

МИНИМАЛНИ ВОДОСТАЈИ ДУНАВА И СНАБДЕВАЊЕ ВОДОМ ХИДРОСИСТЕМА ДУНАВ-ТИСА-ДУНАВ

ЈАСМИНА ЈОСИМОВ ДУЊЕРСКИ¹

РАДОВАН САВИЋ¹

АНЂЕЛКА БЕЛИЋ¹

ЉУБОМИР ЛЕТИЋ²

Извод: Тема овог рада је разматрање теоријских екстремних вредности минималних водостаја Дунава, на основу дистрибуција које се најчешће користе у хидролошким анализама. У раду се анализирају вероватноће појаве минималних водостаја Дунава на водомерној станици Бездан на основу опажених вредности у периоду након корекције “нуле” водомера 1956. до данас. Анализе су спроведене у погледу услова за снабдевање Основне каналске мреже Хидросистема Дунав-Тиса-Дунав (ХС ДТД) водом из Дунава на главном водозахвату код Бездана. Критични водостаји Дунава за снабдевање водом каналског система ДТД су $\leq +60$ cm, ≤ 0 cm и ≤ -25 cm. Применом пет теоријских расподела, и три различита сценарија, добијени резултати упућују на најнеповољније услове током последње три деценије. Вероватноћа појаве водостаја $\leq +60$ cm је 96-99%, вероватноћа водостаја ≤ 0 cm 62-70%, а водостаја ≤ -25 cm 34-40%. Водостај $\leq +60$ cm очекује се сваке године ($T = 1,01-1,04$), водостај ≤ 0 cm сваких годину/две ($T = 1,43-1,61$), а водостај ≤ -25 cm са повратним периодом $T = 2,50-2,94$ сваке две/три године.

Кључне речи: минимални водостај, емпиријска расподела, теоријске расподеле, тестирања, повратни период

MINIMUM WATER LEVELS OF THE DANUBE AND THE WATER SUPPLY OF THE DANUBE-TISA-DANUBE HYDRO-SYSTEM

Abstract: The aim of this paper was to estimate theoretical extremes of the river Danube minimum water levels, using the most common distributions applied in the hydrological frequency analysis. It studies the probability of the Danube minimum water level occurrence at the watergauge station Bezdan on the basis of the values observed in the period from 1956 when the 'zero' watermeter was adjusted to the present. The conducted analyses refer to the conditions for the supply of the main canal network of the Danube-Tisa-Danube Hydro-system (HS DTD) with the water released from the river Danube at the main water intake at Bezdan. The Danube water levels that are critical for the water supply of the canal system DTD are $\leq +60$ cm, ≤ 0 cm and ≤ -25 cm. The results of five theoretical distributions and three different scenarios point to the worst case scenario in the last three decades. The probability of the occurrence of the water levels $\leq +60$ cm is 96-99%, while it amounts to 62-70% for the water levels ≤ 0 cm, and 34-40% for the the water levels ≤ -25 cm. The water levels $\leq +60$ cm are expected every year ($T = 1.01$ to 1.04), the water levels ≤ 0 cm every year or two ($T = 1.43$ to 1.61), and the water levels ≤ -25 cm with a return period $T = 2.50$ to 2.94 every two/three years.

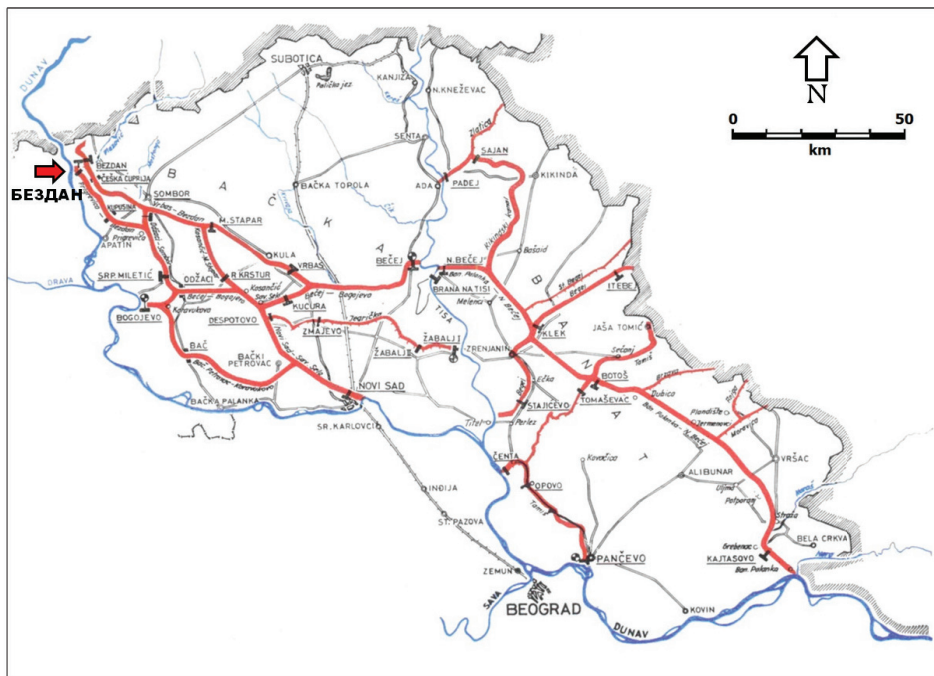
Keywords: minimum water levels, empirical distribution, theoretical distributions, testing, return period

