

DIGITALNA GODIŠNJA OBORINSKA KARTA HRVATSKE

A Digital Annual Precipitation Map of Croatia

MARJANA GAJIĆ-ČAPKA, MELITA PERČEC TADIĆ i MIRTA PATARČIĆ

Državni hidrometeorološki zavod
Grič 3, 10000 Zagreb, Hrvatska
capka@cirus.dhz.hr

Primljeno 30. rujna 2002, u konačnom obliku 19. ožujka 2004.

Sažetak: Zahtjevi za informacijama o prirodnim karakteristikama prostora u digitalnom obliku dovode do razvoja metoda za prikaz razdioba klimatskih elemenata unutar Geografskog informacijskog sustava (GIS). U ovom radu prikazana je izrada digitalne karte srednje godišnje količine oborine i opis osnovnih obilježja prostorne raspodjele oborine na orografski složenom području Hrvatske. Korišteni su podaci iz razdoblja 1961–1990. koje Svjetska meteorološka organizacija preporučuje kao posljednje standardno razdoblje za klimatološku analizu. Digitalna oborinska karta dobivena je primjenom linearnog regresijskog modela, koji povezuje količinu oborine na postajama (zavisne varijable) sa zemljopisnom dužinom i širinom, nadmorskom visinom i udaljenosti od mora (nezavisne varijable). Preliminarno procijenjene količine oborine u točkama kvadratne mreže rezolucije 700 m korigirane su pomoću razlika između mjerenih i regresijskim modelom izračunatih vrijednosti. Na većim su se nadmorskim visinama zbog nagle promjene nadmorske visine, lošije korelacije između količine oborine i nezavisnih varijabli u regresijskom modelu i nedovoljne prostorne rezolucije modela terena javile pogreške, pa su provedene korekcije na temelju prethodno određenih regionalnih vertikalnih gradijenata oborine. Godišnje količine oborine u Hrvatskoj najmanje su na vanjskim otocima južnog Jadrana (oko 300 mm) te u istočnom ravničarskom području (600 mm), a najviše u Gorskom kotaru, na Velebitu i obroncima planina sjeveroistočno od konavoskog polja (više od 3000 mm).

Ključne riječi: oborina, digitalna oborinska karta, karta izohijeta, vertikalni gradijenti količine oborine, linearna regresija, kriging, GIS, Hrvatska

Abstract: Requests for information in digital form about the natural characteristics of the environment led to the development of methods for modelling and mapping the distribution of climate variables in the Geographical Information System (GIS). This paper deals with the mapping of the mean annual precipitation and the description of the essential spatial characteristics of precipitation over the complex terrain of Croatia. Data from the period 1961–1990 have been used (the last World Meteorological Organisation (WMO) standard period for climate analysis). A linear regression model has been applied to produce the digital annual precipitation map. The model gives the relationship between precipitation at measurement points, as a dependent variable, and longitude, latitude, altitude and distance from the sea as independent variables. The preliminary estimated precipitation amounts in the grid points with a resolution of 700 m have been corrected according to the difference between measured and estimated values. At higher altitudes, due to a rapid change in height, a weaker correlation between precipitation and predictors and a low spatial resolution of the terrain model, there appeared errors, which have been corrected using regional vertical precipitation gradients calculated in the context of this investigation. The annual precipitation over Croatia appears to be the lowest over the southeastern Adriatic islands (about 300 mm) and over the eastmost lowland (about 600 mm). The highest amounts are in the mountainous region of Gorski kotar, over the Velebit Mountain and on the mountain slopes at the northeast of the Konavli field in the hinterland of Dubrovnik (more than 3000 mm).

Key words: precipitation, digital precipitation map, isohyetal map, vertical precipitation gradient, linear regression, kriging, GIS, Croatia

1. UVOD

Karte prostorne raspodjele klimatskih elemenata za područje Hrvatske postoje u Atlasu klime SFR Jugoslavije, koji je izrađen prema podacima iz razdoblja 1931–1960. (Atlas klime SFRJ, 1969). U okviru tog atlasa izrađene su mjesečne i godišnje karte izohijeta (Ranković, Radičević i Sokolović-Ilić, 1981). Za isto je razdoblje Republički hidrometeorološki zavod SR Hrvatske izdao atlas klime za područje Hrvatske (Atlas klime SR Hrvatske, 1977), koji sadrži odabrane klimatske karte s tekstualnim opisom i grafičkim prikazima godišnjih hodova za sve odabrane klimatske elemente. Poslije je za potrebe gospodarstva u Državnom hidrometeorološkom zavodu izrađena karta prostorne raspodjele srednje godišnje količine oborine na području Hrvatske prema podacima iz 10-godišnjeg razdoblja 1969–1978. (Pleško i dr., 1984, Gajić-Čapka i dr., 1985). Sve veći zahtjevi za prostornim informacijama u geografskom informacijskom sustavu (GIS), potaknuli su izradu prostornih procjena različitih klimatskih parametara u Hrvatskoj u pravilnoj mreži točaka. U prvom koraku provedena je prostorna analiza oborine i izrađena je digitalna karta srednje godišnje količine oborine za razdoblje 1961–1990.

2. PODACI

Oborina je vremenski i prostorno vrlo promjenljiv meteorološki element. Stoga je za poznavanje njezina prosječnog režima potrebno raspolagati višegodišnjim nizovima podataka i gušćom mrežom postaja no što je to potrebno za većinu drugih klimatskih elementa.

Prema rezultatima ispitivanja normalne duljine niza srednjih godišnjih količina oborine utvrđeno je da 30-godišnje razdoblje prikazuje

stabilne karakteristike režima godišnjih količina oborine (Pleško i Šinik, 1968). Stoga se analiza prostorne raspodjele srednjih godišnjih količina oborine u Hrvatskoj temelji na 30-godišnjem razdoblju 1961–1990., koje Svjetska meteorološka organizacija preporučuje za izradu klimatskih atlasa pojedinih zemalja.

Regionalni vertikalni gradijenti godišnjih količina oborine izračunati su pomoću podataka s 34 glavne meteorološke postaje, 97 klimatoloških, 370 kišomjernih postaja i 21 totalizatora te 8 meteoroloških postaja iz Bosne i Hercegovine.

Za izradu digitalne karte srednjih godišnjih količina oborine korišteni su podaci sa 643 meteorološke postaje (tab. 1).

U slabo naseljenim područjima na većim visinama u planinama raspolagalo se podacima totalizatora koji daju uvid u specifične oborinske prilike visokogorja na temelju mjerenja ukupne godišnje ili polugodišnje količine oborine pražnjenjem totalizatora jednom ili dva puta godišnje. Za potrebe crtanja digitalne oborinske karte na graničnim područjima, posebice s razvijenom orografijom, bilo je nužno korištenje i podataka iz susjednih zemalja. U analizu su uključeni podaci s meteoroloških postaja u pograničnom području Slovenije (Klimatografija Slovenije, 1995), Bosne i Hercegovine i Crne Gore (Atlas klime SFRJ, 1969).

Ispitana je kvaliteta svih raspoloživih nizova oborinskih podataka s glavnih i običnih (klimatoloških) meteoroloških postaja, kao i nizova s kišomjernih postaja i totalizatora.

