *Journal of Applied Meteorology*, 29, 147-152.
9. Gunn, R. E. S. i Marshall, J. S. (1955): The effect of wind shear on falling precipitation, *Journal of Meteorology*, 12, 339–349.
10. Holleman, I. (2006): Bias adjustment of radar-based 3-hour precipitation accumulations, *Technical Report, KNMI TR-290*.
11. Horvat, I. (2013): Veza između meteoroloških mezoskalnih procesa i pojave nestandardnih refrakcija radio valova u atmosferi, *diplomski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu*.
12. Hunter, S. M. (1999): WSR-88D radar rainfall estimation: capabilities, limitations and potential improvements, <http://www.srh.noaa.gov/mrx/research/precip/precip.php> (posjećeno 13.11.2012)
13. Lack, S. A. i Fox, N. I. (2004): Errors in surface rainfall rates retrieved from radar due to wind drift, *Sixth International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar, Melbourne, Australia, 2-4 February 2004*.

14. Lack, S. A. i Fox, N. I. (2007): An examination of the effect of wind-drift on radar-derived surface rainfall estimations, *Atmospheric Research*, 85, 217 – 229.
15. Lee, G. W. i Zawadzki, I. (2004): Variability of drop size distributions: time-scale dependence of the variability and its effects on rain estimation, *Journal of Applied Meteorology*, 44, 241-255.
16. Marshall, J. S. i Palmer, W. M. (1948): The Distribution of Rainfalldrops with Size, *Journal of Meteorology*, 5, 165-166.
17. Mittermaier, M. P.; Hogan R. J. i Illingworth, A. J. (2004): Using mesocale model winds for correcting wind-drift errors in radar estimates of surface rainfall, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130, 1–20.
18. Mushore, T. D. (2012): Gauge measurements and ground-radar observations of rainfall over the Water Board district Regge and Dinkel, *diplomski rad, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente*.
19. Rinehart, R. E. (2004): Radar for meteorologists, *Rinehart Publications, Grand Forks*, 482.
20. Shelton, M. L. (2009): Hydroclimatology: perspectives and applications, *Cambridge University, UK*, 426.
21. Spilhaus, A. F. (1948): Raindrop size, shape, and falling speed, *Journal of Meteorology*, 5, 108-110.
22. Smith, C. J. (1986): The reduction of errors caused by bright band in quantitative rainfall measurements made using radar, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 3, 129-141.
23. Ulbrich, C. W. i Lee, L. G. (1999): Rainfall measurement error by WSR-88D radars due to variations in Z–R law parameters and the radar constant, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16, 1017-1024.
24. Viher, M.; Prtenjak, M. T. i Grisogono, B. (2013): A multi-year study of the anomalous propagation conditions along the coast of the Adriatic sea, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 97, 75-84.
25. Wilson, J. W. i Brandes, E. A. (1979): Radar measurement of rainfall-a summary, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 60, 1048-1058.

Prilog A

Pojas pojačane reflektivnosti (eng. *Bright Band*)

Jedan od glavnih uzroka nepouzdanosti prilikom usporedbe prizemnih mjerenja i radarskih procjena oborine je i *Bright Band* (BB). Programski paketi za obradu radarskih podataka kao što je *IRIS* u sebi imaju i sustav za korigiranje BB-a. Iako je taj sustav dobro zamišljen, njegov potencijal najčešće nije iskorišten u potpunosti, već se koristi osnovna postavka predložena od strane proizvođača. U ovom slučaju riječ je o klimatološkim visinama BB-a za područje umjerenih širina. U ovom prilogu pokazat će se usporedba predloženih klimatoloških visina BB-a s visinama izračunatim za postaju Zagreb Grič te pokazati kako klimatološke visine nisu dobra mjera za definiranje visine BB-a.

Za definiranje klimatoloških visina BB-a promatrano je razdoblje od 1980. do 2011. godine za postaju Zagreb Grič, a podatci za izračun srednjih mjesečnih temperatura preuzeti su s: <http://eca.knmi.nl/dailydata/customquery.php>. Linearnom interpolacijom popunjene su praznine (oko 30 nasumičnih dana bez informacije), a svi dobiveni rezultati prikazani su u tablici A. Prvi dio tablice sadrži redom: srednju mjesečnu temperaturu, standardnu devijaciju, amplitudu, minimalnu i maksimalnu temperaturu. Na temelju dobivenih podataka, izračunate su visine nulte izoterme koja definira početak BB-a. U nastavku tablice A redom su zapisani: minimalna visina, srednja visina, visina definirana u priručniku *IRIS (IRIS Product & Display Manual, February 2011)*, maksimalna visina i raspon visina za određeni mjesec. Visine su računate uz pretpostavku mokroadijabatičkog procesa od $0.65^{\circ}/100\text{ m}$ (nadmorska visina postaje od 157 m nije uzeta u obzir).

Usporedbom podataka srednje visine (sr. vis.) i *IRIS* vidimo da postoji dobro slaganje u periodu od 4. do 8. mjeseca dok je za ostale mjesece odstupanje veće od 250 m pa čak do 750 m. No puno važnije za primijetiti jest raspon visina za određeni mjesec (amp. vis.). On nam govori da visina BB-a može biti znatno niža od srednje vrijednosti. Dodatno, u ovom prilogu su korištene srednje dnevne temperature. Kada bi se u obzir uzele satne vrijednosti, varijabilnost BB-a bila bi još veća. Alternativna metoda definiranja BB-a jest povezivanje softvera *IRIS* s prognostičkim modelom (npr. *Aladin* ili *WRF*), koji bi slao satne podatke o visini BB-a. Time bi se pogreška mogla značajno smanjiti pa čak i kada bi se pretpostavilo da je visina BB-a konstantna u prostoru. Uz to treba spomenuti da se BB pojavljuje samo sa stratiformnom naoblakom odnosno u konvektivnoj se može zanemariti.

Tablica A. Statistički parametri za niz srednjih mjesečnih temperatura na postaji Zagreb Grič za razdoblje od 1980. do 2011. godine.

mjesec	sr. temp.	st. dev.	ampl.	min. t	max. t	min. vis.	sr. vis.	<i>IRIS</i>	max. vis.	amp. vis.
1	1.7	2.4	10.9	-3.4	7.5	0.0	264.8	1000.0	1155.3	1155.3
2	3.7	2.9	10.7	-2.1	8.6	0.0	565.1	1000.0	1321.4	1321.4
3	8.1	2.1	9.0	2.7	11.7	421.8	1238.9	1500.0	1802.5	1380.6
4	12.6	1.7	6.8	9.3	16.1	1425.1	1931.8	2000.0	2469.2	1044.1
5	17.3	1.7	7.1	13.3	20.4	2041.2	2657.2	2500.0	3131.5	1090.3
6	20.3	1.6	7.0	17.6	24.5	2700.0	3121.2	3000.0	3770.3	1070.3
7	22.4	1.3	5.2	19.5	24.6	2993.0	3453.4	3500.0	3791.1	798.0
8	22.0	1.7	6.6	19.2	25.8	2953.8	3381.5	3500.0	3971.7	1017.9
9	17.4	1.7	7.8	13.8	21.6	2121.0	2683.5	3000.0	3323.6	1202.6
10	12.4	1.3	5.3	10.1	15.4	1556.3	1908.4	2500.0	2368.7	812.4
11	6.8	2.3	8.7	2.6	11.3	400.5	1050.1	1500.0	1746.2	1345.6
12	2.7	1.9	7.9	-1.5	6.4	0.0	413.4	1000.0	979.2	979.2