

Prethodno priopćenje | Preliminary Report | UDK 556.121  
 Primljeno (Received): 16.11.2015.; Prihvaćeno (Accepted): 10.3.2016.

# ANALIZA PROCJENE INTENZITETA OBORINE POMOĆU X-BAND RADARA

**Nino Kravica, dipl. ing. građ.**

Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci  
 Radmile Matejčić 3,51000 Rijeka  
 nino.kravica@uniri.hr

**dr. sc. Igor Ružić, dipl. ing. građ.**

Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci  
 Radmile Matejčić 3,51000 Rijeka

**prof. dr. sc. Nevenka Ožanić, dipl. ing. građ.**

Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci  
 Radmile Matejčić 3,51000 Rijeka

Na orografski složenom i brdovitom terenu ponekad niti veći broj ombrografa nije dovoljan kako bi se precizno izmjerila prostorna raspodjela intenziteta oborine, zbog čega se u novije vrijeme sve češće koriste meteorološki radari u sklopu hidroloških analiza. U ovom radu je prikazana analiza pouzdanosti X-band radara u procjeni intenziteta oborine na polugodišnjem nizu kišnih događaja na riječkom području. Izmjerene vrijednosti s radara su uspoređene s dva ombrografa te je definirana nova Z-R radarska jednadžba. Nakon provedene kalibracije pokazalo se da je u 64% zabilježenih slučajeva radar vrlo dobro procijenio prostornu raspodjelu intenziteta oborine, iako je zabilježeno i 14% slučajeva vrlo slabe procjene.

**Ključne riječi:** intenzitet oborine, prostorna raspodjela oborine, meteorološki radar, X-band, Z-R jednadžba

## 1. UVOD

Poplave i klizišta zemlje spadaju među najrazornije prirodne katastrofe sa znatnim ljudskim i ekonomskim gubitcima. Ove nepogode su uglavnom povezane s pojavom ekstremnih oborina koje karakterizira izrazita varijabilnost u prostornom i vremenskom smislu. Raspodjela oborina ovisi ne samo o općoj cirkulaciji atmosfere, već i o orografskim obilježjima analiziranog područja. Naime, složena i raznolika topografija terena može utjecati na dinamiku atmosferskih procesa i dodatno naglasiti prostornu varijabilnost oborina, čak i na manjim površinama poput slivova bujičnih rijeka.

Podatci se o oborinama uglavnom prikupljaju s meteoroloških postaja pomoću kišomjera, ombrografa i totalizatora. Ombrograf služi za praćenje količine i trajanja oborine, dok kišomjeri i totalizatori mjere samo ukupnu količinu pale oborine i očitavaju se dva puta dnevno s kišomjera, odnosno dva puta godišnje s totalizatora. Iako

ombrografi imaju relativno visoku vremensku rezoluciju, ovi uređaji su deficitarni u prostornom smislu. Naime, ponekad niti veći broj ombrografa nije dovoljan da bi se precizno izmjerila oborina vrlo izražene prostorne varijabilnosti.

Na riječkom je području 1957. godine uspostavljena ombrografska postaja Rijeka (locirana na Kozali) u nadležnosti DHMZ-a te 1976. godine postaja Klana (kasnije premješšana u Studenu) u nadležnosti HEP-a. Za potrebe istraživanja na hrvatsko-japanskom projektu Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje nepogoda kod odrona zemlje i poplava u Hrvatskoj (*Risk Identification and Land-Use planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia*), na brani Valiči je 2009. godine postavljena ombrografska postaja Grohovo u nadležnosti Građevinskog fakulteta u Rijeci. Pored navedenih lokacija, komunalno društvo Vodovod

i kanalizacija iz Rijeke (ViK Rijeka) je na istom području u razdoblju od 2006. – 2007. godine uspostavilo vlastiti monitoring oborina na ukupno 13 ombrografskih postaja. Iako su navedene postaje raspoređene vrlo povoljno (prostorno i visinski pokrivaju cijelo područje riječkog sustava odvodnje), one su u nadležnosti komunalnog poduzeća te zasada izmjereni podatci nisu javno dostupni.

Pri izradi hidroloških modela tradicionalno se koriste podatci s ombrografskih postaja kao glavni ulazni parametar. U slučaju izrazito promjenjivih karakteristika oborine, ovaj podatak može postati glavni uzrok nepouzdanosti i nevjerodostojnosti dobivenih rezultata (Kavetski et al., 2002., Verdecchia et al., 2008.). Također, postavljanje i održavanje većeg broja mjernih uređaja može ponekad predstavljati i vrlo zahtjevan tehnički i financijski poduhvat (Borga, 2002.). Zbog svega navedenog, u novije se vrijeme hidrolozi sve više okreću metodama daljinskog mjerenja oborina, posebice radarskoj tehnologiji. Njihova glavna odlika je visoka prostorna i vremenska razlučivost koja može biti od velike koristi prvenstveno pri izradi hidroloških analiza i modela te pri uspostavi sustava za rano uzbunjivanje (Rinehart, 2004., Krajewski i Smith, 2002., Creutin i Borga, 2003., Overeem et al., 2009., Thorndahl i Rasmussen, 2012.).

Razvoj meteorološke radarske mreže u Hrvatskoj započeo je 1970. godine. Od 2005. do danas u Državnom hidrometeorološkom zavodu (u nastavku DHMZ) sve se više radi na razvoju i primjeni modernih meteoroloških tehnologija (radari, sateliti, električna pražnjenja, meteorološka mjerenja zrakoplovima, globalni meteorološki informacijski sustav). Meteorološka radarska mreža DHMZ-a sastoji se od 3 S-band radara velikog dometa (250 km) i 5 S-band radara kraćeg dometa (80 km). Raspored radara je takav da je njima uglavnom pokriveno područje unutrašnjosti Hrvatske; tri radara velikog dometa smještena su na Puntijarki (Medvednica) kraj Zagreba, Bilogori kod Pitomače, Čepinu kod Osijeka, a radari kraćeg dometa su locirani u Varaždinu, Tremi kod Križevaca, Struču kod Siska, Goricama kod Nove Gradiške i Gradištu kod Županje (Lipovšćak, 2015.).