Interpolacija mjesečnih vrijednosti provedena je za glavne i klimatološke postaje u slučajevi-

Tablica 1. Broj meteoroloških postaja u Hrvatskoj i susjednim zemljama korištenih pri izradi digitalne karte srednje godišnje količine oborine

Table 1. The number of meteorological stations in Croatia and neighbouring countries used in producing the digital precipitation map

Tip postaje	Hrvatska	B i H	Crna Gora	Slovenija	Ukupno
Glavna	38	2	1		41
Klimatološka	110	18	2	9	139
Kišomjerna	419	13	9		441
Totalizator	22				22
Ukupno	589	33	12	9	643

ma kada je u godini nedostajalo najviše pet mjesečnih vrijednosti. Nedostajući podaci interpolirani su pomoću potpunih nizova susjednih meteoroloških postaja. U godinama u kojima je nedostajalo više od pet mjesečnih vrijednosti, nedostajući podaci nisu interpolirani, već je postojeći niz godišnjih količina oborine reduciran na normalno razdoblje također pomoću potpunih nizova susjednih postaja.

U oborinskim nizovima kišomjernih postaja mjesečne vrijednosti nisu interpolirane zbog velikog broja tih postaja i nedostajućih podataka. Interpolirane su godišnje količine oborine kada je u razdoblju 1961–1990. nedostajalo do deset vrijednosti. Ako je u nizu nedostajalo više od deset godišnjih vrijednosti, ali manje od dvadeset, srednja godišnja vrijednost postojećeg niza je reducirana na srednjak za razdoblje 1961–1990. pomoću potpunih nizova susjednih postaja.

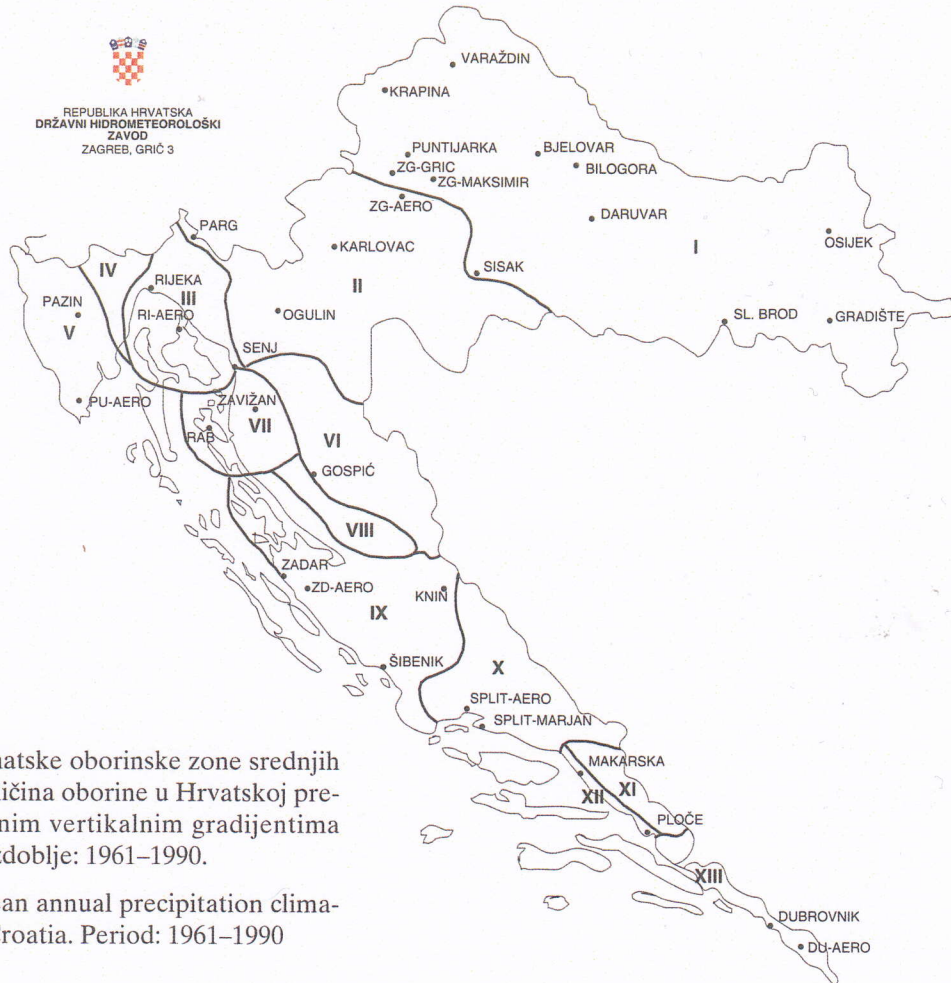
3. REGIONALNI VERTIKALNI GRADIJENTI GODIŠNJIH KOLIČINA OBORINE

Oborine koje padnu na području Hrvatske posljedica su prolaska ciklona i s njima u vezi atmosferskih fronti u sklopu opće cirkulacije atmosfere. Hoće li oborina pasti i u kojoj količini na pojedinom mjestu, ovisi o vlažnosti zračne mase i intenzitetu i smjeru zračne struje, ali i o vertikalnoj komponenti njezina gibanja koju lokalni utjecaji mogu znatno modificirati. Lokalni čimbenici koji mogu pojačati ili oslabiti proces razvoja oblaka i stvaranja oborine posebno su prisutni u Hrvatskoj. To su odnos kopna i mora, odnosno udaljenost pojedinih lokacija od mora, zatim vrlo razvijena orografija Dinarida, koja je prepreka za maritimne zračne mase pri prijelazu sa Sredozemnog mora odnosno Jadrana na kopno i isto tako za kontinentalne zračne mase prema Sredozemlju. Istovremeno planine, ali i manja brda, u pojedinim vremenskim situacijama prisiljavaju zračne mase na dizanje, pri čemu dolazi do kondenzacije i intenziviranja oborine. Sve to utječe na režim promjene količine oborine s nadmorskom visinom i daje različite vertikalne gradijente oborine i na malim horizontalnim udaljenostima. U dosadašnjim istraživanjima koja su se bavila prostornom razdiobom godišnjih količina oborine pokazano je da na području Gorskog kotara koje je izloženo kišonosnoj struji, na istoj nadmorskoj visini, pa-

daju količine oborine veće od onih u zavjetrini (Penzar, 1959). U radu K. Pandžića (2000) analizom vektorskih srednjaka vjetra na plohi 850 mb također je pokazano da u danima s oborinom u Lici i Gorskom kotaru prevladava visinsko strujanje iz jugozapadnog smjera koje padinama izloženima tom smjeru vjetra donosi veće količine oborine u odnosu na prostore koji su zaklonjeni od smjera kišonosne struje.

Na osnovi izmjerenih godišnjih količina oborine na meteorološkim postajama i pripadnih nadmorskih visina, određene su metodom najmanjih kvadrata jednadžbe regresije, odnosno vertikalni gradijenti, koji opisuju promjenu količine oborine s visinom na određenom području (tab. 2). Prilagodba dobivenih teorijskih krivulja ispitana je koeficijentom determinacije (jedn. 3), koji je mjera slaganja krivulje i mjerenih vrijednosti. Granice područja unutar kojeg vrijedi ista ovisnost količine oborine o nadmorskoj visini pomicanje su dok nije dobiven visoki koeficijent determinacije. Na taj način u Hrvatskoj je određeno trinaest oborinskih zona (sl. 1), što upućuje na veliku varijabilnost oborinskih prilika, osobito u brdovitim i planinskim krajevima.

