

RAD PROGNOŠTIČKOG HIDROLOŠKO-HIDRAULIČKOG MODELA SAVA SM2 TIJEKOM POPLAVNOG DOGAĐAJA IZ SVIBNJA 2023. NA PODRUČJU MALOG SLIVA KUPA

Sandro Josić, mag. ing. aedif.
Hidroprojekt-consult d.o.o.
sjosic@hidroprojekt-consult.hr

dr. sc. Darko Barbalić,
dipl. ing. građ.
Hrvatske vode
Ulica grada Vukovara 220,
Zagreb, Hrvatska

Sredinom svibnja 2023. godine, šire područje Hrvatske zadesilo je grmljavinsko nevrijeme što je osim materijalne štete rezultiralo i poplavama na području gradova Gračaca, Obrovca, Duge Rese, Hrvatske Kostajnice, Karlovca i Petrinje. Kao i uvijek u takvim slučajevima, postavlja se pitanje koliko je moguće osloniti se na rezultate prognostičkog modela, naročito na prognoze za više dana unaprijed imajući posebno u vidu potrebe sudionika u operativnoj obrani od poplava. Radi toga provedena je preliminarana analiza rada hidrološko-hidrauličkog prognostičkog modela Sava SM2 tijekom poplavnog događaja kao doprinos sagledavanju njegovih performansi u operativnom korištenju. Iako je težište analiziranog događaja bilo nešto južnije na slivu Otuče, odnosno Zrmanje, velike vode su i na slivu Kupe, a naročito na branjenom području 11, na nizu dionica obrane od poplava zahtijevale donošenje odluka o potrebnim mjerama za što prognostičke informacije mogu biti vrlo korisne. Razmatranje rezultata statistika NSE, PBIAS i RMSE pokazalo je da je Sava SM2 vrlo kompleksan sustav, pa je neophodno osigurati efikasno upravljanje njime kako bi se operativna obrana od poplava mogla što više osloniti na prognoze. Radi toga, praćenje rada prognostičkih modela svakako bi trebalo biti sustavna aktivnost te su dane preporuke za daljnje korake na unapređenju i moguće aktivnosti.

Ključne riječi: model Sava SM2, prognoza, NSE, PBIAS, RMSE, sliv Kupa, branjeno područje 11

1. UVOD

Sredinom svibnja 2023. godine, šire područje Hrvatske zadesilo je grmljavinsko nevrijeme praćeno obilnom kišom i tučom što je osim materijalne štete na području Krapinsko-zagorske, Varaždinske, Zagrebačke, Bjelovarsko-bilogorske, Virovitičko-podravске, Sisačko-moslavačke, Požeško-slavonske i Osječko-baranjske

županije rezultiralo i poplavama na slivovima Zrmanje, Kupe i Une, pri čemu su najviše pogođeni bili gradovi Gračac, Obrovac, Duga Resa, Karlovac, Petrinja i Hrvatska Kostajnica.

U Karlovcu je bilo proglašeno izvanredno stanje obrane od poplava na rijeci Korani i Kupi. Dana 18. svibnja vodostaj rijeke Kupe u Karlovcu dosegao je najvišu razinu od +847 cm, što je vrlo blizu rekordnih

+872 cm iz 1939. godine dok je rijeka Korana svojim vodostajem od +852 cm dosegla prethodni rekord iz 2015. godine. Mnoge prometnice na karlovačkom području bile su poplavljene, a naselja odsječena od grada Karlovca. Rijeka Mrežnica dosegla je 16. svibnja na hidrološkoj postaji Mrzlo Polje najviši vodostaj od +458 cm te je došlo do poplavlivanja niza objekata, kuća i vikendica neposredno uz obale u naseljima Zvečaj, Donje Mrzlo Polje Mrežničko i Belavići. Kupa je prijetila i područjima nizvodno od Karlovca, pa je tako 20. svibnja dosegla svoj maksimum na mjernoj postaji Farkašić, u blizini Petrinje, od +980 cm što je za samo 8 cm manje od apsolutnog maksimuma iz 2014. godine. Nakon što je vodni val prošao kroz Petrinju, ostali su materijalna šteta i brojna klizišta. (DHMZ 2023; Hrvatske vode 2023a, 2023b)