U sklopu hrvatsko-japanskog znanstvenog projekta Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje nepogoda kod odrona zemlje i poplava u Hrvatskoj, u studenom 2012. na krovu zgrade Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci instaliran je meteorološki radar Mini X-Band Dual Polarimetric Weather Radar proizvođača FURUNO, dometa 30 km. To je manji uređaj kraćeg doseg u odnosu na radare DHMZ-a, ali veće prostorne i vremenske razlučivosti i preciznosti.

Postoji značajan broj istraživanja koja sugeriraju kako upravo radarska X-band tehnologija nudi jedinstvenu mogućnost procjene oborine za velik raspon prostorno-vremenske razlučivosti, ovisno o pojedinom hidrološkom problemu (Thorndahl i Rasmussen 2012., Berne i Uijlenho et, 2006., Moreau et al. 2009., Van der Beek et al., 2010.). Navedene mogućnosti su posebno bitne u sustavu upravljanja rizicima od poplava u urbanim sredinama i brdskim predjelima.

Zbog sve izraženije urbanizacije gradske sredine su postale posebno ranjiva područja pri pojavi ekstremnih oborina. Naime, na slivovima manjih površina s velikim udjelom nepropusnih podloga, hidrološki odziv na oborine, u smislu generiranja otjecanja, je puno brži i intenzivniji. Također, ponekad složeni infrastrukturni sustav odvodnje može dodatno zakomplicirati mogućnost predviđanja posljedica ekstremnih oborina. Uz sve navedeno, u bliskoj budućnosti za očekivati je i sve jače i češće pojave ekstremnih meteoroloških događaja uslijed klimatskih promjena.

Točnost i pouzdanost X-band radara u procjenjivanju intenziteta oborine je još uvijek nedovoljno istražena. Kako bi pružili dodatna saznanja o mogućnostima korištenja ovog tipa uređaja iznad urbaniziranog i brdovitog terena, u nastavku će se prikazati analiza pouzdanosti procjene prostorne raspodjele oborine na polugodišnjem nizu kišnih događaja zabilježenih u razdoblju od studenog 2012. do svibnja 2013. godine na području grada Rijeke.

## 2. PROCJENA INTENZITETA OBORINE POMOĆU X-BAND RADARA

Istraživanja radarske tehnologije s ciljem praćenja oborina u novijoj su se povijesti prvenstveno bavila S-band ( $\lambda \sim 10\text{--}11$  cm) i C-band ( $\lambda \sim 5\text{--}6$  cm) radarima (Reinhart, 2004.). Posljednjih se godina sve više istražuje mogućnost primjene i manjih X-band radara, kraćih valnih duljina ( $\lambda \sim 3$  cm), veće prostorne i vremenske razlučivosti, ali kraćeg doseg i povećane osjetljivosti na različite uzroke nepouzdanosti mjerenja, pri čemu se u literaturi prvenstveno spominje pojava atenuacije (Berne, 2006., Van der Beek et al., 2010.). Sve češćim korištenjem X-band radara u meteorologiji pokazalo se kako ovaj tip uređaja ima znatno veću preciznost mjerenja prostorne raspodjele oborine od bilo kojeg standardnog S-band i C-band meteorološkog radara ili mreže gusto raspoređenih kišomjera i ombrografa (Moreau et al., 2009., Van der Beek et al., 2010.).

Osim atenuacije koja opisuje prigušenje elektromagnetskog vala pri prolasku kroz oblake, na nepouzdanost mjerenja oborine pomoću radara mogu utjecati i pojave poput: vjetera, atmosferske refrakcije, pojasa pojačane reflektivnosti (*eng. bright band effect*) te razdiobe veličine kišnih kapljica (*eng. drop size distribution*, u nastavku DSD) (Krajewski i Smith, 2002.). Problemi nepouzdanosti se uglavnom rješavaju korištenjem polarimetrijskih radara ili naprednijim (dinamičkim) metodama kalibracije (Moreau et al., 2009., Van der Beek et al., 2010.).

Intenzitet oborine  $R$  određuje se pomoću empirijskih  $Z\text{--}R$  veza, tj. radarskih jednadžbi koje se mogu prikazati u općem obliku:

$$Z = a \cdot R^b \quad (1)$$

gdje je  $Z$  reflektivnost radara [dBZ],  $R$  intenzitet oborine [mm/h],  $a$  i  $b$  su empirijski koeficijenti koji ovise o tipu oborine (vremenskoj i prostornoj raspodjeli promjera kišnih kapi), klimatskoj zoni, temperaturi et al. Najčešće korištena Z-R jednadžba je tzv. Marshall-Palmerova jednadžba (Marshall and Palmer, 1948.) koja se temelji na eksponencijalnoj raspodjeli veličine kišnih kapi te graničnoj brzini padanja istih, a iznosi:

$$Z = 200 \cdot R^{1,6} \quad (2)$$

Primjerice, DHMZ koristi jednadžbu (3) za procjenu oborina prema podatcima sa S-band radara u svojoj mreži. Battan (1973.) je sakupio i prikazao 69 različitih Z-R jednadžbi kako bi naglasio činjenicu da njihova primjena nije univerzalna te da je za svako pojedino područje, klimatske karakteristike i tip radara posebno zasebno definirati odgovarajuće koeficijente jednadžbe (2). Koeficijenti Z-R jednadžbe se mogu kretati u vrlo velikom rasponu, a njihov odabir se uglavnom temelji na jednom od dva pristupa: a) proračunu uz poznavanje raspodjele veličine kišnih kapi (DSD) ili b) kalibraciji s izmjerenim podatcima na ombrografima. Oba navedena pristupa imaju svoje prednosti, ali i mane (Krajewski et al., 2002.). U prvom pristupu oba parametra (reflektivnost  $Z$  i intenzitet oborine  $R$ ) je moguće odrediti direktno iz raspodjele veličine kišnih kapljica izmjerenih pomoću disdrometra. Druga metoda je empirijska i zahtijeva primjenu statističkih metoda, najčešće nelinearne regresije, kako bi se korelirali podatci o izmjerenom intenzitetu oborine na tlu i faktoru reflektivnosti radara na određenoj visini iznad tla. Metoda određivanja optimalne Z-R jednadžbe pomoću DSD pristupa je osjetljiva prvenstveno na prostornu i vremensku varijabilnost oborine, odabir statističke metode za određivanje parametra  $a$  i  $b$ , količinu prikupljenih podataka te preciznost disdrometra (Krajewski et al., 2002.). S druge strane, empirijske metode su osjetljive na problem skaliranja, radarska opažanja s relativno velike tlocrtnne površine u atmosferi se uspoređuju s točkastim opažanjima s ombrografa na površini. Također, prisutan je i problem nesigurnosti statističkih pokazatelja pogreške kod usporedbe intenziteta oborine dobivenih pomoću Z-R jednadžbe i pomoću ombrografa. Naime, ponekad parametri  $a$  i  $b$  koji su optimalni s obzirom na jedan pokazatelj pogreške, ne moraju nužno biti optimalni s obzirom na ostale pokazatelje (Krajewski et al., 2002.).