Na temelju dobivenih jednadžbi, poznavajući nadmorsku visinu, može se odrediti godišnja količina oborine na nekom mjestu. U zonama II–XIII pokazalo se da pravci najbolje određuju porast godišnje količine oborine s nadmorskom visinom, dok je u zoni I, koja obuhvaća najmanje brdoviti dio Hrvatske, promjena s visinom najbolje opisana logaritamskom krivuljom (sl. 2). Na tom području količina oborine raste brže na manjim nego na većim nadmorskim visinama. Koeficijenti determinacije u zonama II–IX te XII i XIII u rasponu su od 0.62 do 0.91, dok su u ostalim zonama vrijednosti nešto niže i kreću se od 0.38 do 0.55.



Slika 1. Klimatske oborinske zone srednjih godišnjih količina oborine u Hrvatskoj prema regionalnim vertikalnim gradijentima oborine. Razdoblje: 1961–1990.

Figure 1. Mean annual precipitation climate zones in Croatia. Period: 1961–1990

Tablica 2. Teorijska promjena godišnje količine oborine R (mm) s nadmorskom visinom z (m) i koeficijenti determinacije r^2 u svakoj od 13 klimatskih oborinskih zona

Table 2. The theoretical mean annual precipitation change R (mm) with altitude (z) and the coefficients of determination r^2 in each of the 13 precipitation climate zones

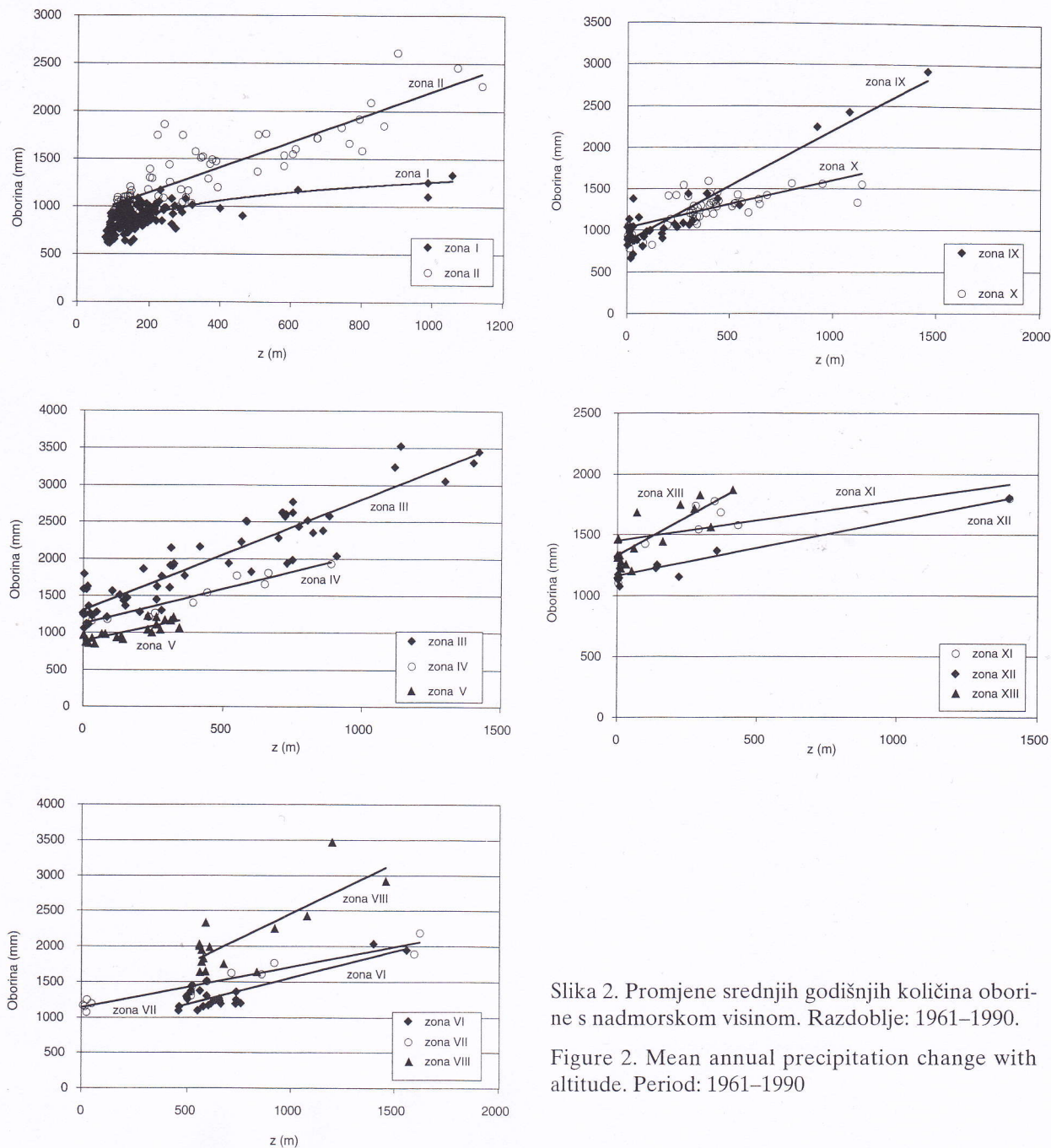
Zona	Jednadžba regresije	r^2
I	$R = 215.7 \ln z - 235.0$	0.55
II	$R = 1.33z + 876.6$	0.77
III	$R = 1.51z + 1297.4$	0.85
IV	$R = 0.93z + 1120.3$	0.91
V	$R = 0.80z + 888.0$	0.67
VI	$R = 0.74z + 809.0$	0.71
VII	$R = 0.57z + 1134.6$	0.92
VIII	$R = 1.43z + 1019.3$	0.62
IX	$R = 1.34z + 863.2$	0.88
X	$R = 0.57z + 1027.1$	0.51
XI	$R = 0.33z + 1449.8$	0.38
XII	$R = 0.45z + 1162.2$	0.87
XIII	$R = 1.28z + 1325.8$	0.66

Najbrži linearni porast oborine s nadmorskom visinom jest u zonama III i VIII (151 mm/100 m i 143 mm/100 m), koje obuhvaćaju orografski razvijene krajeve Hrvatske – u zoni III to je područje Gorskog kotara, a u zoni VIII područje južnog Velebita. Zbog izloženosti vlažnim strujama s Jadrana i Sredozemnog mora ta područja imaju i vrlo visok osnovni oborinski potencijal. To je količina oborine koja bi, prema jednadžbama regresije (tab. 2), pala na nadmorskoj visini $z=0$ m (1297 mm u zoni III i 1019 mm u zoni VIII).

Za razliku od južnog, sjeverni Velebit (zona VII) ima znatno sporiji porast količine oborine s visinom (57 mm/100 m) zbog slabije izloženosti kišonosnim južnim strujanjima.

U zonama II i IX vertikalni je gradijent također velik (oko 130 mm/100 m), ali je osnovni oborinski potencijal znatno manji nego u zonama III i VIII, što je posljedica veće udaljenosti od mora (zona II), odnosno manje brdovita terena (zona IX).

Zona IV i V, koje obuhvaćaju područje Istre, imaju slične vertikalne gradijente (93 mm/100 m



Slika 2. Promjene srednjih godišnjih količina oborine s nadmorskom visinom. Razdoblje: 1961–1990.

Figure 2. Mean annual precipitation change with altitude. Period: 1961–1990

u zoni IV i 80 mm/100 m u zoni V). Međutim, osnovni oborinski potencijal u orografski razvijenijoj zoni IV veći je za 232 mm.