Tijekom ovog događaja, intenzivno su provedene mjere operativne obrane od poplava, a Hrvatske vode, Državni hidrometeorološki zavod, Civilna zaštita i ostali sudionici imali su na raspolaganju prognostički materijal operativnog hidrološko-hidrauličkog prognostičkog modela Sava SM2. Kao i uvijek u takvim slučajevima, postavlja se pitanje koliko je moguće osloniti se na rezultate prognostičkog modela, naročito na prognoze za više dana unaprijed. Radi toga provedena je preliminarna analiza rada prognostičkog modela tijekom poplavnog događaja kao doprinos sagledavanju njegovih performansi u operativnom korištenju. To svakako može biti i prvi korak u smjeru daljnjeg unapređenja primjene prognostičkih modela u upravljanju obranom od poplava, kao i uspostavi sustava praćenja rada prognostičkih modela. Kako za sliv Zrmanje nije postojao prognostički model, u žarištu ovog rada prvenstveno je branjeno područje 11, područje malog sliva Kupa (slika 1). Nakon nešto šire analize provedene u diplomskom radu (Josić 2023), ovdje su prezentirani i sistematizirani najvažniji rezultati.



Slika 1: Mjerodavne postaje branjenog područja 11

2. OBUHVAT ANALIZA

Hidrološko-hidraulički model sliva Save (Sava SM2) razvijen je od 2014. do 2016. godine a djelomično je unaprijeđen projektom FRISCO1 (2016. - 2019.). Model se operativno pokreće satnom frekvencijom u Državnom hidrometeorološkom zavodu i daje prognozu vodostaja i protoka do 120 sati unaprijed za 171 prognostičku točku, od kojih je 137 u Hrvatskoj. Model sadrži 517 km toka rijeke Save, 2.592 km pritoka, 24 preljeva, 16 kontrolnih objekata i 13 retencija. Ulazni podaci modela su ARSO prognoza protoka Save na izlazu iz Slovenije u Hrvatsku (Jesenice na Dolenjskem), vodostaji i protoci, količine oborine i temperature zraka u stvarnom vremenu s automatskih hidroloških i meteoroloških postaja u Hrvatskoj, Sloveniji i Bosni i Hercegovini te rezultati numeričkih meteoroloških prognostičkih modela (ALADIN/HR horizontalne razlučivosti 4 km do 72 h unaprijed i ECMWF horizontalne razlučivosti oko 9 km, od 73 do 120 h unaprijed (Vukmanić i Vujnović 2023). Prostorno, analiza je prilagođena sistematizaciji koja se koristi u operativnoj obrani od poplava (Hrvatske vode 2014).

Mjerodavni elementi za proglašenje obrane od poplava na Branjenom području 11 prikazani su u tablici 1, a položaj mjerodavnih postaja s naznačenim šiframa na slici 1.

Iako postoji niz izuzetaka, u općem slučaju, operativna obrana od poplava na nekoj dionici traje dok je nivo na mjerodavnoj postaji veći od nivoa pripremnog stanja. U tom razdoblju odluke se donose najčešće uzimajući u obzir nivo. S obzirom na to da je motivacija ovog rada bila razmotriti primjenjivost prognostičkog modela za obranu od poplava, time je definirano i razdoblje analize.

3. METODOLOGIJA

Za procjenu kvaliteta prognoze koristi se veliki broj statistika (WMO 2011; Cheng et al. 2017; Gauch et al. 2023), a za ovaj preliminarni pregled odabrane su tri koje su vrlo često korištene:

- Nash-Sutcliffe učinkovitost (NSE)
- Postotak pristranosti (PBIAS)
- Standardno odstupanje (RMSE)

NSE i PBIAS su bezdimenzionalni i ne ovise o izboru kote nule postaje niti o mjernoj jedinici u kojoj se iskazuje vodostaj što je bitno kada se analiza provodi za vodostaje. RMSE također ne ovisi o izboru kote nule, a rezultati imaju dimenziju veličine koja se analizira.