Kako na riječkom području nije uspostavljena mreža disdrometara kojima bi se mjerila raspodjela veličine kišnih kapi, u ovom će se radu koeficijenti Z-R jednadžbe definirati empirijskom metodom, korelacijom faktora reflektivnosti s radara i zabilježenih količina oborine na dva ombrografa. Cilj ove analize je pronaći one koeficijente  $a$  i  $b$  za koje intenziteti oborine izračunati pomoću Z-R jednadžbe daju najmanja statistička

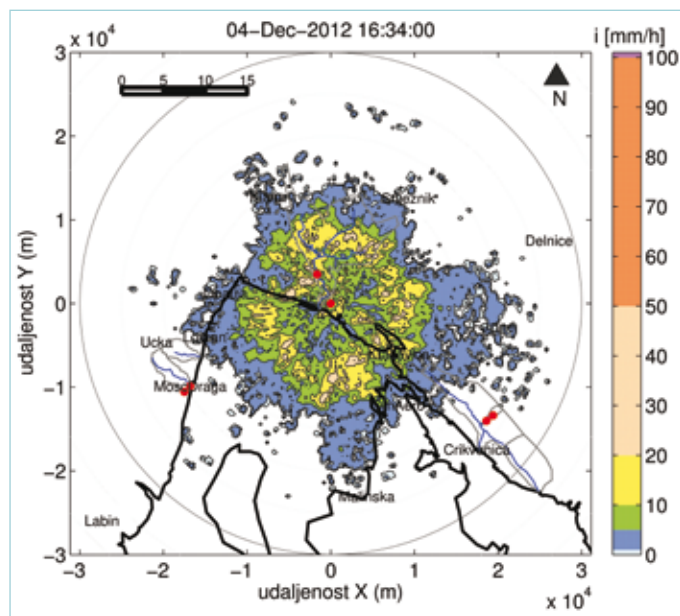
odstupanja u usporedbi s zabilježenim oborinama na ombrografu. Također će se analizirati i svaki pojedini kišni događaji s ciljem utvrđivanja veličine pogreške u usporedbi s podatcima s ombrografa. Navedeni proračuni i analize provedeni su na temelju niza zabilježenih oborina u razdoblju od studenog 2012. do svibnja 2013. na ombrografskim postajama Rijeka i Grohovo.

### 3. MJERNI UREĐAJI I ANALIZIRANI PODATCI

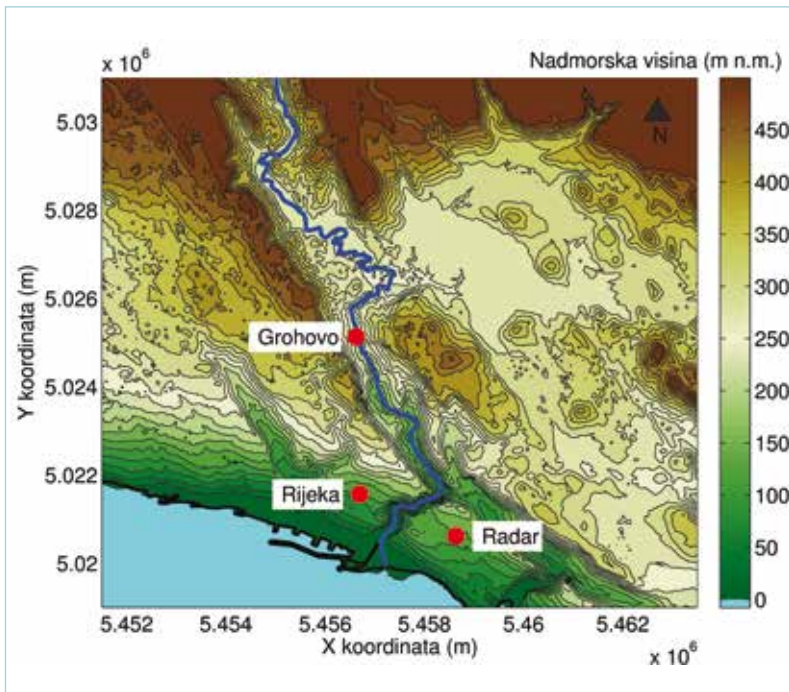
#### 3.1. Radar

Meteorološki radar korišten u ovoj analizi je Mini X-Band Dual Polarimetric Weather Radar proizvođača FURUNO Electric Co. Instaliran je na krovu zgrade Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, koja se nalazi na kampusu na Trsatu, na nadmorskoj visini od približno 160 m n.m. Uređaj je kompaktnih dimenzija, snage 100 W, osjetljivosti 33 dB, širine zrake 2,7°, maksimalnog dosega 30 km, s horizontalnom rezolucijom 96 m i brzinom rotacije od minimalno 1 okretaja u minuti. Radar je opremljen vlastitim softverom koji u digitalnom formatu zapisuje podatke o faktoru reflektivnosti  $Z$  i Dopplerovoj brzini  $V$  svake minute u sfernim koordinatama. Uz navedeno, softver sadrži i algoritam koji pruža mogućnost trenutnog zapisa intenziteta oborine koristeći Z-R jednadžbu definiranu na osnovu višegodišnjeg niza izmjernih kišnih događaja u Japanu (Minowa, 2013.):