Obalni dio južne Dalmacije i Dalmatinska zagora podijeljeni su u tri zone (X-XII), u kojima su vertikalni gradijenti mali (u zoni XI samo 33 mm/100 m), ali je osnovni oborinski potencijal na cijelom području veći od 1000 mm, a u zoni XI iznosi 1450 mm, što je najviše u Hrvatskoj.

Vrlo visok osnovni oborinski potencijal od 1326 mm ima i područje južno od Neretve (zona XIII), ali su tamo i promjene količine oborine s visinom izraženije (128 mm/100 m) zbog

dizanja vlažnih zračnih masa uz obronke koji leže u podnožju crnogorskih planina.

Za otočno područje, zbog velikih razlika u količini oborine i slabo razvijene orografije, nije bilo moguće odrediti vertikalne gradijente, odnosno izdvojiti jednu ili više oborinskih zona. Uključivanjem tog područja u kopnene zone uz obalu nisu dobiveni zadovoljavajući koeficijenti determinacije. Zbog toga za to područje nisu određeni vertikalni gradijenti. Izuzetak su otoci koji se nalaze blizu obale. Otok Krk i sjeverni dio Cresa pripadaju zoni III, Rab zoni VII, južni dio Paga i Vir zoni IX, dok je Lopud uključen u zonu XIII.

4. KLASIČNA KARTA SREDNJE GODIŠNJE KOLIČINE OBORINE

U prethodnom poglavlju opisani način definiranja oborinskih zona na temelju regionalno određenih vertikalnih gradijenata oborine bio je u dosadašnjoj klimatološkoj praksi osnova za izradu karata srednje godišnje količine oborine. Slijedeći izohipse i uvažavajući jednadžbe regresije, crtane su izohijete za čitavo područje analize. Prilikom mapiranja u orografski razvijenim područjima uvažavani su i lokalni parametri koji utječu na prostornu razdiobu oborine kao što je izloženost kišonosnoj struji (Penzar, 1959; Pandžić, 2000). U slučajevima kada su vrijednosti oborine izmjerene na postaji odstupale od vrijednosti predviđene jednadžbom regresije veću težinu imale su izmjerene vrijednosti.

Iako sveobuhvatna, ta metoda tehnički nije pogodna za izradu digitalne oborinske karte jer sadrži niz postupaka subjektivne analize, ali može se reći da je pri definiranju nove metode uspješno prihvaćena njena logika.

U spomenutom klasičnom načinu prostornog prikaza veza između količine oborine i nadmorske visine opisana je vertikalnim gradijentom srednje godišnje količine oborine. Međutim i horizontalna promjenjivost količine oborine implicitno je uvažena grupiranjem postaja u oborinske zone uvažavajući i vrijednosti osnovnog oborinskog potencijala. Te spoznaje poslužit će za definiranje varijabli koje dobro opisuju horizontalnu i vertikalnu promjenjivost količine oborine u novom geostatističkom modelu prostorne razdiobe srednje godišnje količine oborine.

5. DIGITALNA KARTA SREDNJE GODIŠNJE KOLIČINE OBORINE

Pri izradi digitalne karte oborine korištena je metoda prostorne analize koja se sastoji od definiranja numeričkog postupka kojim se na temelju podataka izmjerenih na nepravilno razmještenim meteorološkim postajama određuju vrijednosti na pravilnoj mreži, odnosno u točkama u kojima nema mjerenja. U tom je smislu to postupak prostornog predviđanja (eng. *spatial prediction*) (Cressie, 1993).

Za određivanje polja srednje godišnje količine oborine za cijelu Hrvatsku, definirana je kvadratna mreža točaka s rezolucijom 700 m, u kojima se računaju nepoznate vrijednosti. Tako

definirani elementi mreže, tzv. pikseli, osnova su rasterskog načina prostornog prikaza koji je ovdje korišten. Veličina piksela ograničena je rezolucijom raspoloživog digitalnog modela terena (DMT) (GISDATA, 1997).

U geostatističkim modelima prostorne analize analizirana se veličina, u našem slučaju oborina (R), rastavlja na determinističku i nedeterminističku komponentu (Cressie, 1993):

$$R(\mathbf{r}_k) = m(\mathbf{r}_k) + n(\mathbf{r}_k) \quad (1)$$

gdje je \mathbf{r}_k vektor položaja središta piksela.

Taj je rastav potpuno subjektivan s obzirom na izbor numeričkog postupka za određivanje determinističke ili komponente trenda $m(\mathbf{r}_k)$ i nedeterminističke ili slučajne komponente $n(\mathbf{r}_k)$. Komponenta trenda treba opisati dosadašnje znanje o prostornoj varijabilnosti pojave. To može biti model koji potpuno opisuje fiziku pojave (što je u meteorologiji rijetko moguće), ali i konstanta na čitavom području. Izborom modela trenda tako je definirano i koliko je prostorne varijabilnosti pojave sadržano u rezidualu (slučajna komponenta). U idealnom, prvom slučaju, kada je sva prostorna varijabilnost pojave opisana trendom, reziduali su potpuno slučajni, dok je za konstantan trend sva prostorna varijabilnost pojave sadržana u rezidualu. Cilj geostatističkih metoda prostorne analize jest trendom što bolje opisati prostornu varijabilnost pojave putem smislenog izbora varijabli koje je definiraju, a zatim preostalu varijabilnost opisati statistički.

Najčešće se za definiranje trenda koristi regresijska jednadžba kojom se nastoje potpuno opisati varijacije velike skale u srednjoj godišnjoj količini oborine. U regresijskom modelu koji opisuje varijabilnost oborine na nekom području najčešće korištena nezavisna varijabla jest nadmorska visina, što je vrlo slično klasičnom pristupu mapiranja oborine. Već iz analize regionalnih vertikalnih gradijenata oborine (tab. 2) vidi se da su oni na području Hrvatske različiti za pojedina geografska područja. Pokušaj da se jedinstveni vertikalni gradijent definira za cijelu Hrvatsku rezultirao je koeficijentom determinacije od samo 49%. Stoga se u regresijsku jednadžbu kao nezavisne varijable uvode i geografski položaj postaje te njena udaljenost od mora, tj. varijable kojima se nastoji opisati prostorna promjenjivost količine oborine.

Iz poznatih vrijednosti srednje godišnje količine oborine $R(\mathbf{r}_i)$ (gdje je \mathbf{r}_i vektor položaja meteorološke postaje) razvijen je linearni regresijski model (jedn. 2) koji daje vezu između srednje godišnje količine oborine kao zavisne te zemljopisne dužine i širine (x i y), nadmorske visine (z) i udaljenosti od mora (con) kao nezavisnih varijabli (Ninyerola i dr., 2000).

Koordinate x i y jesu kartografske koordinate u poprečnoj Mercatorovoj kartografskoj projekciji definiranoj parametrima:

središnja paralela: $0^\circ 0'$
 standardni meridijan: $16^\circ 30'$
 mjerilo na standardnom meridijanu: 0.9997
 elipsoid: Bassel 1841.

Nadmorska visina z jest visina u digitalnom modelu terena. Varijabla con definirana je kao najmanja udaljenost od morske granice. Regresijski model oborine ima oblik

$$\hat{R}(\mathbf{r}_k) = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 z + a_4 con \quad (2)$$

Tablica 3. Parametri regresijskog modela (jedn. 2)

Table 3. Regression model parameters (Eq. 2)

a_0	-30851.433973 mm
a_1	0.004270 mm m ⁻¹
a_2	0.004486 mm m ⁻¹
a_3	1.186232 mm m ⁻¹
a_4	-0.008214 mm m ⁻¹

Funkcija $\hat{R}(\mathbf{r}_i)$ najbolje aproksimira mjerenja u smislu da je kvadrat odstupanja predviđenih od izmjerenih vrijednosti u točkama mjerenja minimalan.

