

FLUKTUACIJE VODOSTAJA SAVE U ZAGREBU

TOMISLAV ŠEGOTA

UDK 911.2:551.48(497.1)

Uvod

Golema je važnost Save u životu Zagreba. Sve do kraja 19. st. Sava je bila teško savladiva prirodna barijera; izgradnjom nasipa ona se uključuje u gradski organizam, još jednom potvrđujući golemu važnost vodenih tokova u životu čovjeka (Žuljić, 1964).

Međutim, povremene poplave, nerijetko i katastrofalne, sve do nedavno bile su realna opasnost pa »... nema urbane aglomeracija kao što je zagrebačka na kojoj se isprepliću svi mogući hidrotehnički problemi u najsloženijem obliku.« (Srebrenović, 1976). Definitivno rješenje poplava u Zagrebu ni u kom slučaju ne znači da je problem voda u Zagrebu »skinut s dnevnog reda.« Hidrološka problematika daleko je kompleksnija od toga (vodoopskrba, uređenje podzemnog vodnog režima, kanalizacija, korištenje vodnih snaga, sport i rekreacija na vodi, eventualno čak i plovidba itd.), pa i dalje postoji potreba da se analiziraju neki hidrološki parametri Save u Zagrebu.

Odnos između protoka i vodostaja, s jedne strane, te enormnog broja geografskih, geoloških, bioloških i tehničkih činilaca, s druge, vrlo je kompleksan, pa njihovu »... stohastičku povezanost nije lako u praktički zadovoljavajućem obliku utvrditi...« (Srebrenović, 1970). U ovom radu izdvojen je samo jedan prirodni element, padaline, i to samo u jednoj »točki«, u Ljubljani, s ciljem da se utvrdi korelacijska veza između padalina u Ljubljani te fluktuacije vodostaja Save u Zagrebu. Iznenađuje činjenica da je o vodostaju Save u Zagrebu malo objavljeno. Samo u dva rada analiziran je višegodišnji niz njenih visokih i srednjih vodostaja (Pilar i drugi, 1971; Šterc, 1979).

Podaci

Pri istraživanju ovakve vrste najprije se postavlja problem homogenosti podataka. U tom pogledu situacija je više nego nezadovoljavajuća. Ako bi trebalo udovoljiti najstrožim kriterijima statističke analize, onda jedva da bi uopće i bilo moguće (posebno u našoj zemlji) pisati radove iz ovih područja (hidrologija, klimatologija). To je razlog da pri izvođenju zaključaka treba biti krajnje oprezan.

Podaci o padalinama u Ljubljani preuzeti su od V. M a n o h i n a (6), usprkos opravdanom kritičkom stavu D. F u r l a n a (7) o njihovoj nehomogenosti, jednostavno zato jer je to najdulji niz padalinskih podataka uzvodno od Zagreba. Noviji su podaci uzeti iz »Meteoroloških godišnjaka.«

Podaci o vodostaju Save u Zagrebu uzeti su prije svega iz arhive Hidrometeorološkog zavoda SRH, Hidrološki odjel, tj. iz »Tabele karakterističnih vodostaja«; oni su gotovo identični s podacima objavljenima u »Opazanjima...«, »Izveštajima...«, »Godišnjacima...« i »Hidrološkim godišnjacima«, kako su se već zvale službene publikacije o vodostajima naših rijeka. Historijat stanice uzet je iz »Temeljne limnografske knjige.« Neki su podaci pretiskani u »Hidrološkoj studiji reke Save«, koju je izdao SHMZ, Beograd, 1969.

Na stanici Zagreb vrše se motrenja od 1. 11. 1894. do kraja 1916. i od 1. 8. 1919. do danas. Dakle, postoji prekid od 1. 1. 1917. do 31. 7. 1919, ali su u »Tabeli karakterističnih vodostaja« unijeti podaci o godišnjim vodostajima i za to razdoblje, ali se ne navodi kako se došlo do njih. Isto tako postoji prekid od 25. 1. do 17. 2. 1942. i od 1. 10. do 31. 12. 1944, ali su vodostaji izračunati metodom interpolacije, koristeći podatke o vodostaju Save kod Podsuseda.

Budući da se najviši vodostaji u svakoj godini (VV) i najniži vodostaji svake godine (NV) očitavaju, a srednji godišnji vodostaji (SV) izračunavaju se na temelju očitanih veličina, postoji realna mogućnost da su neki podaci o srednjem vodostaju krivi. Ponovnim, kontrolnim izračunavanjem — polazeći od mjesečnih vrijednosti — ustanovio sam da je sumnja bila osnovana u više slučajeva. Na primjer, u »Tabeli karakterističnih vodostaja« stoji da je srednji godišnji vodostaj 1895. god. iznosio 99 cm. Međutim, zbroje li se srednji mjesečni vodostaji iz te iste »Tabele karakterističnih vodostaja« dolazi se do sume 1 283; ona podijeljena sa 12 daje srednji godišnji vodostaj 107 cm, a ne 99 cm kako se navodi u »Tabeli karakterističnih vodostaja«, a na osnovu toga i u svim drugim izvorima. Kontrolom sam došao do slijedećih srednjih godišnjih vodostaja:

Godina	»Tabela...«	Korigirani SV
1912.	26	19
1920.	43	—41
1923.	2	9
1937.	32	29
1942.	—87	—90
1951.	20	—21
1963.	—14	—8
1967.	—52	—50
1972.	—8	10

Nije navedeno nekoliko godina kad ta razlika iznosi 1 cm.

Sljedeći problem koji treba imati na umu visina je kote »0« točke vodostaja. Limnigraf se nalazi na »savskom mostu«; na istom je mjestu i vodokaz. Vodokaz radi od 1. 11. 1849, a limnigraf je u pogonu od 19. 3. 1956. U svim službenim publikacijama, kao i u »Tabeli karakterističnih vodostaja«, objavljeni su, odnosno unijeti su, očitani — i na temelju njih — izračunati vodostaji. Međutim, svi ovi podaci ne mogu se direktno koristiti jer se mijenjala visina kote »0« na vodokazu. Taj je izuzetno važan podatak iscrpno i dokumentirano prikazan u »Temeljnoj limnografskoj knjizi« za vodokaz Zagreb. Najvažniji dio glasi:

»Obzirom na prednje, zaključuje se da bi vodostaje u periodu 1850—1908. trebalo reducirati na današnji horizont-nulu motrenja, tj. sve vodostaje sniziti (spac. T. Š.) za 117 cm.«