1 др Јасмина Јосимов-Дунђерски, доцент; др Радован Савић, ред. проф.; др Анђелка Белић, ред. проф.; Универзитет у Новим Саду, Пољопривредни факултет, Департмент за уређење вода, Нови Сад

2 др Љубомир Летић, ред. проф.; Универзитет у Београду, Шумарски факултет, Београд

1. УВОД

Вишенаменски Хидросистем Дунав-Тиса-Дунав (ХС ДТД) сачињавају низ хидротехничких објеката и Основна каналска мрежа (ОКМ) која пресеца војвођанску равницу и повезује токове река Дунава и Тисе. Најзначајније улоге и задаци ХС ДТД су одводњавање унутрашњих вода, наводњавање, одбрана од поплава, снабдевање водом, одвођење употребљених вода, пловидба, туризам, рибарство, развој шумских култура и плантажа и аутохтоних шумских заједница. ХС ДТД се простире у Бачкој и Банату са укупном дужином канала од 930 km, од чега је пловно око 664 km. Систем канала подељен је тако да се у појединим деловима, базенима, одржава дириговани водни режим, у погледу протицаја и водостаја. Функционалност система обезбеђују 23 уставе, пет сигурносних устава, затим 15 бродских преводница (још пет нису више у функцији), пет великих црпних станица (слика 1) и око 90 мостова (Милованов, Д., 1972; Ликић, Б., 2002). Мрежа канала повезује око 80 насеља. Сваки појединачни објекат на каналима ХС ДТД, као део интегралног система, у дужем временском периоду мора пружати сигурност у раду. Један од основних предуслова за пуну функционалност и задовољење потреба свих корисника вишенаменског Хидросистема ДТД је континуално обезбеђивање довољних количина воде. Део Хидросистема



Слика 1. Основна каналска мрежа Хидросистема Дунав-Тиса-Дунав (ХС ДТД) и положај водозавхата код Бездана
Figure 1. The main canal network of the Danube-Tisa-Danube Hydro-system (HS DTD) and the position of the water intake at Bezdan

који се простира на подручју Бачке снабдева се водом преко два водозахвата на Дунаву: Бездан и Богојево. При томе се, како по историјском значају, тако и по количинама упуштене воде у Хидросистем, издваја водозахват код Бездана.

Како наводе Савић, Р., Бездан, А. (2009), од изградње првог захвата воде из Дунава код Бачког Моноштора за потребе канала између Дунава и Тисе, прошло је више од 200 година. У том периоду долазило је до евидентних промена морфолошких и хидролошких карактеристика у сливу и кориту Дунава које су, између осталог, резултирале измештањем трасе корита и снижењем минималних и средњих водостаја (Милованов, Д., 1972). Ове промене су, до сада, условиле три пута измештање локације водозахвата. Наиме, после сваких 30-50 година експлоатације изгубљена је могућност гравитационог упуштања воде у канал, а задњих година, због ниских водостаја, повремено је долазило и до ограничавања рада црпне станице (Милошев, Ж., 2002; Ликић, Б., 2002; Рајић, Д., 2002; Милошев, Ж., Савић, Р., 2005, 2009).

На сликама 2 и 3 приказани су спој канала ДТД са Дунавом и бродска преводница код водозахвата Бездан, а на слици 4. карактеристични нивои воде на овом профилу.



Слика 2. Канал ДТД код водозахвата
Бездан

(<http://www.vodevojvodine.com>)

Figure 2. DTD canal at the water intake of
Bezdan

(<http://www.vodevojvodine.com>)



Слика 3. Бродска преводница код
водозахвата Бездан

(<http://www.vodevojvodine.com>)

Figure 3. Ship lock at the water intake of
Bezdan

(<http://www.vodevojvodine.com>)

Пројектом је предвиђено да се из Хидросистема може наводњавати чак 510.000 ha, али се нажалост тренутно наводњава само 30.000 ha. Изградњом Хидросистема ДТД одбрамбена линија од великих и плавних вода у Војводини сведена је са 502 km на 446 km, а време трајања одбране од поплава драстично скраћено. Просечно се годишње индустрији испоручи 40 милиона кубика воде. Канал такође служи за пловидбу и транспорт робе (пројектовани капацитет превоза робе у систему ДТД је 7 милиона тона годишње).

Отпадне воде из насеља и индустрије као и са пољопривредних површина које се уливају у каналски систем у укупном билансу вода имају значајан

удео, истовремено употребљене воде нарушавају квалитет површинских и подземних вода у каналском систему и подземљу. Употребљене воде нарушавају екосистем каналског система поготово у летњим месецима. Квалитет вода је од пресудног значаја за водоснабдевање становништва, пољопривреде, за развој шумарства, рибарства, наптичког туризма и рекреације (Анђелковић, А. *et al.*, 2014).