Predloženi model uspješno objašnjava 63% varijabilnosti oborine, što je ocijenjeno na temelju koeficijenta determinacije (jedn. 3) između izmjerenih i regresijskim modelom izračunatih količina oborine.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_i (R(\mathbf{r}_i) - \hat{R}(\mathbf{r}_i))^2}{\sum_i (R(\mathbf{r}_i) - \bar{R})^2} \quad (3)$$

Iz koeficijenta determinacije također se vidi da 37% varijabilnosti podataka oko regresijske

linije nije objašnjeno modelom. To su tzv. lokalna odstupanja izmjerenih vrijednosti od regresijske jednadžbe ili varijacije male skale:

$$o(\mathbf{r}_i) = R(\mathbf{r}_i) - \hat{R}(\mathbf{r}_i) \quad (4)$$

U idućem koraku ta odstupanja (jedn. 4) treba interpolirati na točke mreže. Rezidual u točki mreže $\hat{o}(\mathbf{r}_k)$ prikazan je kao linearna kombinacija odstupanja na postajama $o(\mathbf{r}_i)$:

$$\hat{o}(\mathbf{r}_k) = \sum_i w_i(\mathbf{r}_k) o(\mathbf{r}_i) \quad (5)$$

gdje je $w_i(\mathbf{r}_k)$ težina kojom rezidual na položaju \mathbf{r}_i doprinosi rezidualu u točki mreže \mathbf{r}_k . Težine se određuju za svaku točku posebno rješavanjem sistema jednadžbi na osnovu algoritma za kriging (modulom *Universal Kriging* programskog paketa *Ilwis (Ilwis 3.0 Academic)*). Metoda je razvijena 60-ih godina u rudarstvu, paralelno s radom L. S. Gandina (1963) na području meteorologije koji metodu naziva optimalna interpolacija.

Parametri modela za prostornu interpolaciju odstupanja na točke mreže određuju se na temelju eksperimentalnog semivariograma (jedn. 6):

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{(i,j)|h_{i,j}=h} [o(\mathbf{r}_i) - o(\mathbf{r}_j)]^2}{2n(h)} \quad (6)$$

Najprije se postaje grupiraju ovisno o međusobnoj udaljenosti h tako da u svakoj grupi bude najmanje 30 parova postaja, gdje je $n(h)$ broj parova u pojedinoj klasi udaljenosti. Odabrani interval h označava sredinu klase, tako da se u prvoj grupi ($h = 0$ m) nalaze svi parovi postaja udaljeni od 0 do $h/2$ km, u drugoj grupi ($h = 10000$ m) su parovi udaljeni $h/2$ do $3h/2$ itd. Prvi korak ($h = 10000$ m) obično se bira tako da bude jednak srednjoj udaljenosti između susjednih postaja.

Nakon toga se računaju semivariogrami za sve grupe udaljenosti postaja i na temelju grafa $\gamma(h)$ određuje se teorijski variogram $\hat{\gamma}(h)$ koji se najbolje prilagođava eksperimentalnom. Za teorijski variogram definiraju se tri parametra: $\hat{\gamma}(0)$ (eng. nugget), varijanca reziduala (eng. sill) i udaljenost h na kojoj semivariogram dostiže vrijednost varijance reziduala (eng. range). U korištenom modelu $\gamma(0)$ jest 0, varijanca reziduala jest 102400 mm², a srednja

udaljenost na kojoj semivariogram dosiže tu vrijednost jest 90 km. Osim tih parametara, u modelu je definirana i najveća udaljenost do postaja koje ulaze u proračun vrijednosti reziduala u točkama mreže i ona iznosi 40 km.

Tako dobiveno polje reziduala $\hat{o}(r_k)$ dodaje se polju koje je dobiveno regresijskom analizom $\hat{R}(r_k)$ i rezultat je digitalna karta srednje godišnje količine oborine dobivena geostatističkim modelom prostorne analize.

Srednje godišnje količine oborine prikazane su u klasama širine od 100 mm za količine oborine manje od 1000 mm. Količine oborine između 1000 i 2000 mm prikazane su u klasama širine 250 mm, a one veće od 2000 mm u klasama širine 500 mm.

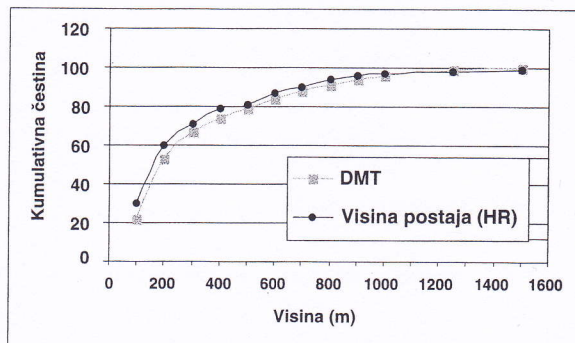
Karta je priložena na kraju rada.

Procjena uspješnosti tog pristupa teška je zbog toga što kriging kao metoda prostorne analize ispunjava zahtjev da je predviđena vrijednost $\hat{o}(r_i)$ jednaka stvarnoj vrijednosti $o(r_i)$ u točki mjerenja, pa je i geostatističkim modelom određena vrijednost oborine jednaka izmjerenoj $R(r_i)$. Zato se za ocjenu uspješnosti modela ne mogu koristiti uobičajene mjere kao što je npr. koeficijent determinacije između izmjerenih i predviđenih vrijednosti.

Karta srednje godišnje količine oborine kritički je vrlo detaljno analizirana. Uočeno je da regresijski model daje znatno lošije rezultate za veće nadmorske visine. Analiza apsolutnih vrijednosti reziduala $|o(r_i)|$ pokazala je da srednja vrijednost reziduala za postaje na nadmorskim visinama manjim od 800 m iznosi 191 mm, dok je na postajama višim od 800 m srednjak čak 583 mm. To pokazuje da dobra distribucija postaja s obzirom na distribuciju visine terena (sl. 3) nije dovoljna za zadovoljenje zahtijeva za gustoćom postaja na većim visinama. U analizu je uključeno 37 postaja viših od 800 m koje bi trebale biti reprezentativne za 4860 km² površine Hrvatske na nadmorskim visinama od 800 do 1762 m¹. To je prosječno jedna postaja na svakih 131 km², što znači da je svaka postaja reprezentativna za krug radijusa 6.5 km, tj. prosječna udaljenost između postaja je 13 km. S obzirom na to da se orografski efekti manifestiraju na skali 2–10 km ta

bi rezolucija trebala biti dovoljna. Međutim, to je srednje stanje na visinama većim od 800 m. Pravo stanje pokazuje da na pojedinim planinama višima od 800 m ili na dijelovima pojedinih planina višim od 800 m nema niti jedne postaje (sl. 4). To su Papuk, Žumberačka gora, Mala Kapela, najviši dijelovi Plješevice i Dinare (na kojoj postoje totalizatori Đudelijske na 950 m i Vaganj na 1140 m), Mosor te planinski obronci u zaleđu Konavala, i upravo su to područja gdje lokalni efekti najviše dolaze do izražaja, a greške u procjeni količine oborine tamo su najveće.