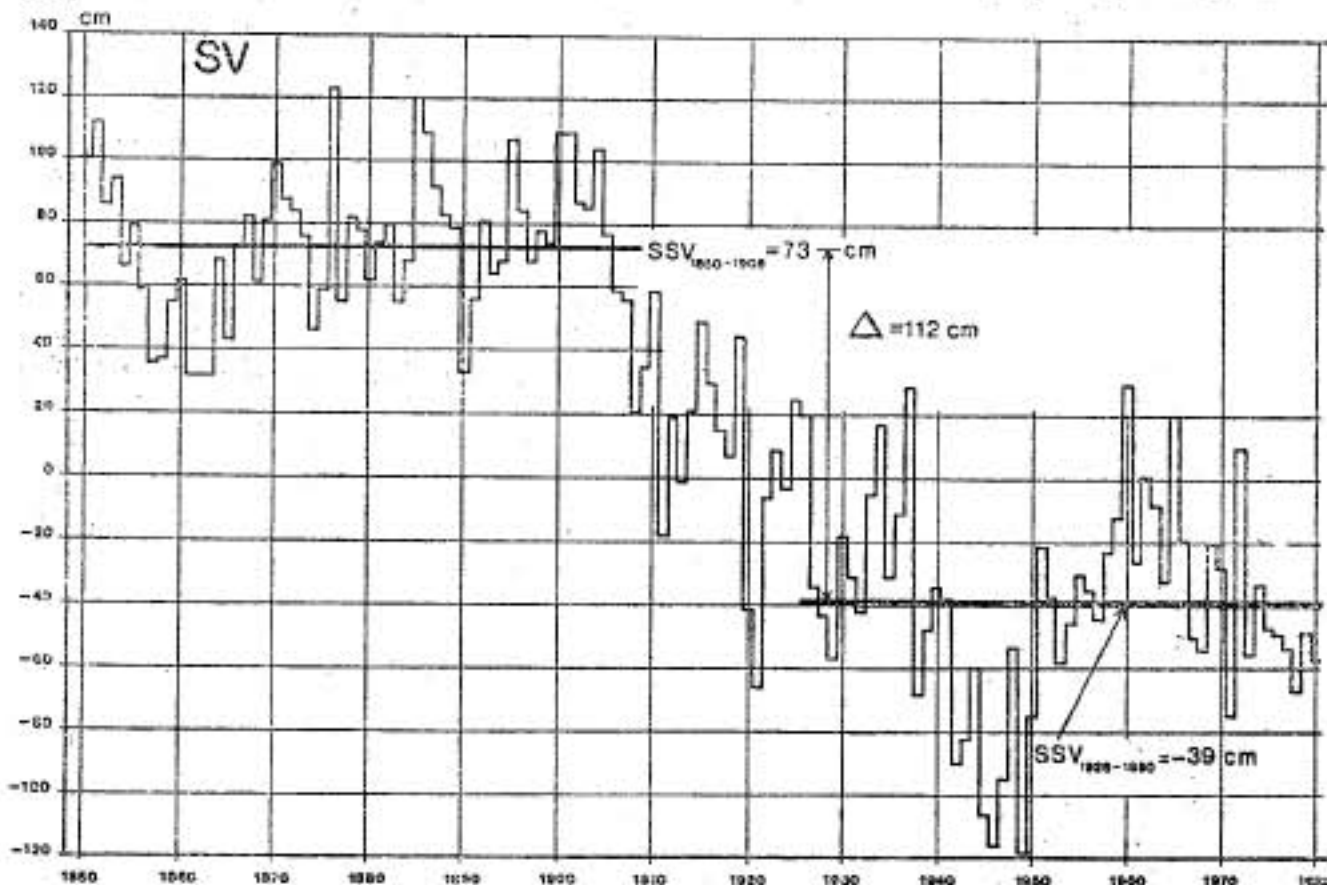
Ukratko. Od početka analiziranja vodostaja (od 1850. god.) do 1908. god. kota »0« bila je na visini 113.44 m.

Od 1909. do 1925. kota »0« bila je na visini 112.27 m.

Od 1926. do danas kota »0« je na visini 112.26 m.

To znači da je letva spuštена dva puta: 1909. i 1926. godine. Zato je starije podatke o vodostaju potrebno korigirati, i to kako slijedi:

Svi vodostaji u »Tabeli karakterističnih vodostaja« od 1850. do 1908. smanjeni su za 118 cm;



Sl. 1. Nivogram srednjih godišnjih vodostaja Save u Zagrebu prema službeno publiciranim, tj. nekorrigiranim podacima. Usporedba prosječnog srednjeg vodostaja 1850—1908. i 1926—1980. godine

Fig. 1. Annual mean water levels of the Sava River in Zagreb according to the officially published, i.e. uncorrected data. The comparison of annual mean water levels from the period 1850—1908 and 1926—1980 respectively

svi vodostaji u »Tabeli karakterističnih vodostaja« od 1909. do 1925. smanjeni su za 1 cm.

Od 1926. do danas kota »0« nalazi se na 112.26 m, pa se ovi podaci mogu upotrebljavati bez korekture.

Budući da se radi o izuzetno važnoj informaciji, tj. o promjeni visine kote »0« vodokaza, da bih to provjerio učinio sam slijedeći jednostavni test. Izračunao sam i usporedio srednje niske vodostaje (SNV) i srednje srednje vodostaje (SSV) iz dvaju kontinuiranih razdoblja kad je visina letve bila različita. Tako je:

SSV 1850—1908. iznosio 73.3 cm,
1926—1980. godine —39.1 cm.

Odbijemo li to, dobivamo razliku 112.4 cm. Slično vrijedi i za srednji niski vodostaj (SNV). On je

1850—1908. iznosio —11.8 cm, a
1926—1980. godine —141.7 cm.

Razlika iznosi 129.95 cm.

Vodostaji 112.4 cm i 129.95 cm istog su reda veličine kao i 117 cm, koliko se navodi da je iznosio pomak letve. Imamo, dakle, numerički dokaz da je spomenuti pomak letve za 117 cm doista učinjen!

Iz same prirode visokog vodostaja te utjecaja izgradnje nasipa i oteretnog kanala proizlazi bitno manja razlika. Srednji visoki vodostaj 1850—1908. iznosio je 295 cm, a 1926—1980. god. 324 cm, tj. razlika iznosi samo 29 cm.

Da bi zaključci bili što pouzdaniji, na sl. 1 prikazani su srednji srednji vodostaji (SSV) iz dva razdoblja, 1850—1908. i 1926—1980, prema službeno objavljenim (tj. očitanim i izračunatim) srednjim godišnjim vodostajima, pri čemu nije

uzeta u obzir promjena visine kote »0« vodokaza, tj. nije uzeta u obzir promjena visine letve. U ranijem razdoblju, 1850—1908, kota »0« vodokaza bila je na visini 113.44 m. U tom razdoblju srednji srednji vodo-

staj iznosio je 73 cm. U kasnijem razdoblju, 1926—1980, kota »0« vodokaza spuštenu je na 112.26 m. Srednji srednji vodostaj iz tog razdoblja iznosi —39 cm. Odbiju li se te vrijednosti, razlika između ta dva razdoblja iznosi 112 cm. Nije potrebno dugo promatranje da se uoči da postoji vrlo izraziti diskontinuitet, koji je posljedica pomaka letve. Iako to potvrđuju i prethodni numerički podaci, ovaj grafikon to dokazuje mnogo zornije.

Polazeći od tih činjenica vodostaji su preračunati, odnosno svedeni na današnju kotu »0« vodokaza, a prikazani su na tabelama 2, 3 i 4. Jedino je tako moguće uspoređivati novije i starije podatke o vodostaju. (Strogo uzevši, ni ovako korigirani podaci nisu posve točni, napose ne visoki, a manje srednji vodostaji, jer se mijenjala visina i duljina nasipa. Zato bi bila egzaktnija analiza protoka vode, ali je dosadašnji niz podataka prekratak, a i oteretni kanal »Odra« i u ovom slučaju deformira podatke o volumenu protekle vode za vrijeme najviših vodostaja.)