Слика 4. Карактеристични нивои воде Дунава на хидролошкој станици Бездан (<http://www.hidmet.gov.rs>)

Figure 4. Characteristic water levels of the Danube at the watergauge station of Bezdan (<http://www.hidmet.gov.rs>)

Пројектовање објеката за коришћење вода подразумева задовољење потреба људи и привреде за водом. То су, пре свега, објекти у систему за водоснабдевање, наводњавање и пловидбу. С обзиром на то да потребе за водом стално расту са порастом броја становника и развојем друштва, оне се морају стално усклађивати са ограниченим расположивим количинама и квалитетом воде. За разлику од пројектовања објеката за заштиту од вода где је основни циљ заштита приобаља од поплава великим водама, у пројектовању објеката за коришћење вода од превасходног интереса су просечни и/или минимални протицаји/водостаји од значаја за ублажавање ефекта малих вода када снабдевање водом постаје проблематично или се испољавају неке друге негативне последице по људске делатности или животну средину. Тако су, на пример, већ приметни ефекти које ови водостаји имају на снижавање нивоа подземних вода у непосредном приобаљу водотока током појединих година или сезона, а самим тим и на услове за обезбеђивање воде за пољопривреду и шумарство (Медаревић, М. *et al.*, 2009; Никић, З. *et al.*, 2010; Стојановић, Д. *et al.*, 2014).

За снабдевање водом бачког дела ХС ДТД познавање појаве и времена трајања ниских водостаја на хидролошке станице Бездан је од изузетног

значаја. Наиме, за потребе Хидросистема вода се узима из Дунава на главном водозахвату код Бездана, и то гравитационо или пумпањем. Од хидролошког режима водостаја Дунава и ефикасност овог водозахвата, као и водозахвата Богојево такође зависи да ли ће корисницима Хидросистема у Бачкој бити испоручене довољне количине воде за различите намене (Милованов, Ж., Савић, Р., 2005).

Објекти који омогућавају упуштање воде у каналску мрежу су захватна устава на каналу Пригревица - Бездан и црпна станица Бездан II на каналу Врбас - Бездан (Милованов, Д., 1972). Устава има три отвора (димензија 5,0 x 4,2 m) са сегментним затварачима. Максимално упуштање воде на устава, је око $60 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, и оно се одвија при водостајима на хидролошка станица Бездан између +220 cm и +550 cm. Када су водостаји већи од +550 cm устава се затвара због одбране од поплава, а при водостајима нижим од +220 cm смањује се могућност гравитационог упуштања воде у канал. При водостајима од +60 cm гравитационо упуштање је сасвим онемогућено. При овим ниским водостајима, устава се такође затвара да не би дошло до истицања воде из канала назад у Дунав. Тада се пушта у рад црпна станица Бездан II, укупног капацитета $12 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (3 агрегата капацитета по $4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).

Режим рада црпне станице је такав да при водостајима Дунава од 0 cm до +220 cm могу да раде сва три агрегата, док при још нижим водостајима, испод 0 cm, може да ради само један и то до нивоа од око -25 cm. При нивоима Дунава испод ове вредности (-25 cm) искључено је свако снабдевање водом ХС ДТД. Из предходно изложеног јасно је да нивои Дунава у зони Бездана имају изузетну важност за снабдевање водом бачког дела ХС ДТД.

За разматрању проблематику нарочито је важно указати на веома изражен опадајући тренд минималних водостаја Дунава на водомерној станици Бездан (хидролошка станица Бездан). Линија тренда, за период од 1891. до 2005. године, се спушта од 81,45 m на почетку посматраног периода све до 80,60 m током 2000-тих година, дакле уочено снижење минималних годишњих водостаја је близу 1 m (Милованов, Ж., Савић, Р., 2009).

У овом раду су анализиране вероватноће појаве рачунских минималних водостаја на Дунаву код Бездана на основу опажених вредности, у периоду након корекције нуле водомера 1956. године до данас. Изабрани начин примене математичко-статистичких метода дозвољава извођење закључака на нивоу статистичке сигурности, не улазећи у физичке законитости формирања отицаја, сушне периоде, концентрацију протицаја, и водостаја на хидролошка станица Бездан (Chatfield, С., 2004; Прохаска, С., Ристић, В., 1996; Рајић, М., Јосимов Дунђерски, Ј., 2007).

2. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Предмет ове анализе представљају подаци о минималним годишњим водостајима на Дунаву у периоду 1956-2012. на хидролошком профилу водомерне станице Бездан. Извори података су базе РХМЗ Србије о регистрованим водостајима на хидролошкој станици Бездан.

На основу минималних годишњих водостаја добијене су нумеричке

карактеристике узорака: аритметичка средина, стандардна девијација, коефицијент асиметрије и њихове оцене (μ , σ , C_s), које су коришћене у даљој анализи и тумачењу резултата.

Примењене су методе:

- основна статистичка обрада података;
- теоријске расподеле: Нормална, Лог-нормална, Гумбелова, Пирсон III и Лог-Пирсон III;
- емпиријска расподела применом Вејбулове формуле;
- статистичка тестирање: χ^2 и Колмогоров тест за доброту прилагођавања расподела, Студентов t-тест за хомогеност и аутокорељациони $Z_{(r)}$ тест за независност;
- повратни период: Повратни период се дефинише као просечно време између догађаја $X \leq x$, тако да је:

$$P(X \leq x) = F(x) = \frac{1}{T(x)} \quad \text{односно} \quad T(x) = \frac{1}{F(x)}, \quad \text{где је } F(x) \text{ функција распо-}$$

деле случајно променљиве X .

3. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА И ДИСКУСИЈА

Промена водостаја реке Дунав у зони водозахвата на Бездану догађају се због спуштања дна и проширења протицајног профила реке Дунав у зони водозахвата. Рачунски минимални водостаји изведени применом пет теоријских расподела приказани су у табелама: водостаји различитих перцентила, вероватноће појава карактеристичних минималних водостаја (+60 cm, 0 cm, -25 cm) и њихови повратни периоди. Резултати су анализирани кроз периоде у зависности од изабраног хронолошког низа: I период даје рачунске минималне водостаје на основу података временски низа 1956-2012 ($N = 57$); II период на основу података за временски низ 1956-1982 ($N = 27$); и III период на основу података за временски низ 1983-2012 ($N = 30$).

I период: Резултати рачунских минималних водостаја периода 1956-2012 ($N = 57$) дати су у табелама 1, 2 и 3.

Табела 1. Рачунски минимални водостаји (cm) различитих вероватноћа по теоријским расподелама (извор:оригинал)

Table 1. Calculation of the minimum levels (cm) of different probabilities according to theoretical distributions (source origin)

Расподела Distribution	0,1%	1%	5%	10%	50%	70%	90%	95%	99%	99,9%
Нормална	-131	-96	-64	-48	11	35	69	86	117	152
Лог-нормална	-129	-95	-64	-48	11	35	69	86	117	153
Гумбел	-79	-64	-49	-40	3	27	70	96	154	236
Пирсон типа III	-99	-79	-57	-45	7	32	71	92	134	185
Лог-Пирсон типа III	-98	-78	-57	-45	7	32	71	92	134	187

Табела 2. Вероватноће појаве карактеристичних минималних водостаја (%) по теоријским расподелама (извор: оригинал)

Table 2. Probabilities of the characteristic minimum water levels (%) according to theoretical distributions (source origin)

Расподела Distribution	$P(X \leq +60)$	$P(X \leq 0)$	$P(X \leq -25)$	$P(0 \leq X \leq +60)$	$P(-25 \leq X \leq +60)$
Нормална	86	41	22	45	64
Лог-нормална	86	41	22	45	64
Гумбел	87	47	22	40	65
Пирсон типа III	85	44	23	41	62
Лог-Пирсон типа III	85	44	23	41	62

Табела 3. Повратни периоди Т карактеристичних минималних водостаја (год.) по теоријским расподелама (извор: оригинал)

Table 3. The return period T (year) of the characteristic minimum water levels according to theoretical distributions (source origin)

Расподела Distribution	$P(X \leq +60)$	$P(X \leq 0)$	$P(X \leq -25)$
Нормална	1,16	2,44	4,55
Лог-нормална	1,16	2,44	4,55
Гумбел	1,15	2,13	4,55
Пирсон типа III	1,18	2,27	4,35
Лог-Пирсон типа III	1,18	2,27	4,35

Најнижи рачунски минимални водостаји различите вероватноће преко теоријских расподела (табела 1) добијени су применом Нормалне и Лог-нормалне функција расподеле, затим Пирсон III и Лог-Пирсон III функција расподеле. Тако, за вероватноћу од 1%, што одговара стогодишњем повратном периоду, рачунски водостаји по Нормалној и Лог-нормалној функцији расподеле су -96 cm односно -95 cm, по Пирсон III и Лог Пирсон III функцијама расподеле -79 cm односно -78 cm, док по Гумбеловој расподели износи -64 cm. У случају вероватноће од 50%, што одговара повратном периоду од 2 године, по Гумбеловој расподели рачунски водостај је 3 cm, затим следе Пирсон III и Лог-Пирсон III са 7 cm, а највиши водостај добијен је по Нормалној и Лог-нормалној расподели 11 cm. За максималну вероватноћу 99,9% најниже вредности водостаја добијене су по Нормалној и Лог-нормалној расподели 152 cm и 153 cm, затим по Пирсон III и Лог-Пирсон III 185 cm и 187 cm, а највиша вредност добијена је Гумбеловом функцијом 236 cm.

Вероватноћа појаве водостаја $\leq +60$ cm је 85-87%, вероватноћа појаве водостаја ≤ 0 cm је 41-47%, а водостаја ≤ -25 cm 22% и 23% (табела 2). Водостај $\leq +60$ cm очекује се сваке године ($T = 1,15-1,18$), водостај ≤ 0 cm сваке друге

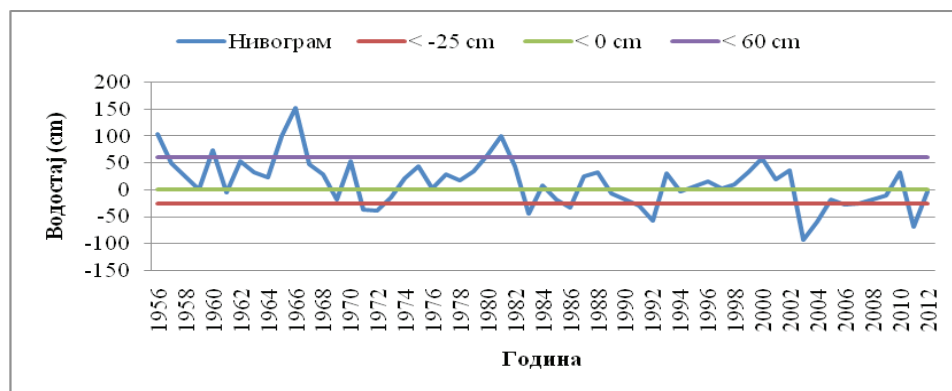
године ($T = 2,13-2,44$), а водостај ≤ -25 cm сваких четири/пет година ($T = 4,35-4,55$) (табела 3).