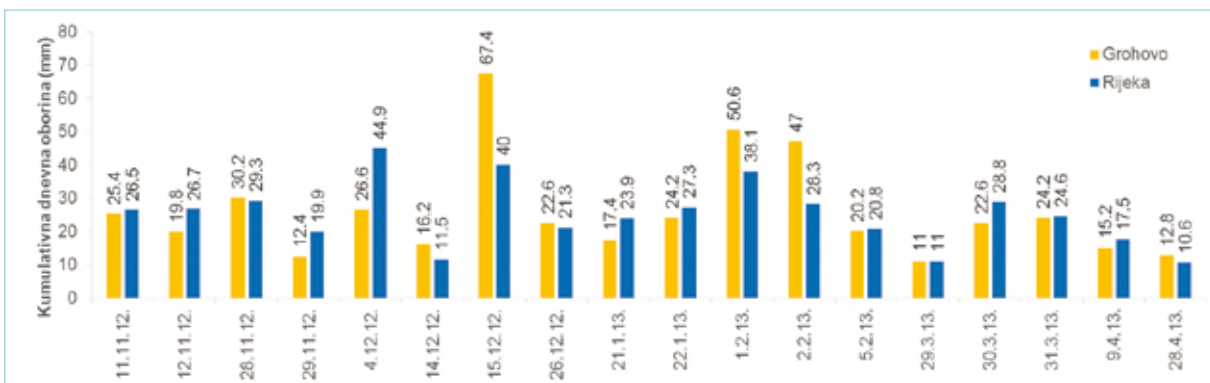
$$Z = 185.8 \cdot R^{1,62} \quad (3)$$



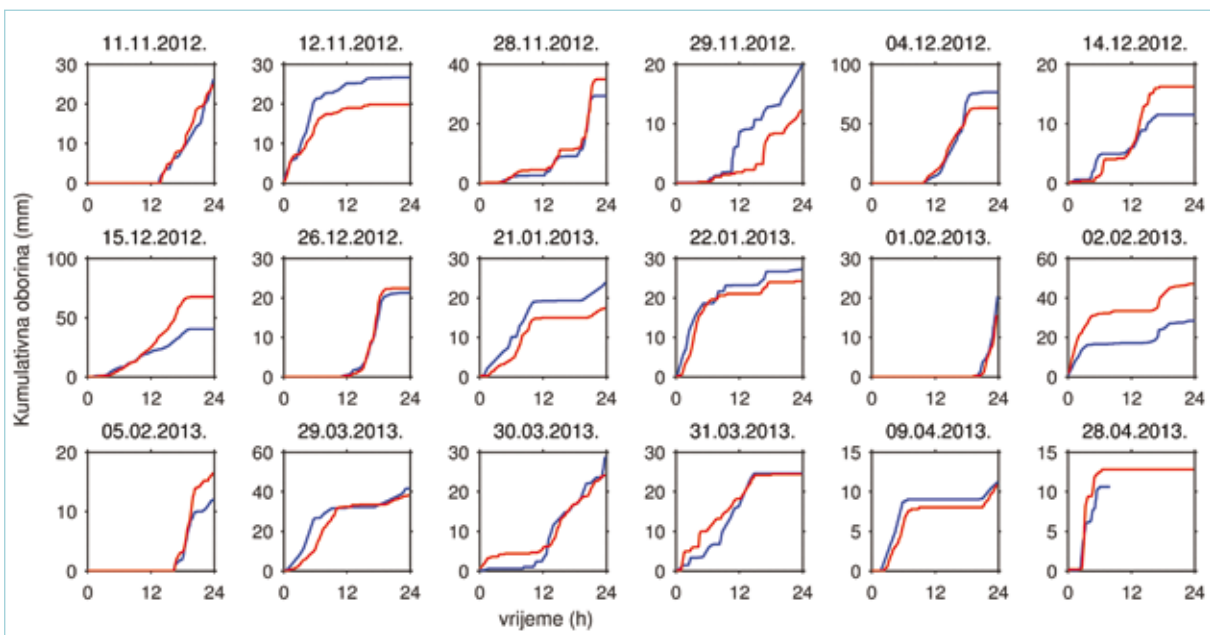
Slika 1. Karakteristični grafički prikaz obrađene digitalne snimke radara, 4. prosinac 2012.



Slika 2. Položaj radara te meteoroloških postaja Rijeka i Grohovo na elevacijskom modelu terena



Slika 3. Ukupne dnevne količine oborine za odabranih 18 kišnih epizoda u razdoblju od 1. studenog 2012. do 1. svibnja 2013., na omrografima Rijeka i Grohovo



Slika 4. Kumulativne količine oborine odabranih 18 kišnih epizoda, na omrografima Rijeka (plava boja) i Grohovo (crvena boja)



Za potrebe predmetne analize, minutni podatci o reflektivnosti  $Z$ , originalno u sfernim koordinatama, transformirani su u tablični zapis u Kartezijevim koordinatama, na način da svaka ćelija predstavlja pravokutnu površinu istovjetne veličine, neovisno o udaljenosti od lokacije radara (slika 1). Problem nepouzdanosti mjerenja zbog horizontalnog pomaka, uslijed djelovanja vjetrova, pokušao se umanjiti uzimajući u obzir nekoliko različitih veličina utjecajnih površina: 200 x 200 m, 500 x 500 m, 1 x 1 km te 2 x 2 km. Preliminarnim analizama pokazalo se kako utjecajna površina veličine 1 x 1 km daje najbolja poklapanja sa zabilježenim oborinama te je ista odabrana kao mjerodavna za daljnja razmatranja (Kravica et al., 2013.).

### 3.2. Hidrološki podaci s meteoroloških postaja

Glavna meteorološka postaja Rijeka nalazi se na udaljenosti 2,1 km od radara, na nadmorskoj visini 120 m nm, dok se meteorološka postaja Grohovo nalazi se na brani Valiči, udaljenoj 4,9 km od radara, na nadmorskoj visini 223 m nm. Na meteorološkoj postaji Rijeka nalazi se pluviograf (na principu plovka s grijanjem) s kojega se očitavaju 5-minutne količine oborina. Na postaji Grohovo nalazi se nifograf – samopražnjiva klackalica s lijevkom, rezolucije 0,2 mm s kojeg se očitavaju 10-minutne količine oborina. Ove stanice su odabrane zbog male udaljenosti od radara, kako bi se utjecaj atenuacije sveo na minimum (slika 2).

Uzimajući u obzir nerazmjernost vremenskog zapisa radara i ombrografa, svi podatci su svedeni na najveći zajednički nazivnik; 10-minutni zapis. Radarski podatci o reflektivnosti su uprosječeni na 10-minutnu vrijednost, dok su 5-minutni podatci o zabilježenoj oborini s meteorološke postaje Rijeka zbrojeni na 10-minutne podatke te preračunati u odgovarajuće intenzitete.