Regulacijske radove na Savi u Zagrebu i uzvodno od njega počeli su izvoditi 1874. godine, ali nikada sistematski i kompleksno (Dukić, 1957), a s obzirom na njihovu važnost i presporo. Sistematskiji radovi kod Zagreba počeli su tek 1937. god. Katastrofalna poplava 1964. inicirala je dogradnju obrambenog sistema između Podsuseda i oteretnog kanala »Odra« (ili kanala Sava—Odra—Sava) za redukciju velikih voda, koji je djelomično dovršen 1971. god. Tako je u Zagrebu konačno eliminirana opasnost od poplava. (Srebrenović, 1976; Vujašinović, 1971). U novije doba na visoki vodostaj Save u Zagrebu počeli su djelovati radovi na Savi, Krki, Sutli i Krapini (Vadlja, 1965).

Metode istraživanja

Padaline u Ljubljani ili pak srednji, visoki i niski vodostaji Save u Zagrebu čine vremensku seriju

$$T_0(x_0, y_0), T_1(x_1, y_1), T_2(x_2, y_2), \dots, T_N(x_N, y_N)$$

pri čemu se sa

$$x_0, x_1, x_2, \dots, x_N$$

označavaju godine, od prve do zadnje u analiziranom nizu, a

$$y_0, y_1, y_2, \dots, y_N$$

su apsolutne vrijednosti padalina i vodostaja u svakoj od odgovarajućih godina.

Elementarno svojstvo jedne vremenske serije, u našem slučaju godišnjih padalina u Ljubljani i vodostaja Save u Zagrebu, koje treba upozna-

ti u samom početku, jest srednjak ili prosjek. On se jednostavno izračunava pomoću izraza

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N y_i$$

pri čemu je N broj godina obuhvaćenih analizom.

Vodostaj i padaline su više ili manje varijabilne veličine, pa kad se radi o duljem nizu godina, može se govoriti o njihovoj fluktuaciji, podrazumijevajući pod tim da se radi o slučajnim varijacijama oko prosjeka. Srednje odstupanje (srednja devijacija) ili točnije, srednje apsolutno odstupanje ili srednja apsolutna devijacija (\overline{AD}) najjednostavnija je mjera disperzije individualnih jedinica jedne vremenske serije (padalina i vodostaja), bez obzira na njihov predznak, a izračunava se pomoću formule

$$(\overline{AD}) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N |y_i - \bar{y}|$$

Da se omogući komparacija raznih vremenskih serija, upotrebljava se srednja relativna devijacija (\overline{RD})

$$(\overline{RD}) = \frac{100 (\overline{AD})}{\bar{y}} \%$$

kao mjera za prosječno postotno odstupanje od srednjaka.

Mnogo češće upotrebljavana mjera za disperziju individualnih jedinica je standardno odstupanje ili standardna devijacija s . Ako imamo niz podataka o padalinama i vodostaju y u sukcesivnim godinama, onda se standardna devijacija izračunava pomoću izraza

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (y_i - \bar{y})^2}$$

Ona označava prosječno odstupanje padalina i vodostaja u pojedinim godinama od njihova prosjeka ali u apsolutnim iznosima (vodostaj u centimetrima, padaline u milimetrima).

Da se omogući komparacija raznih vremenskih serija, upotrebljava se koeficijent varijacije V kao relativna mjera devijacije (u postocima), a polazi se od standardne devijacije i srednjaka

$$V = \frac{100 s}{\bar{y}} \%$$

Koeficijent varijacije pokazuje prosječno odstupanje u postocima od srednjaka, tj. postotno odstupanje od godišnjeg prosjeka padalina ili vodostaja.

Vodostaji i padaline iz duljeg niza godina vrlo su varijabilne veličine; preglednost, pa i izvjesna zakonomjernost njihovih kronoloških dija-

grama postiže se tzv. krivuljom ublaženja do koje se dolazi pomoću pokretnih (ili pomičnih) srednjaka. Radi se o svojevrsnom »izglađivanju.« Dijagram padalina u Ljubljani i vodostaja u Zagrebu ublaženi su 10-godišnjim pokretnim srednjacima. Budući da je uzet parni broj godina (x), njihovi su srednjaci pomaknuti za 5.5 godina udesno od prve godine za koju postoje podaci. Sukcesivni 10-godišnji pokretni srednjaci padalina i vodostaja (y) izračunavaju se pomoću izraza

$$\bar{x}_{5.5} = \frac{1}{10} \sum_{i=0}^9 y_i$$

$$\bar{x}_{6.5} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} y_i$$

...

$$\bar{x}_{N-5.5} = \frac{1}{10} \sum_{i=N-10}^{N-1} y_i$$

$$\bar{x}_{N-4.5} = \frac{1}{10} \sum_{i=N-9}^{N-1} y_i$$

U hidrološkim i klimatološkim radovima dosta se može dobiti izračunavanjem linearnog trenda; njime se eliminiraju velike međugodišnje razlike, odnosno varijacije padalina i vodostaja. U jednadžbi pravca

$$y_t = ax + b$$

treba izračunati vrijednost parametara a i b (pri čemu je x vrijeme, odnosno godine, a y je vodostaj ili padalina), a do njih se dolazi pomoću jednadžbi

$$a = \frac{\sum_{i=0}^N x_i y_i - \bar{x} \sum_{i=0}^N y_i}{\sum_{i=0}^N x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=0}^N x_i}$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x}$$

Zbog velike disperzije individualnih vrijednosti, odnosno zbog velike varijacije godišnjih padalina u Ljubljani i vodostaja u Zagrebu, uobičajeno je da se egzaktno utvrdi u kojem stupnju

izračunati linearni trend prezentira kretanje pojava. To se postiže izračunavanjem standardne greške procjene s pomoću trenda ili regresijske standardne devijacije (RSD), koja pokazuje koliko je prosječno odstupanje empirijskih vrijednosti padalina i vodostaja od njihovih regresijskih vrijednosti.

$$(RSD) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (y_i - \bar{y}_t)^2}$$

y_i su vrijednosti padalina ili vodostaja u sukcesivnim godinama, a

\bar{y}_t su vrijednosti trenda za svaki član vremenskog niza u sukcesivnim godinama.

Da se omogući komparacija analiziranih vrijednosti, potrebno je izračunati relativnu standardnu grešku ili koeficijent varijacije regresije (KVR)

$$(KVR) = \frac{100 (RSD)}{\bar{y}}$$

Iz disperzije individualnih točaka (sl. 6) na prvi se pogled vidi da između padalina u Ljubljani (P_L) i srednjeg vodostaja Save u Zagrebu (SV_Z) postoji linearna korelacija. Mjera za njenu čvrstoću je koeficijent korelacije $r_{P,SV}$. Do njega se dolazi linijom regresije. Ocjena signifikantnosti koeficijenta korelacije, polazeći od vrijednosti padalina i vodostaja i već poznatih standardnih devijacija, postiže se pomoću izraza

$$r_{P,SV} = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(SV_i - \bar{SV})}{S_P \cdot S_{SV}}$$