Међутим, иако је у квантитативним показатељима потврђено прилагођавање теоријских расподела емпириској расподели (χ^2 -тест), други показатељи, тестови хомогености и случајности (Студентов t-тест и Аутокорелациони $Z_{(r)}$ тест) указују да минимални водостаји овог истраживаног периода не припадају истој популацији (табела 4).

Табела 4. Статистике хронолошких серија истраживања (извор: оригинал)

Table 4. Statistics of the time series data (source origin)

Статистике Statistics	ПОДАЦИ ХРОНОЛОШКИХ СЕРИЈА DATA CHRONOLOGICAL SERIES					
	1956-2012 (N = 57) I период / I period	1956-1982 (N = 27) II период / II period	1983-2012 (N = 30) III период / III period			
μ (mm/cm)	80,75/11	81,00/36	80,52/-12			
σ (cm)	46	44	40			
C_s	0,5	0,6	-0,2			
$\mu_{Y(\log X)} / \mu_{Y(\ln X)}$	1,90712/4,39131	1,908477/4,394430	1,905904/4,388505			
$\sigma_{Y(\log X)} / \sigma_{Y(\ln X)}$	0,002456/0,005656	0,002373/0,005464	0,001833/0,004221			
$C_{YS(\log X)} / C_{YS(\ln X)}$	0,5/0,5	0,5/0,5	-0,3/-0,3			
χ^2 ($\chi^2 < \chi^2_{\text{критично}}$) и Колмогоров тест ($D_{\text{max}} < D_{\text{критично}}$; N = 27 $D_{\text{критично}} = 0,254$; N = 30 $D_{\text{критично}} = 0,242$;) доброће прилагођавања теоријских и емпиријских расподела χ^2 ($\chi^2 < \chi^2_{\text{critical}}$) and Kolmogorov ($D_{\text{max}} < D_{\text{critical}}$; N = 27 $D_{\text{critical}} = 0,254$; N = 30 $D_{\text{critical}} = 0,242$;) Goodness-of-Fit Test for Theoretical and Empirical Distribution						
Normalna	2,81 < 5,99	0,102	0,064			
Log-normalna	2,83 < 7,81	0,098	0,064			
Gumbel	3,22 < 5,99	0,098	0,093			
Pirson tipa III	3,15 < 3,84	0,079	0,063			
Log-Pirson tipa III	3,69 < 5,99	0,075	0,065			
Студентов t-тест хомогености и Аутокорелациони $Z_{(r)}$ тест независности Student's t-test for testing independence, and Autocorrelation $Z_{(r)}$ test for testing randomness						
	T	$Z_{(r)}$	t	$Z_{(r)}$	T	$Z_{(r)}$
	3,95	3,31	1,32	1,84	-0,31	1,16
Критичне вредности/ Critical values for $\alpha=0.05$	$\pm 2,00$	$\pm 1,96$	$\pm 2,06$	$\pm 1,96$	$\pm 2,06$	$\pm 1,96$



Слика 5. Минимални годишњи водостаји (1956-2012)

Figure 5. Minimum annual water levels (1956-2012)

На основу нивограма за укупни истраживачки период 1956-2012, слика 6, издвајају се два низа, период 1956-1982 и период 1983-2012. година, са различитим статистичким вредностима. Примењени квантитативни показатељи на овим низовима на нивоу значајности од $\alpha = 0,05$ потврдили су и хомогеност и случајност водостаја као и прилагодљивост примењених теоријских расподела са емпиријским.

II период: Резултати рачунских минималних водостаја периода 1956-1982 ($N = 27$) дати су у табелама 5, 6 и 7.

Табела 5. Рачунски минимални водостаји (cm) различитих вероватноћа по теоријским расподелама (извор: оригинал)

Table 5. Calculation of the minimum levels (cm) of different probabilities according to theoretical distributions (source origin)

Расподела Distribution	0,1%	1%	5%	10%	50%	70%	90%	95%	99%	99,9%
Нормална	-101	-67	-37	-21	36	59	93	109	139	173
Лог-нормална	-100	-66	-37	-21	36	59	93	109	139	174
Гумбел	-51	-37	-22	-13	29	52	94	119	175	255
Пирсон типа III	-65	-47	-29	-17	32	56	95	116	158	211
Лог-Пирсон типа III	-70	-50	-30	-18	32	56	95	115	156	206

Табела 6. Вероватноће појаве карактеристичних минималних водостаја (%) по теоријским расподелама (извор: оригинал)

Table 6. Probabilities of the characteristic minimum water levels (%) according to theoretical distributions (source origin)

Расподела Distribution	$P(X \leq +60)$	$P(X \leq 0)$	$P(X \leq -25)$	$P(0 \leq X \leq +60)$	$P(-25 \leq X \leq +60)$
Нормална	71	21	8	50	63
Лог-нормална	71	21	8	50	63
Гумбел	76	21	4	55	72
Пирсон типа III	70	22	7	48	63
Лог-Пирсон типа III	72	22	7	50	65