Analiza je provedena na nizu dnevnih oborina zabilježenih na meteorološkim postajama Rijeka i Grohovo u razdoblju od 1. studenog 2012. do 1. svibnja 2013. Odabrani su samo oni kišni događaji u zadanom razdoblju koji zadovoljavaju uvjet da je dnevna količina oborine zabilježena na obje stanice prelazila vrijednost od 10 mm. Izuzeti su slučajevi snježne oborine (početak veljače 2013.), jedan događaj u kojem je zabilježen vrlo snažan utjecaj pojasa pojačane reflektivnosti te još nekoliko kišnih događaja kada radar privremeno nije bio u funkciji. Nakon provedenog odabira preostalo je ukupno 18 kišnih događaja prihvatljivih za detaljnu ocjenu preciznosti procjene oborine pomoću radara (slika 3). Kako bi se pružile sve relevantne informacije o analiziranim oborinama, na slici 4 se prikazuju i kumulativne oborine za svaku navedenu kišnu epizodu.

## 4. METODOLOGIJA

Procjena intenziteta oborine  $R$  pomoću izmjerenog faktora reflektivnosti  $Z$  je izrazito složen postupak, posebice ako se uzme u obzir kako je potrebno odrediti intenzitet oborine na tlu poznavajući jedino izmjereni faktor reflektivnosti volumena oborine na različitim visinama. Kalibracija radara izvršena je odabirom optimalne Z-R veze na sljedeći način:

- U programskom paketu MATLAB izrađen je algoritam pomoću kojeg je za svaku kombinaciju koeficijenata  $a$  i  $b$  u rasponu od  $a = [1..300]$  i  $b = [1..3]$  izračunat intenzitet oborine  $R$  koristeći prosječne 10-minutne faktore reflektivnosti  $Z$  za sve kišne događaje u razdoblju od studenog 2012. do svibnja 2013.
- Niz izračunatih intenziteta oborine s radara uspoređen je s intenzitetima oborine zabilježenima na oba ombrografa (Rijeka i Grohovo)
- Navedeni nizovi podataka su analizirani pomoću nekoliko statističkih pokazatelja, kako bi se dobio onaj par koeficijenata ( $a$ ,  $b$ ) jednadžbe (2) za koji postoji najmanje odstupanje između radarskih i ombrografskih podataka.

Analiza poklapanja nizova podataka s radara i ombrografa provedena je pomoću sljedećih statističkih pokazatelja:

Pearsonov koeficijent korelacije

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

srednja kvadratna pogreška (eng. root mean square error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (5)$$

srednja apsolutna pogreška (eng. mean absolute error)

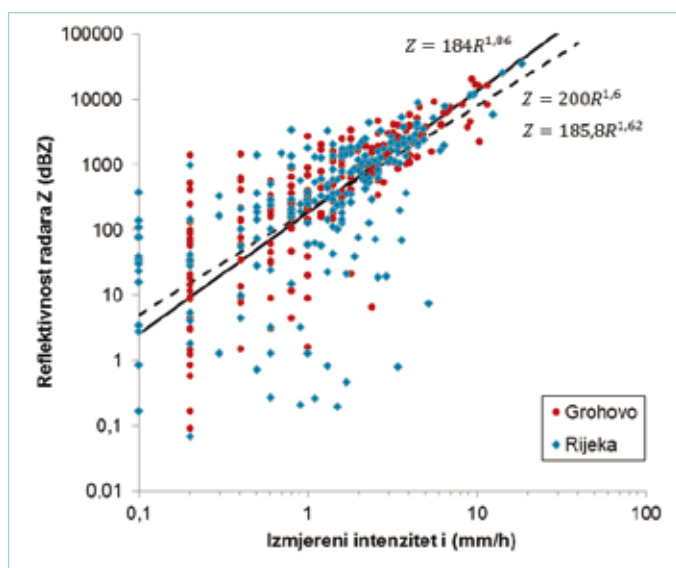
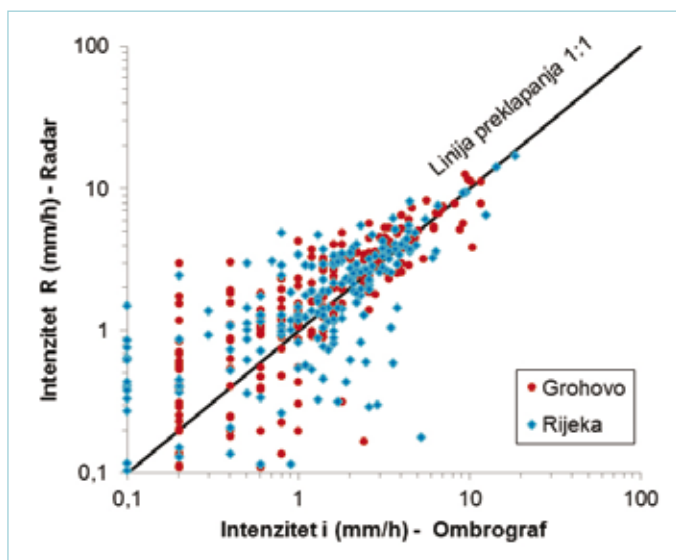
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad (6)$$

i srednja pogreška (eng. mean bias error),

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n} \quad (7)$$

Tablica 1. Odabir optimalnih koeficijenata  $a$  i  $b$  te statistički pokazatelji korelacije i pogreške

| r.br. | $a$        | $b$         | $r$          | RMSE        | MAE         | MBE          |
|-------|------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| 1     | 240        | 1,37        | <b>0,804</b> | 2,62        | 1,40        | -0,60        |
| 2     | 298        | 1,71        | 0,793        | <b>1,42</b> | 0,82        | 0,29         |
| 3     | 297        | 1,73        | 0,792        | 1,42        | <b>0,81</b> | 0,31         |
| 4     | 161        | 1,97        | 0,776        | 1,46        | 0,88        | <b>0,00</b>  |
| 5     | <b>184</b> | <b>1,86</b> | <b>0,784</b> | <b>1,46</b> | <b>0,88</b> | <b>0,001</b> |
| 6     | 200        | 1,6         | 0,798        | 1,82        | 1,11        | -0,31        |
| 7     | 186        | 1,62        | 0,799        | 1,86        | 1,15        | -0,37        |

Slika 5. Korelacija 10-min intenziteta oborine  $R$  zabilježenih na ombrografima te faktora reflektivnosti  $Z$ 

Slika 6. Korelacija 10-min intenziteta oborina zabilježenih na ombrografima te proračunatih intenziteta oborine pomoću Z-R jednadžbe (8)

gdje je  $x$  intenzitet oborine zabilježen na ombrografima Rijeka i Grohovo,  $y$  intenzitet oborine izračunat prema Z-R vezi na osnovu podataka s radara.