Rezultati istraživanja

Početi ćemo s padalinama u Ljubljani. (Tab. 1, sl. 2) U razdoblju 1851-1979, tj. za 129 godina motrenja, godišnji srednjak padalina iznosi

$$\bar{P}_L = 1409 \text{ mm,}$$

srednja apsolutna devijacija

$$(\overline{AD}) = \pm 194 \text{ mm,}$$

srednja relativna devijacija

$$(\overline{RD}) = \pm 13.8 \%,$$

standardna devijacija

$$s_P = \pm 258 \text{ mm,}$$

a koeficijent varijacije

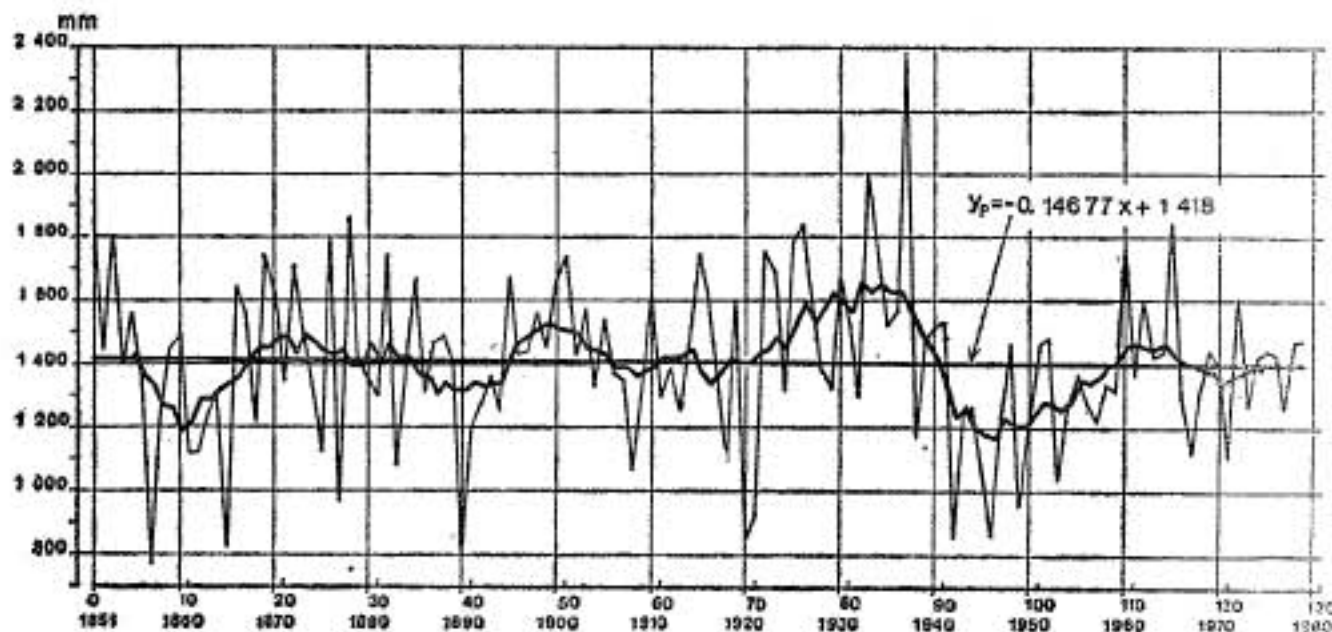
$$V_P = 18.3 \%$$

Tab. 1. Godišnje padaline u Ljubljani

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1850		1 815	1 438	1 800	1 398	1 558	1 360	767	1 237	1 454
1860	1 490	1 109	1 117	1 239	1 305	819	1 637	1 557	1 224	1 741
1870	1 617	1 353	1 695	1 494	1 327	1 132	1 788	974	1 863	1 414
1880	1 345	1 305	1 738	1 081	1 414	1 664	1 315	1 472	1 493	1 411
1890	810	1 202	1 267	1 355	1 252	1 666	1 433	1 439	1 552	1 446
1900	1 663	1 740	1 427	1 566	1 325	1 536	1 369	1 347	1 066	1 376
1910	1 617	1 302	1 386	1 259	1 446	1 751	1 632	1 379	1 098	1 614
1920	850	931	1 760	1 685	1 315	1 789	1 835	1 594	1 389	1 329
1930	1 666	1 534	1 300	2 001	1 790	1 527	1 571	2 379	1 175	1 483
1940	1 519	1 531	864	1 251	1 262	1 060	873	1 235	1 458	956
1950	1 235	1 455	1 478	1 040	1 273	1 367	1 282	1 217	1 337	1 316
1960	1 771	1 372	1 604	1 430	1 437	1 849	1 298	1 120	1 331	1 445
1970	1 396	1 107	1 608	1 270	1 412	1 435	1 425	1 265	1 469	1 476

Iz grafičkog prikaza (sl. 2) jasno se vidi već poznata opća zakonomjernost, veće ili manje variranje padalina u sukcesivnim godinama. Možeće je nazrijeti smjenu razdoblja s pretežno vlažnim, te relativno sušnim godinama, ali se

elemenata, isto tako kao i utjecaj društvenih faktora (izgradnja nasipa itd.). Posebno je interesantna pojava niza godina s relativno niskim vodostajima od oko 1940. do oko 1955. god., a dobro se podudara s pojavom niza manje kišovitih



Sl. 2. Godišnji hod padalina u Ljubljani; debela izlomljena krivulja povezuje 10-godišnje pokretne srednjake

Fig. 2. Annual precipitations in Ljubljana; the bold line shows the 10-year running means

ne može govoriti ni o kakvoj periodičnosti koja bi mogla biti osnova za prognozu padalina u slijedećim godinama.

Iz jednadžbe pravca koja prezentira trend

$$y_p = -0.1467743x + 1418$$

vidi se da je u 129 godina, 1851-1979, došlo do jedva izraženog trenda pada godišnje količine padalina; 1851. godine izravnote padaline iznosile su 1418 mm, a 1979. god. 1399 mm, tj. razlika iznosi 19 mm, odnosno količina izravnatih padalina smanjila se za 1.3 %.

Regresijska standardna devijacija

$$(RSD)_p = \pm 280 \text{ mm,}$$

a koeficijent varijacije regresije

$$(KVR)_p = \pm 20 \text{ %.}$$

Srednji vodostaj Save (tab. 2, sl. 3) jasno pokazuje da odnos godišnjih količina padalina u Ljubljani (sl. 2) i srednjih godišnjih vodostaja Save u Zagrebu nije jednostavan iako je većinom korelacija pozitivna. Pokretni srednjaci već ukazuju da je evidentan utjecaj i drugih prirodnih

godina u Ljubljani (dakako i u Zagrebu) u istom razdoblju. Prosječni srednji vodostaj u 131-om godišnjem razdoblju 1850-1980. god.

$$\overline{SV} = -35 \text{ cm.}$$

(U ovom slučaju, kad se srednji vodostaj, -35 cm, gotovo izjednačio s vrijednošću standardne devijacije, 34 cm, dakako po apsolutnom iznosu, nastupaju stanovite teškoće, jer koeficijent varijacije izračunat na toj osnovi trebao bi biti $\pm 96 \text{ %}$, a to nije moguće. Da se izbjegne ova teškoća, srednji vodostaj je preračunat u vrijednosti od 0 do 180 cm. Preračunavanje tako dobivenih vrijednosti u »realni« vodostaj ne čini nikakve teškoće. Tako se dolazi do slijedećih veličina.)