Табела 7. Повратни периоди T карактеристичних минималних водостаја (год.) по теоријским расподелама (извор: оригинал)

Table 7. The return period T (year) of the characteristic minimum water levels according to theoretical distributions (source origin)

Расподела Distribution	$P(X \leq +60)$	$P(X \leq 0)$	$P(X \leq -25)$
Нормална	1,41	4,76	12,50
Лог-нормална	1,41	4,76	12,50
Гумбел	1,32	4,76	25,00
Пирсон типа III	1,43	4,55	14,29
Лог-Пирсон типа III	1,39	4,55	14,29

Најнижи рачунски минимални водостаји (табела 5) добијени су применом нормалне и Лог-нормалне функција расподеле, затим Пирсон

III и Лог-Пирсон III функција расподеле. Тако, за вероватноћу од 1%, што одговара стогодишњем повратном периоду, рачунски водостај по Нормалној и Лог-нормалној функцијама расподеле су -67 cm односно -66 cm, по Пирсон III и Лог-Пирсон III функцијама расподеле -47 cm односно -50 cm, док по Гумбеловој расподели износи -37 cm. У случају вероватноће од 50%, што одговара повратном периоду од 2 године, по Гумбеловој расподели рачунски водостај је 29 cm, затим следе Пирсон III и Лог-Пирсон III са 32 cm, а највиши водостај добијен је по Нормалној и Лог-нормалној 36 cm. За максималну вероватноћу 99,9% најниже вредности водостаја добијене су по Нормалној и Лог-нормалној расподели 173 cm и 174 cm, затим по Лог-Пирсон III и Пирсон III и 206 cm и 211 cm, а највиша вредност добијена је Гумбеловом функцијом 255 cm.

Вероватноћа појаве водостаја $\leq +60$ cm је 70-76%, вероватноћа водостаја ≤ 0 cm 21-22%, а водостаја ≤ -25 cm 4-8% (табела 6). Водостај $\leq +60$ cm очекује се сваких годину/две ($T = 1,32-1,43$), водостај ≤ 0 cm сваких четири/пет година ($T = 4,55-4,76$), а водостај ≤ -25 cm свских 12 – 15 година, осим по Гумбеловом закону расподеле на 25 година (табела 7).

III период: Резултати рачунских минималних водостаја периода 1983-2012 ($N = 30$) дати су у табелама 8, 9 и 10.

Табела 8. Рачунски минимални водостаји (cm) различитих вероватноћа по теоријским расподелама (извор: оригинал)

Table 8. Calculation of the minimum levels (cm) of different probabilities according to theoretical distributions (source origin)

Расподела Distribution	0,1%	1%	5%	10%	50%	70%	90%	95%	99%	99,9%
Нормална	-117	-91	-68	-55	-12	6	32	44	67	93
Лог-нормална	-116	-91	-68	-55	-12	6	32	44	67	94
Гумбел	-78	-68	-56	-49	-18	0	32	51	95	156
Пирсон типа III	-127	-96	-70	-56	-11	7	31	42	62	83
Лог-Пирсон типа III	-131	-98	-70	-56	-10	7	30	41	60	79

Табела 9. Вероватноће појаве карактеристичних минималних водостаја (%) по теоријским расподелама (извор: оригинал)

Table 9. Probabilities of the characteristic minimum water levels (%) according to theoretical distributions (source origin)

Расподела Distribution	$P(X \leq +60)$	$P(X \leq 0)$	$P(X \leq -25)$	$P(0 \leq X \leq +60)$	$P(-25 \leq X \leq +60)$
Нормална	98	64	35	34	63
Лог-нормална	98	64	35	34	63
Гумбел	96	70	40	26	56
Пирсон типа III	99	63	34	36	65
Лог-Пирсон типа III	99	62	34	37	65

Табела 10. Повратни периоди **T** карактеристичних минималних водостаја (год.) по теоријским расподелама (извор:оригинал)

Table 10. The return period **T** (year) of the characteristic minimum water levels according to theoretical distributions (source origin)

Расподела Distribution	$P(X \leq +60)$	$P(X \leq 0)$	$P(X \leq -25)$
Нормална	1,02	1,56	2,86
Лог-нормална	1,02	1,56	2,86
Гумбел	1,04	1,43	2,50
Пирсон типа III	1,01	1,59	2,94
Лог-Пирсон типа III	1,01	1,61	2,94

Најнижи рачунски минимални водостаји (табела 8) добијени су применом Лог-Пирсон III и Пирсон III функција расподеле, затим Нормалне и Лог-нормалне функција расподеле. Тако, за вероватноћу од 1%, што одговара стогодишњем повратном периоду, рачунски водостаји по Лог-Пирсон III и Пирсон III функцијама расподеле су -98 cm односно -96 cm, по Нормалној и Лог-нормалној функцијама расподеле -91 cm, док по Гумбеловој расподели износи -68 cm. У случају вероватноће од 50%, што одговара повратном периоду од 2 године, по Гумбеловој расподели рачунски водостај је -18 cm, затим следе Нормална и Лог-нормална расподела са -12 cm, а највиши водостај добијен је по Лог-Пирсон III -10 cm. За максималну вероватноћу, 99,9% најниже вредности водостаја добијени су по Лог-Пирсон III расподели 83 cm, а највиша вредност добијена је Гумбеловом функцијом 156 cm.