Nash-Sutcliffe učinkovitost je statistika, koja ukazuje na odnos između promatrane (izmjerene) i simulirane (prognozirane) vrijednosti:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{m,i} - Y_{p,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{m,i} - Y_{m,sr})^2} \right] \quad (1)$$

gdje je:

$Y_{m,i}$ - i -ta izmjerena vrijednost,

Tablica 1: Mjerodavni elementi za proglašenje obrane od poplava na branjenom području 11

DIONICA	MJERODAVNA POSTAJA			MJERE OBRANE OD POPLAVA			
				Pripremno stanje	Redovna obrana	Izvanredna obrana	Izvanredno stanje
	NAZIV	ŠIFRA	VODOTOK	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
D.11.1., D.11.4., D.11.5.	Jamnička Kiselica	4107	Kupa	470	-	-	-
D.11.2., D.11.6.	Karlovac	4111	Kupa	500	700	750	830
D.11.3., D.11.7.	Kamanje	4024	Kupa	670			
D.11.8, D.11.9.	Zapeć	4208	Kupa	300			
D.11.10. D.11.12.	Donja Kupčina	2556	Oteretni kanal Kupa - Kupa	500	650	750	850
D.11.11., D.11.13.	Mahično	2553	Oteretni kanal Kupa - Kupa	240	340	440	510
D.11.14., D.11.15., D.11.16.	Lazina	2631	Sabirni kanal autoceste	220	320	400	450
D.11.17.	Lazina brana	4166	Kupčina	50	-	-	-
D.11.18., D.11.24.	Karlovac	4026	Korana	480	680	730	780
D.11.19.	Velemerić	4073	Korana	330			
D.11.20.	Veljun	4103	Korana	330			
D.11.21.	Slunj uzvodni	4059	Korana	280			
D.11.22., D.11.23.	Luketići	4105	Korana	160			
D.11.25.	Juzbašići	4022	Mrežnica	250			
D.11.26.	Široka Rijeka	4174	Glina	200			
D.11.27.	Lešće toplice	4113	Donja Dobra	150			
D.11.28	Prema pravilniku HE Lešće						
D.11.29.	Turkovići	4088	Gornja Dobra	150			
Prema Poglavlje 6. (Hrvatske vode, 2014)							

$Y_{p,i}$ - i -ta prognozirana vrijednost,

$Y_{m,sr}$ - srednja vrijednost izmjerenih vodostaja u promatranom razdoblju,

n - broj podataka u promatranom razdoblju.

Vrijednosti NSE-a mogu se kretati između $-\infty$ i 1, gdje se 1 smatra optimalnom vrijednosti. Vrijednosti bliske 1 smatraju se prihvatljivima, dok vrijednosti manje od 0 ukazuju da bi točnije predviđanje stvarnog stanja bilo srednjom vrijednosti izmjerenih vrijednosti nego prognoziranim vrijednostima, a što ukazuje na loše performanse prognoze.

PBIAS statistikom određuje se prosječna tendencija prognoziranih podataka koja pokazuje jesu li oni veći ili manji od svojih promatranih parnjaka. Izračunava se prema formuli 2:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{m,i} - Y_{p,i}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_{m,i})} \right] \quad (2)$$

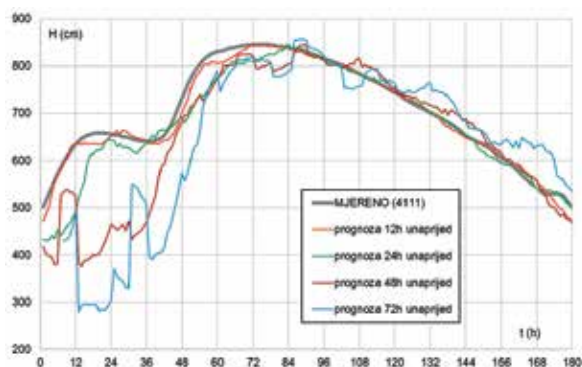
Rezultati PBIAS statistike izražavaju se postotkom. Optimalna vrijednost PBIAS-a je 0, a niske vrijednosti ukazuju na korektnu simulaciju. Pozitivne vrijednosti ukazuju na pristranost modela podcjenjivanju, odnosno prognoziranju nižih vrijednosti od stvarnih izmjerenih, a negativne vrijednosti ukazuju na pristranost modela precjenjivanju, odnosno prognoziranju viših vrijednosti od stvarnih izmjerenih vrijednosti.