Srednja apsolutna devijacija srednjeg vodostaja

$$(\overline{AD})_{SV} = \pm 26 \text{ cm,}$$

srednja relativna devijacija srednjeg vodostaja

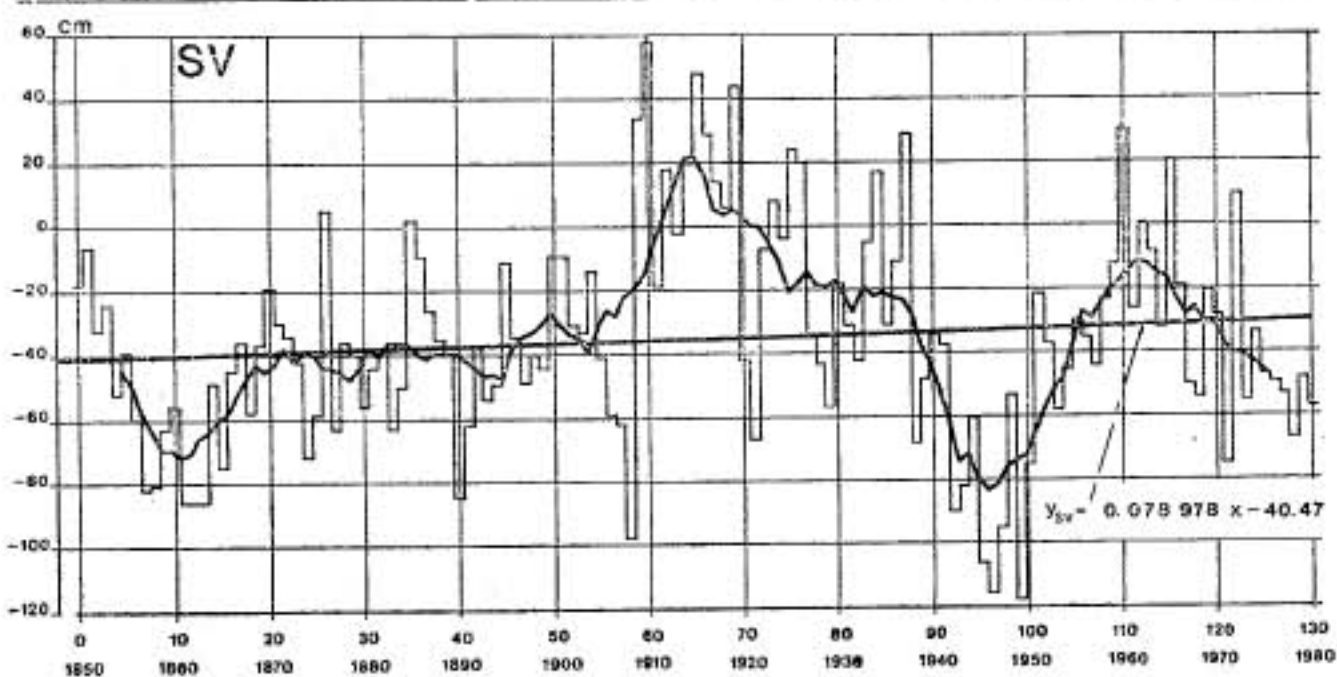
$$(\overline{RD})_{SV} = \pm 31 \text{ %,}$$

standardna devijacija srednjeg vodostaja

$$S_{SV} = \pm 34 \text{ cm,}$$

Tab. 2. Srednji godišnji vodostaji Save u Zagrebu. Od 1850. do 1908. publicirani vodostaji su smanjeni za 118 cm, a 1909—1925. za 1 cm

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1850	-18	-6	-32	-24	-52	-39	-60	-82	-81	-63
1860	-56	-86	-86	-86	-49	-75	-45	-36	-57	-37
1870	-19	-30	-34	-42	-72	-59	5	-63	-36	-40
1880	-56	-44	-38	-63	-50	2	-9	-26	-35	-39
1890	-85	-62	-37	-54	-49	-11	-34	-49	-40	-44
1900	-9	-9	-31	-33	-14	-41	-59	-62	-98	34
1910	58	-19	18	-2	20	48	29	14	6	44
1920	-42	-67	-7	8	-4	24	20	-34	-43	-57
1930	-18	-31	-42	-5	17	-31	-11	29	-68	-48
1940	-34	-38	-90	-82	-60	-106	-116	-95	-53	-117
1950	-75	-21	-37	-57	-45	-30	-35	-44	-23	-12
1960	30	-26	1	-8	-32	20	-19	-50	-54	-20
1970	-28	-75	10	-55	-33	-47	-49	-53	-67	-48
1980	-57									



Sl. 3. Nivogram srednjih godišnjih vodostaja Save u Zagrebu; debela izlomljena krivulja povezuje 10-godišnje pokretne srednjake

Fig. 3. Annual mean water levels of the Sava River in Zagreb; the bold line shows the 10-year running means

a koeficijent varijacije srednjeg vodostaja

$$V_{SV} = \pm 40 \%$$

To je dokaz da je srednji vodostaj Save u Zagrebu vrlo varijabilna veličina.

trend općeg porasta srednjeg godišnjeg vodostaja Save. Razlika između izravnatih vodostaja 1850. god. (-40.47 cm) i 1980. god. (-30.20 cm) iznosi 10.27 cm, odnosno izravnati srednji vodostaj povećao se za 34%.

Tab. 3. Najniži godišnji vodostaji Save u Zagrebu. Od 1850. do 1908. publicirani vodostaji su smanjeni za 118 cm, a 1909—1925. za 1 cm

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1850	-97	-84	-103	-118	-118	-118	-126	-136	-138	-135
1860	-134	-154	-154	-151	-141	-152	-142	-121	-126	-121
1870	-123	-115	-118	-132	-138	-142	-118	-154	-156	-166
1880	-150	-127	-153	-135	-124	-88	-93	-128	-128	-150
1890	-168	-157	-117	-125	-108	-139	-137	-135	-130	-116
1900	-96	-100	-144	-114	-128	-134	-138	-128	-134	-61
1910	-61	-119	-93	-103	-89	-81	-93	-121	-89	-79
1920	-121	-137	-135	-111	-89	-85	-110	-144	-160	-156
1930	-120	-138	-146	-124	-82	-118	-116	-118	-130	-160
1940	-146	-140	-153	-146	-152	-174	-187	-204	-147	-185
1950	-175	-152	-158	-134	-149	-136	-126	-120	-120	-106
1960	-103	-129	-128	-121	-134	-102	-106	-152	-141	-131
1970	-144	-168	-148	-146	-128	-144	-150	-156	-183	-161
1980	-185									

Iz jednadžbe pravca

$$y_{sv} = 0.078 978 x - 40.47$$

i njegova grafa na sl. 3 vidi se da postoji izražen

Standardna greška procjene s pomoću trenda ili regresijska standardna devijacija

$$(RSD)_{sv} = \pm 33.67 \text{ cm,}$$

a koeficijent varijacije regresije

$$(KVR)_{SV} = \pm 38.7 \%$$

Niski vodostaj (tab. 3, sl. 4) u pojedinim godinama malo ovisi o godišnjoj količini padalina (bitno je trajanje najdužeg beskišnog razdoblja), pa je podudarnost grafova padalina u Ljubljani (sl. 2) i niskog vodostaja Save u Zagrebu (sl. 4) malena. Nešto je veća sličnost krivulja pokretnih srednjaka.