Nakon što su odabrani odgovarajući  $a$  i  $b$  koeficijenti, tj. definirana Z-R jednadžba za riječko područje, provedena je ocjena preciznosti radara u procjeni oborina usporedbom satnih intenziteta oborine s radara i zabilježenih oborina na obje meteorološke postaje tijekom svih 18 kišnih događaja.

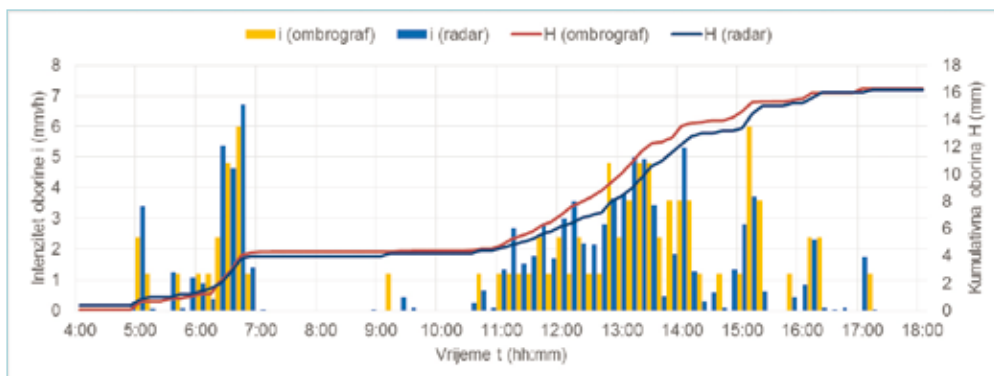
## 5. REZULTATI

U potrazi za optimalnom Z-R vezom, analizirane su sve kombinacije koeficijenata  $a$  i  $b$  u rasponu od  $0 < a < 300$  i  $1 < b < 3$ . Za svaki par  $(a, b)$  izračunat je koeficijent korelacije  $r$  (jednadžba 4) i pokazatelji pogreške  $RMSE$ ,  $MAE$ ,  $MBE$  (jednadžbe 5-7). U tablici 1 prikazani su oni parovi  $(a, b)$  koji imaju najbolje pojedine statističke pokazatelje; najveći koeficijent korelacije  $r$  (redak 1), odnosno najmanje pokazatelje pogrešaka  $RMSE$  (redak 2),  $MAE$  (redak 3) i  $MBE$  (redak 4). Također, u tablici 1 navedeni pokazatelji su dodatno prikazani i za Marshallovu Z-R jednadžbu (redak 6) opisanu jednadžbom (2) te Furuno Z-R jednadžbu (redak 7) opisanu jednadžbom (3).

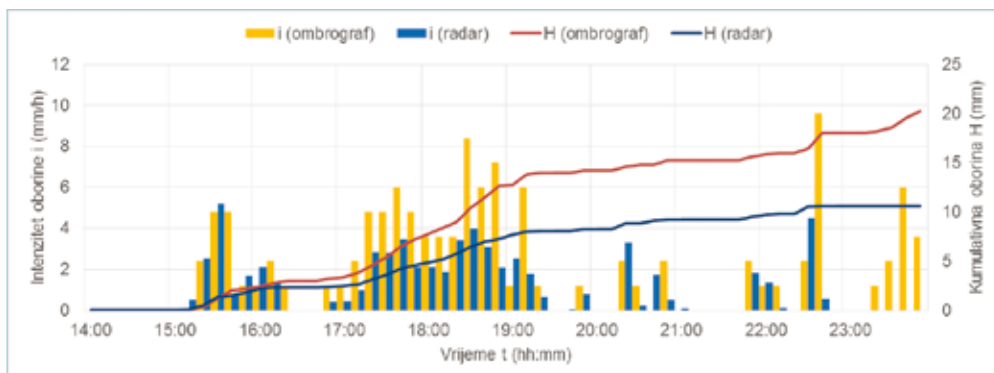
Promatrajući prva četiri reda u tablici 1, može se primijetiti da iako je svaki od prikazanih  $(a, b)$  parova pokazao najpovoljniji pojedini pokazatelj, niti jedan od njih nije dao zadovoljavajuću ukupnu statističku sliku poklapanja dva niza podataka. Naime, za onaj  $(a, b)$  par s najvećim koeficijentom korelacije  $r$  (tablica 1, redak 1) svi su ostali pokazatelji pogreške značajno odstupali od minimalnih vrijednosti. Također, za par  $(a, b)$  s najmanjim vrijednostima  $RMSE$  i  $MAE$  (tablica 1, redak 2 i 3) radarska je jednadžba precjenjivala izmjerene vrijednosti (pozitivna srednja pogreška,  $MBE$ ). Za par  $(a, b)$  s najmanjom srednjom greškom ( $MBE$ ), koeficijent korelacije je bio najniži među svim razmatranim jednadžbama (tablica 1, redak 4). Očito je kako odabir samo jednog pokazatelja ne daje zadovoljavajući rezultat. Uz to, u literaturi ne postoje jasni kriteriji kojima bi se mogao ponderirati utjecaj pojedinih pokazatelja na ukupnu preciznost Z-R jednadžbe. Zbog svega navedenog, dodatno je odabran i onaj  $(a, b)$  par s nižim greškama sva tri pokazatelja ( $RMSE=1,46$  u odnosu na minimalnih 1,42;  $MAE=0,88$  u odnosu na minimalnih 0,81;  $MBE=0,001$  u odnosu na minimalnih 0,0) i visokim koeficijentom korelacije ( $r=0,78$  u odnosu na maksimalnih 0,8), te je isti odabran kao optimalan (tablica 1, redak 5):

$$Z = 184 \cdot R^{1.86} \quad (8)$$

Zanimljivo je napomenuti kako su i Marshallova (2) i Furuno (3) Z-R jednadžba pokazale čak i nešto snažniji koeficijent korelacije  $r$  od jednadžbe (8), ali su svi ostali pokazatelji pogreške bili znatno veći (6. i 7. red, tablica 1).