Stoga su na tim problematičnim područjima provedene korekcije izračunatog polja na temelju prethodno određenih regionalnih vertikalnih gradijenata oborine.



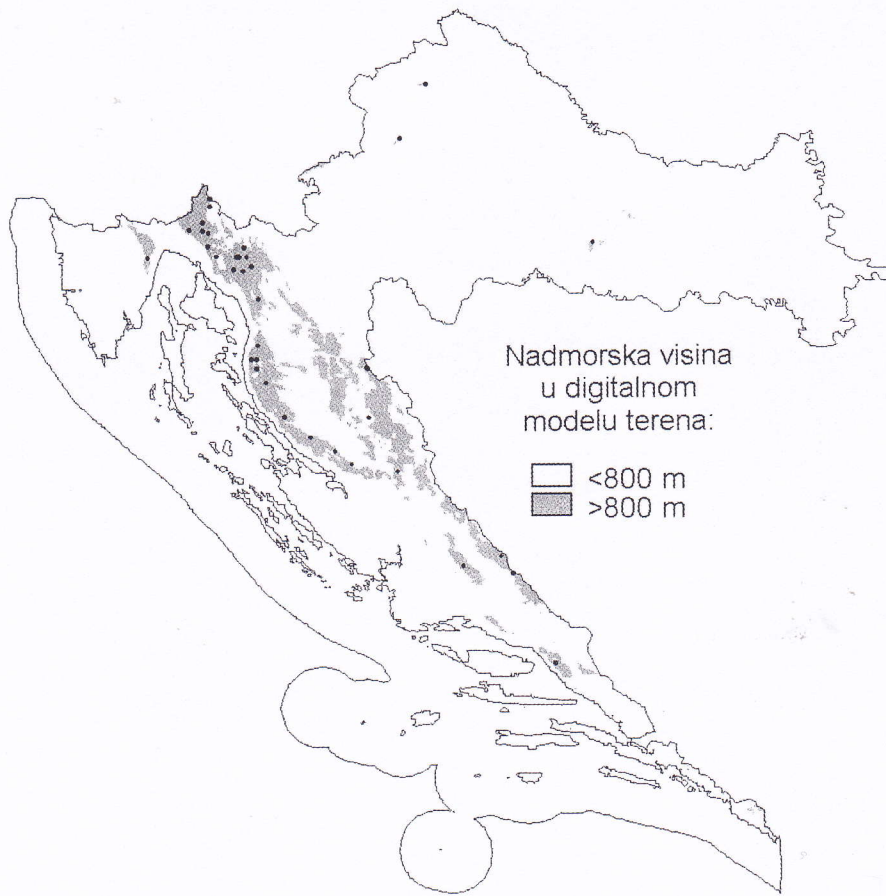
Slika 3. Udio visina terena u DMT i distribucija visina meteoroloških postaja ovisno o nadmorskoj visini u Hrvatskoj

Figure 3. Distribution of Croatian terrain and weather stations according to altitude

6. KARAKTERISTIKE PROSTORNE RASPODJELE GODIŠNJIH KOLIČINA OBORINE

Srednja godišnja količina oborine na području Hrvatske u rasponu je od oko 300 mm do nešto iznad 3500 mm. Najmanje godišnje količine oborine padnu na vanjskim otocima južnog Jadrana (Palagruža, 311 mm). Na otocima i obali srednje i sjeverne Dalmacije te na zapadnoj obali Istre može se očekivati oko 800–900 mm oborine na godinu. Što se više približavamo obali, količina oborine povećava se, posebno uz obronke planina zbog prisilnog dizanja zračnih masa.

¹ Ovo je najveća visina u korištenom DMT-a i predstavlja najviši vrh u Hrvatskoj, Sinjal na Dinari, koji je visok 1831 m, ali zbog rezolucije DMT-a ni ovaj, a niti ostali vrhovi nisu prikazani sa svojom stvarnom visinom.



Slika 4. Dijelovi Hrvatske na nadmorskim visinama većima od 800 m i meteorološke postaje koje su tamo postojale u razdoblju 1961–1990.

Figure 4. Parts of Croatia at altitudes higher than 800 m and the meteorological stations operating there in the period 1961–1990

U Istri su najveće količine oborine na obroncima Učke (od 2000 mm do 2500 mm), a jednake vrijednosti mogu se očekivati i na sjevernom dijelu Biokova.

Najveće godišnje količine oborine u Hrvatskoj prima Gorski kotar (od 3000 mm do iznad 3500 mm) te Velebit i sjeveroistočni obronci konavoskog polja (od 3000 mm do 3500 mm).

Gorski kotar je u neposrednoj blizini ciklogeničkog područja sjevernog Jadrana i Genovskog zaljeva, koje daje obilne oborine pojačane orografskim utjecajem gorovitog zaleđa duž primorja (Penzar, 1959; Penzar i dr., 2001). Na tom području količina oborine naglo se povećava s nadmorskom visinom na navjetrini od obale do Risnjaka i Snježnika. Najveće količine oborine izmjerene u Gorskom kotaru jesu na postajama Lividraga (3728 mm), Žilavi Dolci (3522 mm), Risnjak (3449 mm) i Snježnik (3302 mm). U dubinu Gorskog kotara količina oborine se smanjuje (Parg, 1849 mm).

Na vršnom području sjevernog Velebita padne godišnje u prosjeku oko 3000 mm oborine, a na istim nadmorskim visinama na primorskim i ličkim obroncima podjednake količine. Vršno područje južnog Velebita prima veće godišnje količine oborine (oko 3500 mm) i ima veće vertikalne gradijente od sjevernog Velebita. Na ličkoj strani južnog Velebita u prosjeku padnu nešto veće količine oborine nego na istim nadmorskim visinama na primorskoj strani.

Sjeveroistočni obronci konavoskog polja, gdje se mogu očekivati godišnje količine oborine od 3000 mm do 3500 mm, leže u podnožju crnogorskih planina koje prisiljavaju vlažne južne zračne mase na dizanje. To je područje Krivošija, gdje su zabilježene godišnje količine oborine i do 5000 mm, što je najviše u Europi (Penzar i dr., 2001).

U kontinentalnom području Hrvatske godišnja količina oborine smanjuje se od zapada prema

istoku jer vlažne zračne mase koje dolaze s jugozapada i zapada izgube vlagu dok dođu do tog područja, a one koje dolaze sa sjeveroistoka, iz unutrašnjosti, suhe su pa ne daju obilne oborine (Pleško i dr., 1984). Za lipanj, koji je u tom dijelu Hrvatske u godišnjem hodu mjesec s najvećom količinom oborine, pokazano je da najviše oborine daju ciklone u kombinaciji s frontom te da oborina koju donose frontalni poremećaji sa sjeverozapada padne u zapadnom dijelu kontinentalne Hrvatske, a na istočni dio dođe zračna masa sa smanjenim sadržajem vlage (Gajić-Čapka, 1982). U sjeverozapadnoj Hrvatskoj najveće su količine oborine u Zagorju, na području Medvednice, Kalnika, Žumberačkog i Samoborskog gorja (1000–1500 mm). I dok na navjetrinskim stranama gorja za kišonosnu struju, koja u sjevernim krajevima Hrvatske pretežito dolazi sa sjeverozapada, dolazi do orografske intenzifikacije oborine s visinom, u zavjetrinskoj strani javlja se oborinska sjena. To je prisutno u istočnom dijelu grada Zagreba, gdje Medvednica djeluje kao prepreka za sjeverozapadne kišonosne prodore (Gajić-Čapka i Čapka, 1985). Sličan učinak vidi se i u nizinskom području istočno od Kalnika. U Slavoniji količine oborine poput onih u Hrvatskom zagorju (1000–1500 mm) ima samo brdsko područje zapadne Slavonije (Psunj, Papuk, Krndija, Požeška gora i Dilj). U istočnoj Slavoniji u prosjeku padne oko 600–700 mm oborine, dok se nešto veće količine oborine mogu očekivati samo na uskom dijelu na obroncima Fruške gore i na području uz Savu (700–800 mm).