Srednji niski vodostaj u razdoblju 1850-1980, tj. u periodu od 131 godine, iznosi

$$\overline{NV} = -131 \text{ cm,}$$

srednja apsolutna devijacija iznosi

$$(\overline{AD})_{NV} = \pm 20 \text{ cm,}$$

srednja relativna devijacija

$$(\overline{RD})_{NV} = \pm 15.3 \%,$$

standardna devijacija

$$s_{NV} = \pm 26 \text{ cm,}$$

a koeficijent varijacije

$$V_{NV} = \pm 19.6 \%,$$

što ukazuje na relativno malenu međugodišnju varijaciju niskog vodostaja.

Iz jednadžbe linearnog trenda

$$y_{NV} = -0.152645x - 120.72$$

vidi se da postoji izraziti trend pada niskog vodostaja; izravnati niski vodostaj je od 1850. god. (-120.7 cm) do 1980. god. (-140.56 cm) pao za 19.86 cm, odnosno za 16 %.

Regresijska standardna devijacija

$$(RSD)_{NV} = \pm 25 \text{ cm,}$$

a koeficijent varijacije regresije iznosi

$$(KVR)_{NV} = \pm 19.1 \%$$

Zbog praktičnih razloga, najvažniji je visoki vodostaj (tab. 4, sl. 5; vertikalno mjerilo, iz tehničkih razloga, nije moglo biti kao i na drugim slikama). Podudaranje s hodom godišnjih padalina u Ljubljani (sl. 2) nije izrazito, što je razumljivo kad se zna da su najviši godišnji vodostaji prije svega posljedica relativno kratkotrajnih jakih kiša, zatim kopnjenje snijega i visoke podzemne vode istovremeno, a da godišnja količina padalina i ne mora biti velika. (Vrijedi dakako i obratno.) Zato se krivulje pokretnih srednjaka poklapaju samo u nekim razdobljima. Srednji visoki vodostaj u 131-godišnjem razdoblju 1850-1980. iznosio je

$$VV = 254 \text{ cm,}$$

srednja apsolutna devijacija

$$(\overline{AD})_{VV} = \pm 81 \text{ cm,}$$

srednja relativna devijacija

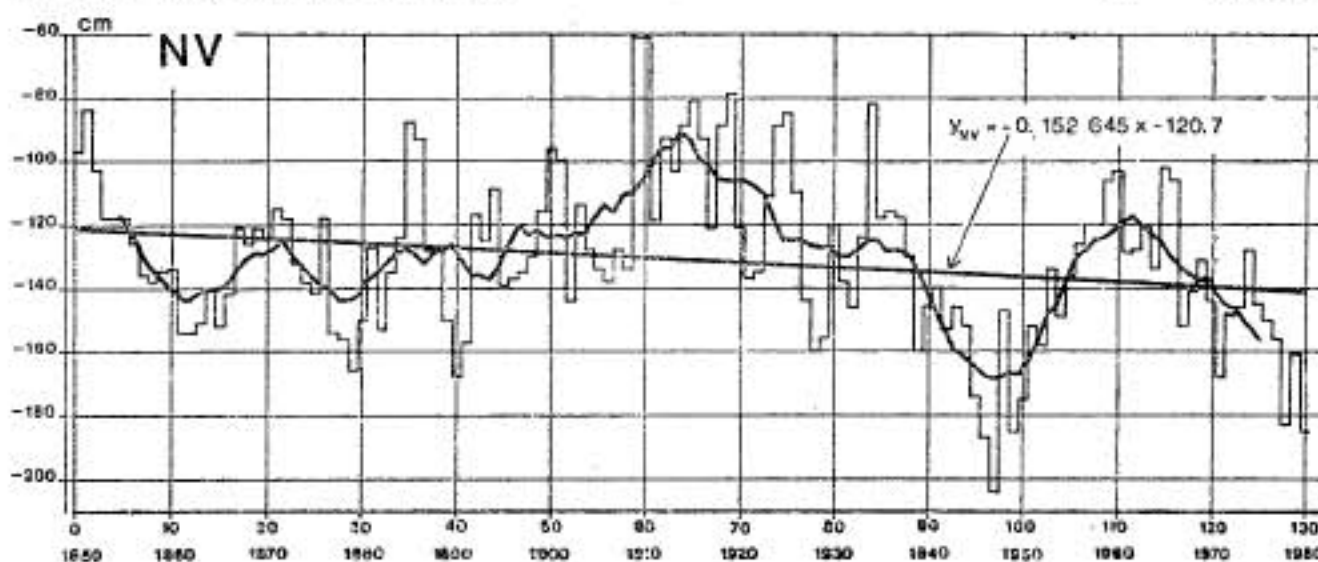
$$(\overline{RD})_{VV} = \pm 32 \%,$$

standardna devijacija

$$s_{VV} = \pm 96.7 \text{ cm,}$$

a koeficijent varijacije

$$V_{VV} = 38.1 \%$$



Sl. 4. Nivogram najnižih godišnjih vodostaja Save u Zagrebu; debela izlomljena krivulja povezuje 10-godišnje pokretne srednjake

Fig. 4. Annual minimum water levels of the Sava River in Zagreb; the bold line shows the 10-year running means

Tab. 4. Najviši godišnji vodostaji Save u Zagrebu. Od 1850. do 1908. publicirani vodostaji su smanjeni za 118 cm, a 1909—1925. za 1 cm

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1850	230	261	277	182	184	182	119	74	92	214
1860	153	111	90	89	128	78	151	214	143	190
1870	238	168	214	159	182	188	228	146	262	162
1880	182	153	212	178	143	227	172	182	222	207
1890	102	122	132	132	126	306	182	128	217	172
1900	197	262	200	242	238	202	158	162	162	349
1910	273	261	259	221	255	379	285	339	325	304
1920	179	311	337	419	185	403	436	330	280	230
1930	382	324	310	455	352	280	356	318	284	382
1940	338	266	240	264	286	120	118	307	376	302
1950	230	283	285	328	340	290	309	218	317	405
1960	334	330	374	382	514	344	486	280	296	297
1970	280	232	396	429	446	348	310	313	219	441
1980	419									