Slika 7. Usporedba 10-min intenziteta oborine  $i$  te kumulativne količine oborina  $H$  s ombrografa Grohovo i radara dana 4. prosinca 2012.



Slika 8. Usporedba 10-min intenziteta oborine  $i$  te kumulativne količine oborina  $H$  s ombrografa Grohovo i radara dana 5. veljače 2013.

Grafički prikaz usporedbe intenziteta oborine  $R$  (zabilježenih na postaji Grohovo i Rijeka) te faktora reflektivnosti  $Z$  prikazan je na slici 5, dok je na slici 6 prikazana usporedba intenziteta oborina zabilježenih na oba ombrografa i intenziteta oborina proračunatih na osnovu Z-R jednadžbe (8) prema podacima s radara.

Promatrajući ukupnu statističku sliku, može se reći kako više od pola analiziranih događaja ukazuje na vrlo snažnu korelacijsku vezu  $r > 0,75$  (23 od 36 slučajeva), a samo 5 slučajeva na slabu korelacijsku vezu,  $r < 0,5$ . Prosječna  $RMSE$  greška se kreće oko 1,2 mm/h, a apsolutna  $MAE$  greška oko 0,8 mm/h (minimalna greška iznosi 0,35 mm/h, a maksimalna 2,57 mm/h). Ukupna pozitivna pogreška  $MBE$  pak ukazuje na laganu tendenciju podcjenjivanja radara, iako postoji i nekoliko slučajeva u kojima radar precjenjuje intenzitet oborine.

Za detaljnije hidrološke analize, osim ukupne dnevne oborine, potrebno je poznavati i unutar dnevnu raspodjelu intenziteta. Zbog navedenog, u nastavku se daje prikaz usporedbe 10-minutnih intenziteta oborine zabilježenih na meteorološkoj postaji Grohovo i izračunatih vrijednost intenziteta oborine pomoću Z-R jednadžbe (8) prema podacima s radara. Kišni događaj dana 4. prosinca 2012. daje se kao primjer vrlo dobrog poklapanja radara i ombrografa (slika 7), dok se događaj dana 5. veljače 2013. daje kao primjer najizraženijeg odstupanja radarskih podataka (slika 8).

## 6. ZAKLJUČAK

Analize procjene intenziteta oborine pomoću X-band radara provedena je usporedbom s zabilježenim oborinama na dva ombrografa. Analizirano je ukupno 18 kišnih događaja u razdoblju od studenog 2012. do svibnja 2013. Kalibracijom radara traženi su oni koeficijenti Z-R jednadžbe za koje provedena statistička analiza daje ukupno najveći koeficijent korelacije, ali i minimalne vrijednosti ostalih pokazatelja pogreške (srednja kvadratna pogreška, srednja apsolutna pogreška, srednja ukupna pogreška i srednja pogreška). Pokazalo se kako za parametre  $a = 184$  i  $b = 1,86$  provedena analiza pokazuje manje ukupne pogreške u odnosu na dosada korištenu Marshallovu i Furuno Z-R vezu, uz veći koeficijent korelacije. Izmjereni faktori reflektivnosti s radara preračunati su u vrijednosti intenziteta oborine pomoću izraza  $Z=184R^{1,86}$  te uspoređeni sa zabilježenim količinama oborina na ombrografima meteoroloških postaja Rijeka i Grohovo. Analizom svih kišnih događaja pojedinačno, pokazalo se da usporedba podataka s radara i ombrografa u 64% događaja pokazuje vrlo snažnu korelacijsku vezu, ali da postoje i događaji u kojem rezultati upućuju na vrlo slabu korelacijsku vezu (14% slučajeva). Prosječna statistička pogreška intenziteta oborine kreće se oko 1,2 mm/h za  $RMSE$  pokazatelj te 0,8 mm/h za  $MAE$  pokazatelj. Pozitivna prosječna vrijednost  $MBE=0,4$  mm/h ukazuje na činjenicu da izmjereni podatci s radara u prosjeku imaju blagu tendenciju podcjenjivanja oborine.

Treba napomenuti kako analizirane dnevne količine oborine nisu prelazile vrijednost od 70 mm te da maksimalni zabilježeni 10-minutni intenzitet u promatranom razdoblju nije prelazio vrijednost od 20 mm/h. Navedeno upućuje na činjenicu kako je potreban duži niz promatranja u kojem će se obuhvatiti više vrsta oborine te nekoliko pojava ekstremnih kratkotrajnih oborina na riječkom području, poput one 12. rujna 2012. ili 29. rujna 2013. godine, kako bi se s većom sigurnosti moglo ocijeniti kolika je pouzdanost mjerenja ekstremnih oborina ovim tipom radara.

Iako se ombrografske postaje Grohovo i Rijeka nalaze u blizini radara, zasigurno bi se preciznost radara dodatno poboljšala kada bi se primijenile i neke od naprednijih metoda ispravljanja nepouzdanosti, ne samo atenuacije, već i utjecaja vjetra, atmosferske refrakcije, pojasa pojačane reflektivnosti i sl. Također, svakako bi bilo korisno u analizu uključiti i dodatne ombrografske postaje na području Grada Rijeke (u nadležnosti ViK Rijeka). U tom slučaju analiza intenziteta oborina s više postaja rezultirala bi odabirom najpovoljnije stanice čiji rad bi se automatizirao s ciljem kalibracije radara u realnom vremenu, što bi dodatno povećalo preciznost izmjerenih intenziteta ekstremnih kratkotrajnih oborina.

Zaključno možemo reći da se analiziranim radarom može umjereno uspješno mjeriti prostorna raspodjela oborina na riječkom području te kako za određene kišne događaje radar vrlo precizno mjeri intenzitet oborine,

dok nažalost, i nakon provedene kalibracije još uvijek postoje određeni kišni događaji kada radar podcjenjuje ili precjenjuje intenzitet oborine. Svakako je obećavajuća i činjenica da je X-band radar korišten u ovoj analizi nedavno nadograđen i trenutno radi u polarimetrijskom modu koji pruža znatno preciznije mogućnosti u mjerenju intenziteta oborine. Ocjena pouzdanosti novog načina funkcioniranja prikazat će se u nekom od sljedećih radova nakon što se prikupi i obradi dovoljan niz podataka. Također, u nekom od sljedećih radova planira se prikazati i utjecaj različitih ulaznih podataka (jedan ili više ombrografa te radarska snimka oborine) u hidrološkim modelima površinskog otjecanja oborine u slivu Rječine.