Dobivena prostorna raspodjela uspoređena je s prostornom raspodjelom za razdoblje 1931–1960. koje je bilo osnovno razdoblje za Atlas klime SFR Jugoslavije (1969) i Atlas klime SR Hrvatske (1977). Osim usporedbe karata izohijeta bilo je moguće usporediti i podatke na 294 postaje heterogeno raspoređene na području Hrvatske koje su korištene pri izradi obje karte. Pri tom su uspoređeni omjeri količine oborine iz razdoblja 1961–1990. s količinom iz razdoblja 1931–1960. na svim raspoloživim postajama. Na 84% postaja promjene su bile u granicama $\pm 10\%$. Na 27 postaja smanjenje je bilo u granicama 10–20%, a samo na jednoj veće od 20%. Povećanje je na 17 postaja bilo u granicama 10–20%, a na dvije postaje veće od 20%.

Najveće razlike uočene su u planinskim predjelima u kojima se u novom razdoblju raspo-

lagalo s većim brojem podataka dobivenim pomoću totalizatora.

Tako su u razdoblju 1931–1960. za vršna područja sjevernog i južnog Velebita dobivene podjednake količine oborine, a u novom su razdoblju, zahvaljujući podacima s totalizatora, utvrđene za klasu od 500 mm veće količine oborine na vršnom području južnog Velebita. Prema karti iz razdoblja 1931–1960. može se očekivati do 3000 mm oborine, dok su prema novim podacima tamo izmjerene količine od 3500 mm.

Takva promjena uočava se i na Plješevici, gdje je u novom razdoblju postavljen totalizator Donje Bare. Na najvišem području može se očekivati oko 2000 mm oborine, što je za klasu od 250 mm više nego u razdoblju 1931–1960.

Povećanje količine oborine može se primijetiti i oko Ivanšćice. Tamo je u razdoblju 1931–1960. najviša bila izohijeta 1000–1250 mm, dok je u novom razdoblju crtana izohijeta 1250–1500 mm na temelju 1325 mm oborine izmjerene totalizatorom Ivanšćica smještenim na visini od 1056 m. Također je na području sjeverozapadne Hrvatske (Zagorje, okolica Zagreba, Međimurje) analizom prije spomenutih omjera primijećeno povećanje srednje godišnje količine oborine od 10–20% na četiri postaje, te 21% povećanje na jednoj postaji (Klenovnik).

Postavljanje totalizatora Vošac na Biokovu također je otkrilo da je površina između izohijete 2000 mm i 2500 mm, koja je pokrivala veliki dio Biokova u razdoblju 1931–1960, znatno manja u novom razdoblju i obuhvaća samo vršni dio Biokova. U novom razdoblju na području Biokova uglavnom godišnje padne 1750–2000 mm oborine. Totalizator Vošac na 1400 m nadmorske visine u novom je razdoblju u prosjeku godišnje primao oko 1802 mm oborine. Također je na devet postaja na obali i otocima srednje Dalmacije zamijećeno smanjenje količine oborine od 10 do 20% u odnosu na razdoblje 1931–1960. Na šest postaja u Istri primijećeno je povećanje srednje godišnje količine oborine od 10 do 20% u odnosu na prethodno klimatološko razdoblje, a u Medulinu i apsolutno najveće povećanje od 24%. Stoga se na karti izohijeta za 1961–1990. na zapadnoj obali i u unutrašnjosti Istre vide za jednu klasu količina veće srednje godišnje količine oborine. Na obali se vrijednosti razlikuju za 100 mm, a u unutrašnjosti na nadmorskim visinama većim od 500 m za 250 mm.

Grupa od pet postaja s količinom oborine manjom za 10 do 20% primijećena je i na kvarnerskom području.

U istočnoj Slavoniji u razdoblju 1961–1990. srednje su godišnje količine oborine za klasu od 100 mm niže nego u razdoblju 1931–1960. Tamo je na osam postaja zamijećeno smanjenje od 10 do 20%, a u Babinoj Gredi čak 26%.

7. RASPRAVA I ZAKLJUČAK

Zahtjevi za informacijama o klimatskom potencijalu Hrvatske u različitim granama kao što su hidrologija, poljoprivreda i dr., potaknuli su razvoj metoda za prikaz razdioba klimatskih elemenata unutar Geografskog informacijskog sustava (GIS).

Osnova za izradu digitalne karte srednje godišnje količine oborine bili su velik broj meteoroloških postaja i 30-godišnji referentni niz podataka. Obrada ulaznih podataka zahtijevala je interpolaciju nedostajućih podataka i redukciju nepotpunih nizova na referentni niz. Bilo je potrebno i ponovno odrediti položaje mnogih meteoroloških postaja zbog pogreška ili nedovoljne preciznosti s kojom je položaj tradicionalno određivan s topografskih karata. Pogreške u položaju postaja uzrokuju vrlo grube pogreške u rezidualima, tj. u razlici izmjerene vrijednosti i preliminarne procjene regresijskim modelom na toj lokaciji. Takav, uvjetno rečeno izmišljeni rezidual« nakon prostorne interpolacije utječe i na točke u svojoj okolici.

Godišnje količine oborine u Hrvatskoj pokazuju veliku prostornu (horizontalnu i vertikalnu) varijabilnost koja se očituje u 13 oborinskih zona određenih prema ovisnosti količine oborine o nadmorskoj visini (vertikalni gradijent oborine) i osnovnom potencijalu oborine (količina oborine koja se može očekivati na nadmorskoj visini od 0 m). Prijašnji rezultati zoniranja Hrvatske prema godišnjim količinama oborine iz 10-godišnjeg razdoblja 1969–1978. (Gajić-Čapka i dr., 1985) dali su 12 oborinskih zona, koje se većim dijelom slažu s rezultatima ovog istraživanja provedenog na normalnom nizu podataka.

Vrijednosti koeficijenta determinacije, kao pokazatelja povezanosti procijenjenih i izmjerenih količina oborine, upućuju na čvrstu vezu u većini zona. Najmanji koeficijenti determi-

nacije dobiveni su u zonama I, X i XI. U zoni I (područje sjeverno od Save) to se objašnjava grupiranošću postaja na manjim visinama. U zoni X (Dalmatinska zagora) ima malo postaja, a u zoni XI (zaleđe Mosora i Biokova) korelaciju kvari nekoliko postaja koje, iako na malim nadmorskim visinama od 200 do 400 m, imaju veliku količinu oborine (1400 do 1600 mm) u odnosu na ostale postaje na sličnim nadmorskim visinama.

U regresijskom modelu (jedn. 2), koji opisuje varijabilnost oborine velike skale na nekom području, kao nezavisna varijabla uvedena je nadmorska visina (vertikalna promjenjivost), te geografski položaj postaje i njena udaljenost od mora (horizontalna promjenjivost). Regresijskim modelom određeno je preliminarno polje srednje godišnje količine oborine.