Вероватноћа појаве водостаја $\leq +60$ cm је 96-99%, вероватноћа водостаја ≤ 0 cm 62-70%, а водостаја ≤ -25 cm 34-40% (табела 9). Водостај $\leq +60$ cm очекује се сваке године ($T = 1,01-1,04$), водостај ≤ 0 cm сваких годину/две ($T = 1,43-1,61$), а водостај ≤ -25 cm са повратним периодом $T = 2,50-2,94$ сваке две-три године (табела 10).

Добијени резултати разликују се у зависности од хронолошких низова минималних водостаја који су приказани кроз I период, II период и III период. Најнеповољније услове дају резултати примењених теоријских расподела за последње три деценије.

Проблем појаве минималних водостаја истраживали су Савић, Р., Бездан, А. (2009), анализом трајања водостаја Дунава на хидролошкој станици Бездан нижих од карактеристичних вредности: +60 cm и 0 cm за период 1945-2008. године. Просечно трајање водостаја испод +60 cm износи 47 дана, односно, толико је у просеку дана годишње снабдевање ХС ДТД могуће искључиво пумпањем, што поред ограничења у количини захваћене воде има и изузетно неповољне економске ефекте. Такође је, и у овом случају, приметна тенденција све дужих периода појаве овог и нижих водостаја, од 48 све до 164 дана. Чак се и водостаји нижи од 0 cm, када ни црпна станица не може да ради пуним капацитетом, све чешће јављају. Њихово трајање, за посматрани период, у просеку је око 10 дана, али су се нпр. екстремне 2003. године јавили у чак 95 дана, а потом, у периоду до 2008. године у 25, 16, 23, 6 и 15 дана, редом. Трајање ових водостаја, такође има растући тренд,

а годишња дистрибуција минималних водостаја указује да се јављају у јесење-зимском периоду (октобар-март). С обзиром на то да је водозахват код Бездана по капацитету најзначајнији за снабдевање бачког дела ХС ДТД водом. Ова чињеница, поред хидротехничких и економских проблема, може да изазове и веома озбиљне еколошке поремећаје, нпр. опадање виталности шумских састојина, због опадања ниво подземних вода који је условљен водостајима Дунава. Истраживања (Стојановић, Д. *et al.*, 2014), којима је разматран утицај осцилације водостаја реке Дунав (хидролошка станица Бездан) на прираст и виталност стабала мешовите састојине лужњака и цера у ШУ „Оџаци” и ШГ „Сомбор” утврдила су значајну повезаност прираста са осцилацијом месечног водостаја. Најнижи водостаји јављају током јесени и зиме и потенцијално представљају лимитирајући фактор за раст и виталност приобалних шумских састојина. Да би се проблем осцилације нивоа воде решио, на каналском систему постављене су уставе којима се регулише осцилација новоа воде током годишњег хидролошког циклуса.

4. ЗАКЉУЧЦИ

Од изградње првог захвата воде из Дунава код Бачког Моноштора за потребе снабдевања водом канала између Дунава и Тисе прошло је више од 200 година. Ове промене су, до сада, условиле три пута измештање локације водозахвата. Наиме, после сваких 30-50 година експлоатације изгубљена је могућност гравитационог упуштања воде у канал, због спуштања дна корита реке Дунав и проширивања протицајног профила Дунава у зони водозахвата, а последњих година, због ниских водостаја, долазило је и до ограничавања рада црпне станице.

Вероватноће појаве карактеристичних минималних водостаја на хидролошкој станици Бездан су разматране у вишегодишњем периоду. Добијени резултати указују да долази до све чешће појаве ниских водостаја. Применом пет теоријских расподела, разматраних кроз три периода, најнеповољнији су резултати за последње три деценије. Вероватноћа појаве водостаја $\leq +60$ cm је 96-99%, вероватноћа водостаја ≤ 0 cm 62-70%, а водостаја ≤ -25 cm 34-40%. Водостај $\leq +60$ cm очекује се сваке године ($T = 1,01-1,04$), водостај ≤ 0 cm сваких годину/две ($T = 1,43-1,61$), а водостај ≤ -25 cm са повратним периодом $T = 2,50-2,94$ сваке две-три године.

Добијени резултати су апликативни и актуелни приликом реконструкције црпне станице и добијања најповољнијих параметара за рад црпне станице. Ови подаци могу бити од изузетног значаја при усвајању кота базена црпних агрегата и усисних корпи, како би се омогућило континуално снабдевање водом каналског система ДТД. на водозахвату Бездан у будућем периоду. За који повратни период, односно вероватноћу појаве екстремних малих водостаја и према којој дистрибуцији ће се вршити реконструкција, биће путоказ пројектантима. Свакако да избор зависи од сигурности која се жели постићи у раду црпне станице и значаја који овај капитални објекат има у снабдевању водом Хидросистема Дунав-Тиса-Дунав.