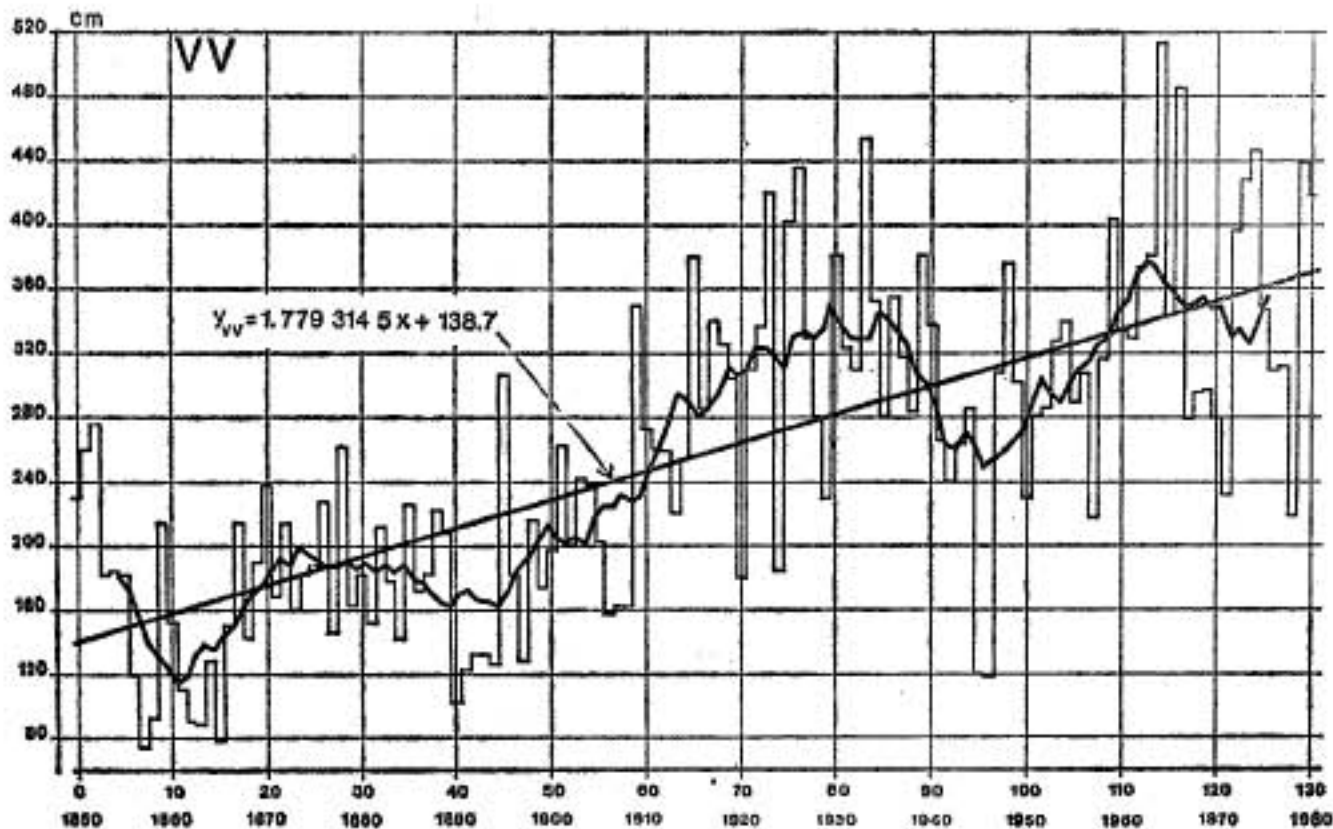
Radovi na regulaciji Save, prije svega izgradnja nasipa, vrlo se jako odrazilo u trendu porasta visokog vodostaja. Grafički prikaz (kao ni numerički podaci iz tab. 4) nije posve točan odraz stvarnog stanja, jer do izgradnje kanala Sava-Odra-Sava za najviših vodostaja voda se prelijevala preko nasipa u zaoblje, što znači da ta voda nije mogla utjecati na porast maksimalnog vodostaja kad je on prešao određenu visinu (a što je ovisilo o visini i duljini nasipa). Poslije izgradnje kanala Sava-Odra-Sava maksimal-

bu u 129-godišnjem razdoblju 1851-1979. god. (sl. 6). Iz »oblaka« točaka oko pravca (linije) regresije

$$y_r = 0.087857x - 159$$

odmah se vidi da linearna korelacija nije naročito čvrsta, a to se moglo i očekivati s obzirom na izuzetnu kompleksnost odnosa niza prirodnih elemenata i hidroloških radova koji zajednički utječu na vodostaj. Koeficijent korelacije iznosi

$$r = +0.68.$$



Sl. 5. Nivogram najviših godišnjih vodostaja Save u Zagrebu; debela izlomljena krivulja povezuje 10-godišnje pokretne srednjake

Fig. 5. Annual maximum water levels of the Sava River in Zagreb; the bold line shows the 10-year running means

ni su vodostaji niži nego što bi odgovaralo volumenu vode koja dolazi do Zagreba. Usprkos tome, jasno se očituje tendencija smjene niza godina s pretežno visokim maksimalnim vodostajima s godinama kad su maksimalni vodostaji bili pretežno niži. To se još ljepše vidi na krivulji pokretnih srednjaka, ali ni u ovom slučaju ne može se govoriti ni o kakvoj periodičnosti.

Jednadžba pravca koji prikazuje trend visokog vodostaja

$$y_{vv} = 1.7793145x + 138.72$$

pokazuje da se od 1850. god. (kad je izravnati visoki vodostaj iznosio 139 cm) do 1980. god. (kad je izravnati visoki vodostaj iznosio 370 cm) izravnati visoki vodostaj povećao za 231 cm, ili za 166%. To je najbolji dokaz za poznato pogoršanje vodnog režima pod utjecajem izgradnje nasipa. Jedan dio toga porasta posljedica je sedimentiranja nanosa u koritu Save.

Regresijska standardna devijacija

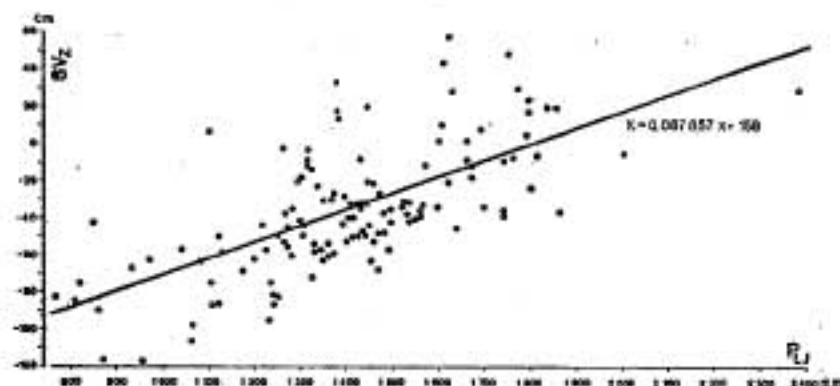
$$(RSD)_{vv} = \pm 69.45 \text{ cm},$$

koeficijent varijacije regresije

$$(KVR)_{vv} = \pm 27.3\%.$$

Konačno, za nas je posebno značajna korelacija između godišnjih količina padalina u Ljubljani i srednjeg godišnjeg vodostaja Save u Zagre-

Klasifikacija čvrstoće korelativne veze prema numeričkim obilježjima nije ujednačena, odnosno nije opće prihvaćena jedinstvena podjela na razrede s unificiranom nomenklaturom. Na primjer, E. R. Chaddock (cit. 12, str. 338) smatra da »...koeficijent korelacije između 0.50 i 0.70 pokazuje značajnu vezu koja ima praktičnu važnost...«. Ali, ipak ne smijemo zaboraviti da je ovaj koeficijent korelacije vrlo blizu graničnoj vrijednosti, vrlo je blizu prijelazu u usku vezu (koeficijent korelacije 0.70 do 0.90).



Sl. 6. Korelacija između godišnjih padalina u Ljubljani (P_L) i srednjih godišnjih vodostaja Save u Zagrebu (SV_Z)

Fig. 6. Correlation between the annual precipitation in Ljubljana (P_L) and annual mean water levels of the Sava River in Zagreb (SV_Z)

U specijalnim statistikama ima i drugih klasifikacija. D. Srebnović (1970), na primjer,

citira da koeficijent korelacije između 0.50 i 0.75 ukazuje da je korelacijski odnos »slab«. Suprotno tome, V. Jevđević (1965) uzima da je to »dobro približavanje«.

Imamo, dakle, egzaktni dokaz da je srednji vodostaj Save u Zagrebu ipak u znatnoj mjeri ovisan o godišnjim padalinama u Ljubljani, u sprkos izuzetnoj zamršenosti tog odnosa.