Standardno odstupanje izračunava se prema formuli 3:

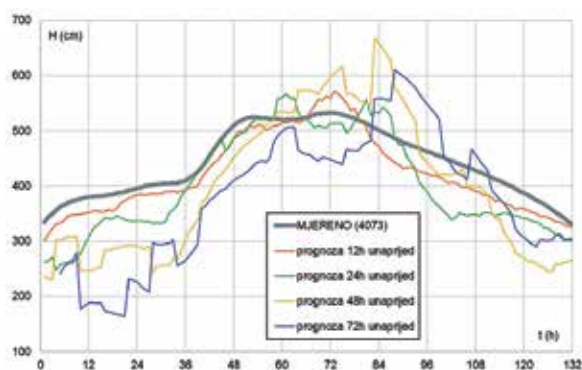
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{m,i} - Y_{p,i})^2} \quad (3)$$

I što je vrijednost manja, smatra se da model bolje replicira mjerne vrijednosti.

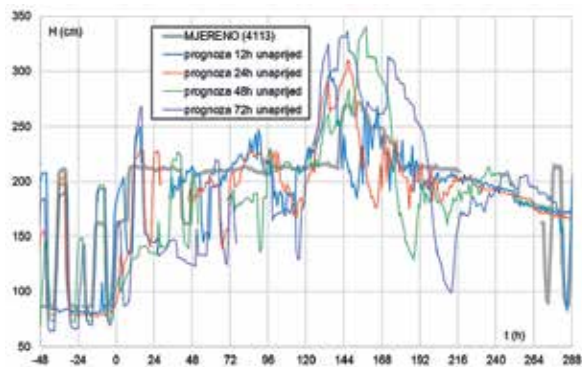
Osim brojčanog iskaza statistika koji se mogu koristiti za usporedbu pojedinih modela, često se rezultati navedenih statistika pokušavaju iskazati i kvalitativno kao ocjena generalne prihvatljivosti prognoze. Pregledom niza literaturnih izvora, praktično se može zaključiti da je derivacija kvalitativnih ocjena bezdimenzionalnih



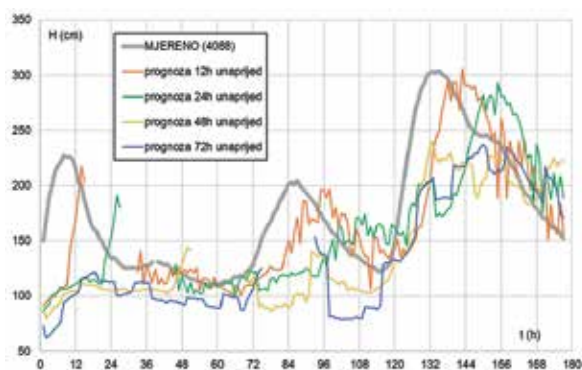
Slika 2: Nivogrami za postaju Karlovac, Kupa



Slika 3: Nivogrami za postaju Velemerić, Korana



Slika 4: Nivogrami za postaju Lešće toplice, Donja Dobra



Slika 5: Nivogrami za postaju Turkovići, Gornja Dobra

statistika, kao što su ovdje navedene, uglavnom zasnovana na analizi modeliranih protoka hidroloških modela kroz duža razdoblja (najčešće mjesec dana i više) i s bitno manjom vremenskom razlučivošću (najčešće s vremenskim korakom od dana) (Moriasi et al. 2007, 2015), ali se često koristi, uz manje modifikacije, i za modele drugih karakteristika. Također, očigledno je da nema definitivnog zaključka koja bi vrijednost i koje statistike bile čvrsta granica između "dobrog", "prihvatljivog" i "neprihvatljivog" rezultata, odnosno prognoze. U ovom radu, rezultati su grupirani, koristeći vrlo često korištene granice od 0,5 i 0,75 za NSE te $\pm 10\%$ i $\pm 20\%$ za PBIAS bez namjere da te vrijednosti definitivno određuju granicu prihvatljivosti prognoze. Statistika RMSE ima mjernu jedinicu (cm) pa je lakše predočiti značenje rezultata, a time i uspjehnost prognoze.

Analiza je provedena korištenjem standardnih programskih paketa za tablične kalkulacije i rutina definiranih posebno za potrebe rada. Za razdoblje od 11. svibnja 2023. u 12:00 do 12. svibnja 2023. u 04:00 nisu bili dostupni rezultati rada modela.