Lokalna odstupanja izmjerenih vrijednosti od regresijske jednadžbe (reziduali) interpolirani su metodom geostatističke analize, koja uvažava njihovu kontinuiranost, na točke mreže, dodani preliminarnom polju i rezultat je digitalna karta srednje godišnje količine oborine. Problematična su područja na većim visinama na kojima nema mjerenja. Tu lokalni efekti najviše dolaze do izražaja, a greške u procjeni količine oborine najveće su. Regresijska jednadžba tu daje najslabije rezultate, a kako nema mjerenja, ni reziduali nisu od pomoći. Stoga su na tim problematičnim područjima provedene korekcije izračunatog polja na temelju prethodno određenih regionalnih vertikalnih gradijenata oborine.

Ključne točke metode jesu izbor nezavisnih varijabli u regresijskoj jednadžbi i izbor oblika i parametara variograma za kriging. Tu se nalazi prostor za eksperimentiranje i daljnje popravljavanje procjene.

Usprkos prepoznatih nedostataka, dobivena digitalna karta srednje godišnje količine oborine u Hrvatskoj za razdoblje 1961–1990. važan je prilog poznavanju tog klimatskog elementa. Zbog svog digitalnog oblika karta je pogodna za proračun izvedenih meteoroloških i hidroloških veličina. U tom smislu već je korištena za izradu prve sustavne bilance voda Republike Hrvatske (Bonacci i Horvat, 2003) i u kombinaciji s kartom srednje godišnje temperature zraka za isto razdoblje (Gajić-Čapka i dr., 2003) za procjenu otjecanja na vodnim slivovima (Horvat i Rubinić, 2003)

Usporedba prostorne raspodjele godišnje količine oborine za razdoblje 1961–1990. i razdoblje 1931–1960. ukazuje na veće godišnje količine na vršnom području južnog Velebita, Plješevice i Ivanšćice u novijem razdoblju, a manje na području Biokova. To se pripisuje gušćoj mreži mjerenja pomoću totalizatora u planinskim krajevima u razdoblju 1961–1990. Usporedbom srednje godišnje količine oborine u razdoblju 1961–1990. s prethodnim klimatološkim razdobljem 1931–1960. utvrđeno je smanjenje oborine od 10 do 20% na dijelu postaja u istočnoj Slavoniji te sjevernoj i srednjoj Dalmaciji. Povećanje od 10 do 20% uočeno je na dijelu postaja u Istri i sjeverozapadnoj Hrvatskoj.

ZAHVALA: Ovo istraživanje realizirano je na osnovi ugovora s Hrvatskim vodama, Zagreb, i uz potporu Ministarstva znanosti i tehnologije Republike Hrvatske.

Zahvaljujemo se Hidrometeorološkom zavodu Bosne i Hercegovine na dostavljenim podacima.

LITERATURA

- Atlas klime Hrvatske, 1977: RHMZ, Zagreb
- Atlas klime SFRJ, 1969: Tablični podaci, Hidrometeorološka služba, Beograd, 61.
- Bonacci, O. i B. Horvat, 2003: Bilanca voda Hrvatske: dostignuća i potrebe. 3. hrvatska konferencija o vodama: hrvatske vode u 21. stoljeću, Osijek, 28–31.5.2003. Zbornik radova, *Hrvatske vode*, 33–43.
- Cressie, N. 1993: Statistics for Spatial Data. John Wiley and sons, inc., 900 pp.
- Gajić-Čapka, M., N. Pleško i K. Zaninović, 1985: Precipitation climate zones according to vertical gradients in Croatia, Yugoslavia. XII Internacional Conference on Carpathian Meteorology, Beograd, 30.9.–4.10.1985. *Zbornik meteoroloških i hidroloških radova*, SHMZ, Beograd, 12, 91–93.
- Gajić-Čapka, M. i B. Čapka, 1985: Analiza ljetnih oborina na području Zagreba. *Rasprave*, 20, RHMZ SRH, Zagreb, 31–40.
- Gajić-Čapka, M., M. Patarčić, M. Perčec Tadić, L. Srnc i K. Zaninović, 2002: Meteorološka podloga za Vodnogospodarsku osnovu Hrvatske (neobjavljeno). Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb, 85 str.
- Gajić-Čapka, M., M. Patarčić, M. Perčec Tadić, L. Srnc i K. Zaninović, 2003: Prostorna raspodjela srednje godišnje temperature zraka i količine oborine u Hrvatskoj. 3. hrvatska konferencija o vodama, hrvatske vode u 21. stoljeću, Osijek, 28.–31. svibnja 2003, 75–81.
- Gandin, L.S., 1963: Objective analysis of Meteorological Fields. Hidrometeorologičeskoe izdatel'stvo (GIMIZ), Leningrad (translated by Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1965), 242 pp.
- GISDATA, 1997: Digitalni atlas Republike Hrvatske 1:100 000.
- Horvat, B. i J. Rubinić, 2003: Primjena GIS-okruženja na procjenu otjecanja. 3. hrvatska konferencija o vodama: hrvatske vode u 21. stoljeću, Osijek, 28–31.5.2003. Zbornik radova, *Hrvatske vode*, 265–271.
- Ilwis 3.0 Academic, 2001: The Integrated Land and Water Information Sistem. Ilwis Department, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede
- Klimatografija Slovenije, 1995: Padavine, 1961–1990. Ministarstvo za okolje in prostor, Hidrometeorološki zavod Republike Slovenije, Ljubljana
- Ninyerola, M., X. Pons and J.M. Roure, 2000: A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS technique. *Int. J. Climatol.*, 20, 1823–1841.
- Pandžić, K. 2000: Sezonske karakteristike oborinskih vertikalnih gradijenata na području Like i Gorskog kotara (neobjavljeno). Državni hidrometeorološki zavod, 38 str.
- Penzar, B. 1959: Razdioba godišnjih količina oborine u Gorskom kotaru. *Rasprave i pri-kazi*, 4, Hidrometeorološki zavod NRH, 29–39.
- Penzar, B., I. Penzar i M. Orlić, 2001: Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana. Izdavačka kuća Dr. Feletar, 161–173.
- Pleško, N. i N. Šinik, 1968: Sekularne varijacije oborine u odnosu na Atlas klime SFRJ (neobjavljeno). Hidrometeorološki zavod SR Hrvatske, Zagreb, 32 str.

Pleško, N., M. Gajić-Čapka i K. Zaninović, 1984: Meteorološke oborinske podloge za projekt Katastar malih vodnih snaga u SRH. (neobjavljeno). Republički hidrometeorološki zavod SR Hrvatske, Zagreb, 16 str.

Ranković, S., D., Radičević, G., Sokolović - Ilić, 1981: Opšte karakteristike raspodele padavina u Jugoslaviji. *Prilog uz karte Atla- sa klime Jugoslavije*, Sveska 2, Savezni hidrometeorološki zavod, Beograd, 224 str.



DHMZ

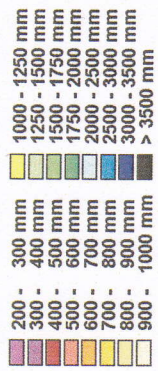
Državni hidrometeorološki zavod
Republika Hrvatska

Srednja godišnja količina oborine

Razdoblje: 1961-1990.

Mean annual precipitation

Period: 1961-1990.



0 50 km

Autori: Melita Perčec Tadić, dipl. ing.
dr. sc. Marijana Gajić-Čapka, dipl. ing.
Mirna Patačić, dipl. ing.