Zaključak

1. Sudeći prema trendu padalina u Ljubljani, može se zaključiti da u promatranom razdoblju nije došlo do bitne promjene izravnote količine padalina; utvrđen je pad za 19 mm, ili samo za 1.3 % u odnosu na početnu godinu, a to — s hidrološkog stanovišta — znači praktički nepromijenjeno stanje.

2. Usporedbom koeficijentata varijacije vidi se da su visoki (27.3 %) i srednji (40 %) vodostaji Save u Zagrebu mnogo varijabilniji od padalina u Ljubljani (20 %). To ne vrijedi za niski vodostaj koji je gotovo jednako malo varijabilan (19.1 posto) kao i padaline u Ljubljani (20 %).

3. Linearni trendovi pokazuju da se vodostaji mogu podijeliti u dvije skupine. a) Prvo je niski vodostaj (sl. 4), koji pokazuje silazni trend. Izravnuti niski vodostaj pao je za 20 cm, odnosno za 16 %. b) Suprotno tome su srednji i visoki vodostaji (sl. 3 i sl. 5). Visoki vodostaj pokazuje izuzetno jaki uzlazni trend, tj. izravnuti visoki vodostaj porastao je za 231 cm, odnosno čak za 166 %. I srednji vodostaj pokazuje blagi uzlazni trend. Izravnuti srednji vodostaj porastao je od 1850. do 1980. za 10.27 cm, tj. za 34 %.

Da bi se našlo zadovoljavajuće objašnjenje za te suprotne trendove, treba podsjetiti na konstatiranu činjenicu da u sekularnom hodu padalina u Ljubljani nije utvrđen izrazitiji silazni ili uzlazni trend. Isto tako, količina vode koja se crpi za vodoopskrbu Zagreba čini vrlo malen dio protoka, pa se ovaj faktor može zanemariti prilikom analize srednjih, pa čak i najnižih godišnjih vodostaja. To osobito vrijedi za razdoblje prije drugog svjetskog rata. Iako je potrošnja vode u Zagrebu u posljednjih 15-ak godina bitno porasla, ona još uvijek nije faktor na koji bi trebalo ozbiljnije računati prilikom analize vodostaja Save. Uzmimo samo jedan primjer, ali će i on biti dovoljno reprezentativan. God. 1978. kroz Zagreb-Bundek proteklo je 9.74 milijardi m³ vode. (15) Te iste godine javni vodovod je isporučio gradu 81.7 milijuna m³ vode, a to čini samo 0.8 % protekle vode. Nije bitno drukčije i u danima najmanjih dnevnih proticaja; tako je 26. 11. 1978. bio najmanji protok te godine, a iznosio je 82.7 m³/s. Ako se uzme da »...današnja eksploatacija podzemne vode na crpilištima Vodovoda grada Zagreba iznosi 3 m³/s...«, (Šare i drugi, 1980), onda to iznosi 3.6 % protekle vode toga dana s najmanjim protokom 1978. godine. Osim toga, bitno je naglasiti da se najveći dio vode crpi nizvodno od Savskog mosta, pa to još manje može utjecati na vodostaj Save.

4. Pozitivna korelacija između godišnjih količina padalina u Ljubljani i srednjih godišnjih vodostaja Save u Zagrebu nedvosmisleno ukazuje da je srednji vodostaj Save u Zagrebu prije svega funkcija količine padalina u poriječju Save uzvodno od Zagreba, dok se utjecaj nasipa očituje gotovo isključivo na visokom vodostaju.¹

Summary

THE FLUCTUATIONS OF WATER LEVELS OF THE SAVA RIVER IN ZAGREB, CROATIA

by

Tomislav Šegota

In the gaging station Zagreb the datum of gage »O« was lowered twice, which is the reason why the published data of the stages must be reduced.

In the analysed period the linear trend of precipitation in Ljubljana reveals no significant change, especially not from a hydrological standpoint.

Coefficients of variation on the regression line reveal that the annual maximum (27.3%) and annual mean (40%) water levels are much more variable than the annual precipitation in Ljubljana (20%). In contrast, the annual minimum water levels are equally variable (19.1%) as the precipitation in Ljubljana (20%).

The annual minimum water levels (Fig. 4) reveal a downward trend. The annual mean water levels (Fig. 3) reveal a slight upward trend, and the annual maximum water levels (Fig. 5) have a pronounced upward trend. In spite of an enormous rise in exploitation of ground water this factor until now was not important in comparison with the discharge.

The correlation coefficient between the annual precipitation in Ljubljana and mean annual stages of the Sava River in Zagreb is found to be $r = +0.68$.

LITERATURA:

- Zuljić, S. (1964): Zagreb i okolica I. Geografski glasnik 26, 65-182, Zagreb.
Srebrenović, D. (1976): Zagreb i njegova hidro-tehnička problematika. Građevinar 28 (10), 417-432, Zagreb.

1) Najiskrenije se zahvaljujem osoblju Hidrološkog odjela Hidrometeorološkog zavoda, Mesnička ul. 49, zbog neuobičajene susretljivosti i pomoći u radu. Mnogo sam zahvalan prof. dru B. Makjaniću koji me je upozorio na jedan propust u statističkoj obradi.

- Srebrenović, D. (1970): Problemi velikih voda. Zagreb.
- Pilar, M., D. Srebrenović, F. Buđušić, Z. Šelanec, M. Braun, D. Brundić (1971): Vodoprivredna problematika Savske doline u SR Hrvatskoj. Savjetovanje o Posavini, 1-39, Zagreb.
- Šterc, S. (1979): Osnovne fizičkogeografske karakteristike savskog porječja između Radeča i Siska. Radovi Geografskog odjela (zavoda) PMF, sv. 14, 47-59, Zagreb.
- Manohin, V. (1952): Kratak pregled temperatur in padavin v Ljubljani v 100-letni opazovalni dobi 1851—1950. Geografski vestnik 24, 135-144, Ljubljana.
- Furlan, D. (1952): Kritičen pretres arhiva meteorološke postaje v Ljubljani. Geografski vestnik 24, 194-197, Ljubljana.
- Dukić, D. (1957): Sava. Potamološka studija. SAN. Posebna izdanja, sv. 275, Geografski institut, k. 12, Beograd.
- Vujasinović, B. (1971): Historijat hidrotehničkih i meliracionih radova u dolini rijeke Save. Savjetovanje o Posavini, 41-51, Zagreb.
- Pilar, M., K. Čahun (1972): Vodoprivredna problematika sliva rijeke Save. Vodoprivreda 4 (15-16), 825-849, Beograd.
- Vadlja, J. (1965): Poplava u Zagrebu 1964. Građevinar 17 (1), 27, Zagreb.
- Serdar, V. (1966) Udžbenik statistike. Zagreb.
- Srebrenović, D. (1970): Primjena matematsko statističkih metoda u hidrologiji. Zagreb.
- Jevđević, V. (1956): Hidrologija I. Beograd.
- SHMZ (1980): Hidrološki godišnjak Jugoslavije 1978, I. Beograd.
- Centar za ekonomski razvoj grada Zagreba i Zavod za statistiku (1981): Statistički godišnjak Zagreba. Zagreb.
- Šare, J., P. Miletić, G. Turić, B. Švel, M. Benc, D. Mayer (1980): Rezerve podzemnih voda i vodoopskrba grada Zagreba. Savjetovanje Ljudski okoliš u Zagrebu, 201-215, Zagreb.