4. REZULTATI

Od 17 mjerodavnih postaja, analiza je provedena za njih 15. Za postaju Lazina na Sabirnom kanalu autoceste, analiza nije provedena jer nije definirana odgovarajuća prognostička točka u modelu, a na postaji Kamanje, Kupa, nije došlo do prekoračenja vodostaja pripremnog stanja. U prvom koraku je provedena vizualna provjera rezultata. Na nivogramima (slike 2, 3, 4 i 5) su kao ilustracija prikazani izmjereni vodostaji te prognoze za 12, 24, 48 i 72 sata unaprijed za postaje Karlovac (Kupa), Velemerić (Korana), Lešće toplice (Donja Dobra) na kojoj se vidi i utjecaj rada hidroelektrane na vodostaje te Turkovići (Gornja Dobra).

Stručnom procjenom je, na postajama na kojim je to bilo očigledno, korigiran početak i kraj razdoblja za analizu. Za postaju Lešće toplica kod koje i pri uobičajenom radu dolazi do prekoračenja vodostaja pripremnog stanja, za analizu je uzeto razdoblje od nultog do 271. sata prema slici 4. Na postaji Turkovići (Gornja Dobra) su u kratkom razdoblju zabilježena tri kratka i relativno mala događaja, pa su sva tri uzeta u obzir. Razdoblja na pojedinim postajama, za koja je provedena analiza, prikazana su u tablici 2.

Usporedba zabilježenog maksimuma s maksimumima prognoziranim pola, jedan, dva i tri dana prije zabilježenog maksimuma dana je u tablici 3.

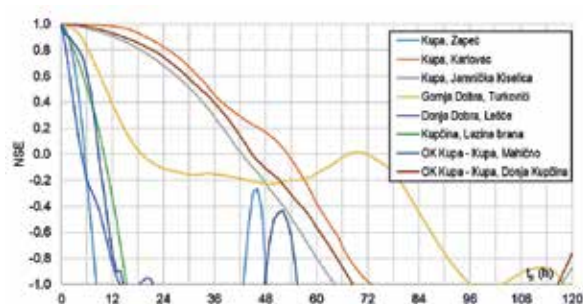
Kao što je i bilo za očekivati, očigledan je generalni trend smanjenja apsolutnih greški prognoza maksimuma približavanjem trenutku u kom je on i izmjeren.

Za potrebe grafičkih prikaza statistika, postaje su grupirane na, uvjetno, uzvodni i nizvodni dio područja. Na slikama 6, 7 i 8 nalaze se rezultati proračuna statistike NSE, na slikama 9, 10 i 11 rezultati proračuna za PBIAS, a na slikama 12, 13 i 14 rezultati proračuna za RMSE.

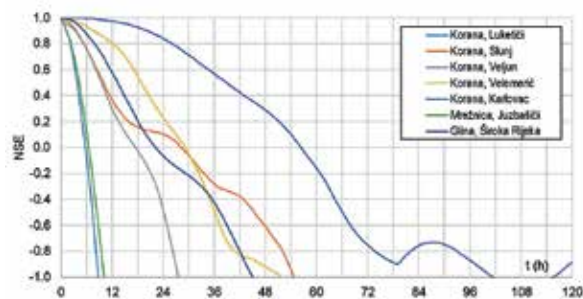
Kako je i bilo za očekivati, generalno, kakvoća

Tablica 2: Početak, završetak i trajanje razdoblja analize na mjerodavnim postajama