ЛИТЕРАТУРА

- Анђелковић, А., Ђековић, В., Милошевић, Н. (2014): Контрола квалитета воде и муља Палићког језера. Шумарство, 1-2. УШИТС. Београд. 113-129.
- Ликић, Б. (2002): Општи приказ Хидросистема Дунав-Тиса-Дунав, Хидросистем Дунав-Тиса-Дунав 25 година после. Нови Сад: ЈВП Воде Војводине, 41-73.
- Медаревић, М., Банковић, С., Цветковић, Ђ., Абјановић, З. (2009): Проблем сушења шума у Горњем Срему. Шумарство, 3-4: 61-73.
- Милованов, Д. (1972): Хидросистем Дунав-Тиса-Дунав. Нови Сад: Водопривредно предузеће ДТД.
- Милошев, Ж. (2002): Хидротехнички радови у Банату и Бачкој пре изградње Хидросистема Дунав-Тиса-Дунав, Хидросистем ДТД - 25 година после. Нови Сад: ЈВП Воде Војводине, 1-21.
- Милошев, Ж., Савић, Р. (2005): Значај промена минималних водостаја Дунава на хидролошка станица Бездан за водозахват Хидросистема Дунав-Тиса-Дунав. Зборник радова Саветовања Мелиорације у одрживој пољопривреди, Нови Сад: Пољопривредни факултет, 29-37.
- Милошев, Ж., Савић, Р. (2009): Значај појаве екстремних вода Дунава на подручју Војводине. Летопис научних радова, 33(1): 147-154.
- Никић, З., Летић, Љ., Николић, В., Филиповић, В. (2010): Поступак прорачуна режима нивоа подземних вода на станишту хрста лужњака у Равном Срему, Гласник Шумарског факултета Београд, 101: 125-138.
- Прохаска, С., Ристић, В. (1996): Хидрологија кроз теорију и праксу. Београд: Универзитет у Београду, Рударско -Геолошки факултет. Београд.
- Рајић, Д. (2002): Снабдевање водом Хидросистема Дунав-Тиса-Дунав, Хидросистем Дунав-Тиса-Дунав 25 година после. Нови Сад: ЈВП Воде Војводине, 116-129.
- Рајић, М., Јосимов-Дунђерски, Ј. (2007): Инжењерска хидрологија. Нови Сад: Универзитет у Новом Саду, Пољопривредни факултет. Нови Сад.
- Савић, Р., Бездан, А. (2009): Утицај промена нивоа Дунава на могућност захватања воде у ОКМ ХС ДТД. Зборник радова Грађевинског факултета, Суботица, 18: 61-71.
- Стојановић, Д., Леванич, Т., Матовић, Б., Галић, З., Бачкалић, Т. (2014): Водостај Дунава као фактор смањења прираста и виталности стабала мешовите састојине лужњака и цера. Шумарство, 3-4. УШИТС. Београд. 153-160.
- Chatfield, C. (2004): The analysis of time Series: an Introduction. 6th ed. Boca Raton, Fla.: Chapman & Hall/CRC.
- <http://www.vodevojvodine.com>
- <http://www.hidmet.gov.rs>

MINIMUM WATER LEVELS OF THE DANUBE AND THE WATER SUPPLY OF THE DANUBE-TISA-DANUBE HYDRO-SYSTEM

*Jasmina Josimov-Dundjerski
Radovan Savić
Andjelka Belić
Ljubomir Letić*

Summary

Statistical analysis of extreme values have played an important role in the engineering practice of water resources design and management. The theory of extreme values can be applied to improve the rigor of hydrologic applications. A critical issue in the calculation of the minimum levels of the Danube river at Bezdan needed to supply the water to Danube-Tisa-Danube Canal (HS DTD) is the selection of a form of probability distribution to be applied. This paper aims at estimating theoretical extremes of the river Danube minimum water levels, using the most common distributions applied in the hydrological frequency analysis (Normal, Log-normal, Gumbel, Pearson type III, Log-Pearson type III), on which to base the selection.

The paper studies the probability of the Danube minimum water level occurrence at the water-gauge station Bezdan on the basis of the values observed in the period from 1956 when the 'zero' watermeter was adjusted to the present. The conducted analyses refer to the conditions for the supply of the main canal network of the Danube-Tisa-Danube Hydro-system (HS DTD) with the water released from the river Danube at the main water intake at Bezdan. The maximum water release into the canal of about $60 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ occurs only at certain water levels. At lower levels, gravitational release of water into the canal gradually diminishes until its complete cessation and transfer to the work of pumping station whose total capacity amounts to $12 \text{ m}^3/\text{s}$ ($3 \times 4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). The working mode of the pumping station also depends on the Danube water level. In other words, with a decrease in the Danube water level, some pumps stop running until the complete cessation of the pumping station operation and the supply of water to HS DTD. The Danube water levels that are critical for the water supply of the canal system DTD are $\leq +60 \text{ cm}$, $\leq 0 \text{ cm}$ and $\leq -25 \text{ cm}$.

The results show that there is a high probability of the minimum water level occurrence. Five theoretical distributions and three different scenarios point to the worst case scenario in the last three decades. The probability of the occurrence of the water levels $\leq +60 \text{ cm}$ is 96-99%, while it amounts to 62-70% for the water levels $\leq 0 \text{ cm}$, and 34-40% for the the water levels $\leq -25 \text{ cm}$. The water levels $\leq +60 \text{ cm}$ are expected every year ($T = 1.01$ to 1.04), the water levels $\leq 0 \text{ cm}$ every year or two ($T = 1.43$ to 1.61), and the water levels $\leq -25 \text{ cm}$ with a return period $T = 2.50$ to 2.94 every two/three years.