## ZAHVALA

Istraživanja prezentirana u ovom radu provedena su u sklopu bilateralnog hrvatsko-japanskog projekta „Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje nepogoda kod odrona zemlje i poplava u Hrvatskoj“. Također, dio istraživanja su sufinancirali Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske projektom „Hidrologija osjetljivih vodnih resursa u kršu“ (114-0982709-2549) te Sveučilište u Rijeci projektom „Hidrologija vodnih resursa i identifikacija rizika od poplava i blatnih tokova na krškom području“ (13.05.1.1.03). ■



## LITERATURA

- Battan, L. J. (1973.): *Radar observations of the atmosphere*, University of Chicago Press, 323.
- Berne, A.; Delrieu, J.; Creutin, J. & Obled, C. (2004.): Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology*. 299. 166-179.
- Berne, A.; Uijlenhoet, R. (2006.): Quantitative analysis of X-band weather radar attenuation correction accuracy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 6. 419-425.
- Borga, M. (2002.): Accuracy of radar rainfall estimates for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*. 267. 26-39.
- Creutin, J.D.; Borga, M. (2003.): Radar hydrology modifies the monitoring of flash flood hazard. *Hydrological Processes*. 17 (7). 1453-1456.
- Kavetski, D.; Franks, S.; Kuczera, G. (2002.): Confronting input uncertainty in environmental modelling. *Calibration of watershed models*. AGU. 49-68.
- Krajewski, W. F.; Smith, J. A. (2002.): Radar hydrology: rainfall estimation. *Advances in Water Resources*. 25. 1387 - 1394.
- Kravica, N.; Ružić, I.; Yamashiki, Y.; Ožanić, N. (2013.): Performance analysis of X-band radar rainfall measurements in the Kvarner region. *4th Workshop of the Japanese-Croatian Project on Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia*, Split, Croatia.
- Lipovščak, B. (2016.): Meteo radar network in Croatia, presentation, OPERA IPMA
- Marshall, J. S.; Palmer, W. M. (1948.): The Distribution of Rainfall drops with Size. *Journal of Meteorology*. 5. 165-166.
- Minowa, M. (2013.): *Precipitation Intensity Calculation*. Furuno.internadokumentacija.
- Moreau, E.; Testud, J.; Le Bouar, E. (2009.): Rainfall spatial variability observed by X-band weather radar and its implication for the accuracy of rainfall estimates. *Advances in Water Resources*. 32. 1011-1019.
- Overeem, A.; Buishand, T. A.; Holleman, I. (2004.): Extreme rainfall analysis and estimation of depth-duration-frequency curves using weather radar. *Water Resource Research*. 45.
- Rinehart, R. E. (2004.): *Radar for meteorologists*. Rinehart Publications, Grand Forks.
- Thorndahl, S. and Rasmussen M. R. (2012.): Marine X-band weather radar data calibration modeling. *Atmospheric Research*. 103. 33-44.
- Van de Beek, C.Z., Leijnse, H., Stricker, J. N. M., Uijlenhoet, R., and Russchenberg, H. W. J. (2010.): Performance of high-resolution X-band radar for rainfall measurement in The Netherlands. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14. 205-221.
- Verdecchia, M.; Coppola, E.; Faccani, C.; Ferreti, R.; Memmo, A.; Montopoli, M.; Rivolta, G.; Paolucci, T.; Picciotti, E.; Santacasa, A.; Tomassetti, B.; Visconti, G.; Marzani, F.S. (2008.): Flood forecast in complex orography coupling distributed hydro-meteorological models and in-situ and remote sensing data. *Meteorol. Atmos. Phys.* 101. 267-285.

## ANALYSIS OF RAINFALL INTENSITY ASSESSMENT USING THE X-BAND RADAR

**Abstract.** On an orographically complex, hilly terrain, not even a larger number of ombrographs is sometimes sufficient to accurately measure the spatial distribution of rainfall intensity, due to which weather radars are increasingly used as part of the hydrological analysis in recent times. This paper presents the analysis of the X-band radar reliability in the rainfall intensity assessment in semi-annual series of rainfall events in the Rijeka area. The radar-measured values were compared with the values obtained from two ombrographs, and a new Z-R radar equation was determined. After the implemented calibration, it was determined that the radar made very accurate assessments of the spatial distribution of rainfall intensity in 64% of the recorded cases, although in 14% of the recorded cases the assessments were very poor.

**Key words:** rainfall intensity, spatial distribution of rainfall, weather radar, X-band, Z-R equation

## ANALYSE DER BESTIMMUNG DER NIEDERSCHLAGSINTENSITÄT UNTER EINSATZ VOM X-BAND RADAR

**Zusammenfassung.** Im orographisch komplexen und gebirgigen Gelände reichen manchmal sogar mehrere Ombrographen nicht, um räumliche Verteilung der Niederschlagsmengen präzise zu messen. Aus diesem Grunde werden neulich immer mehr Wetterradargeräte in den hydrologischen Analysen eingesetzt. In dieser Arbeit wird die Analyse der Verlässlichkeit des X-Band Radars in der Bestimmung der Niederschlagsintensität in der halbjährigen Reihe von Regenbeobachtungen auf dem Gebiet der Stadt Rijeka dargestellt. Die vom Radargerät gemessenen Werte wurden mit zwei Ombrographen verglichen, und eine neue Z-R Beziehung wurde abgeleitet. Nach der durchgeführten Kalibrierung konnte man feststellen, dass in 64% aller beobachteten Fälle der Radar die räumliche Verteilung der Niederschlagsmengen sehr gut bestimmt hat, obwohl es auch 14% Fälle gab, in welchen sehr schlechte Bestimmung vergeben wurde.

**Schlüsselwörter:** Niederschlagsintensität, räumliche Verteilung des Niederschlags, Wetterradar, X-Band, Z-R Beziehung