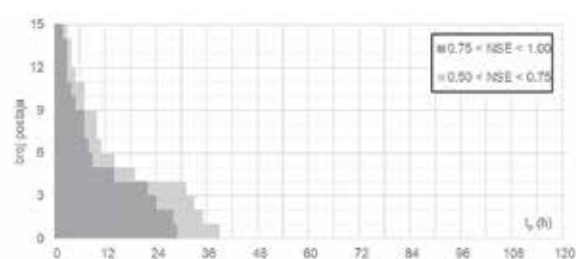
MJERODAVNA POSTAJA			MJERE OBRANE OD POPLAVA				
			PRIPREMNO STANJE	DATUM (GGGG.MM.DD HH:MM)		TRAJANJE	MAKSIMALNI NIVO
Naziv	ŠIFRA	VODOTOK	(cm)	POČETKA	ZAVRŠETKA	(h)	cm
Jamnička Kiselica	4107	Kupa	470	2023.05.15 03:00	2023.05.23 12:00	202	754
Karlovac	4111	Kupa	500	2023.05.14 22:00	2023.05.22 09:00	180	847
Kamanje	4024	Kupa	670	Vodostaj pripremnog stanja nije premašen			
Zapeć	4208	Kupa	300	2023.05.16 13:00	2023.05.17 11:00	23	390
Donja Kupčina	2556	Oteretni kanal Kupa - Kupa	500	2023.05.15 07:00	2023.05.23 09:00	195	742
Mahično	2553	Oteretni kanal Kupa - Kupa	240	2023.05.17 02:00	2023.05.18 12:00	35	299
Lazina brana	4166	Kupčina	50	2023.05.14 08:00	2023.05.19 04:00	117	81
Karlovac	4026	Korana	480	2023.05.14 19:00	2023.05.22 14:00	188	852
Velemerić	4073	Korana	330	2023.05.15 01:00	2023.05.20 12:00	132	533
Veljun	4103	Korana	330	2023.05.14 16:00	2023.05.20 00:00	129	455
Slunj uzvodni	4059	Korana	280	2023.05.15 08:00	2023.05.19 22:00	111	460
Luketići	4105	Korana	160	2023.05.16 12:00	2023.05.18 14:00	51	205
Juzbašići	4022	Mrežnica	250	2023.05.16 14:00	2023.05.19 16:00	75	318
Široka Rijeka	4174	Glina	200	2023.05.14 22:00	2023.05.20 10:00	133	366
Lešće toplice	4113	Donja Dobra	150	2023.05.11 07:00	2023.05.22 13:00	271	272
Turkovići	4088	Gornja Dobra	150	2023.05.11. 09:00	2023.05.18 17:00	177	304



Slika 6: NSE za postaje na uzvodnom dijelu područja



Slika 7: NSE za postaje na nizvodnom dijelu područja



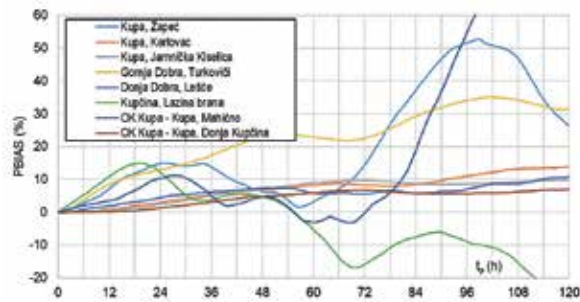
Slika 8: Postaje grupirane prema vrijednosti NSE-a

prognoza opada s vremenom, a raste s površinom sliva. Tako relativno visoke vrijednosti NSE-a (preko 0,5) na postajama, Karlovac (Kupa), Jamnička Kiselica (Kupa), Donja Kupčina (OK Kupa – Kupa) i Karlovac (Korana) održavaju se i za prognoze od preko 30 sati unaprijed. Njima se približava još Velemerić (Korana) s 18 h unaprijed i Široka rijeka (Glina) s 13 h unaprijed, dok za sve ostale postaje NSE opada ispod vrijednosti od 0,5 nakon 3 - 10 h. Za postaju Turkovići, uočljiv je "plato" za razdoblje prognoze od 1 do 3 dana unaprijed koji je vjerojatno posljedica toga što je razdoblje analize obuhvatilo tri manja događaja.

Prema statistici PBIAS, rezultati su dosta bolji. Postaja koja prva premašuje "prihvatljivih" 20 % je Turkovići

Tablica 3: Usporedba zabilježenog maksimuma s maksimumima prognoziranim od 12 do 72 sata prije zabilježenog maksimuma

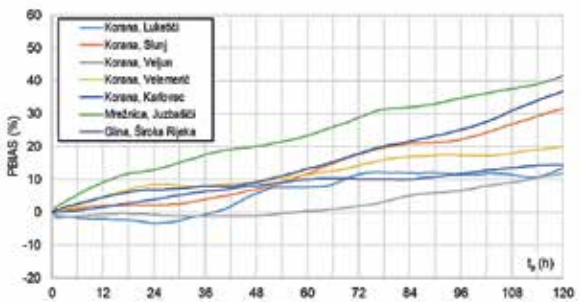
MJERODAVNA POSTAJA			OPAŽENI MAKSIMUM		PROGNOZIRANI MAKSIMUM							
					12 h PRIJE OPAŽENOG		24 h PRIJE OPAŽENOG		48 h PRIJE OPAŽENOG		72 h PRIJE OPAŽENOG	
NAZIV	ŠIFRA	VODOTOK	cm	datum	cm	datum	cm	datum	cm	datum	cm	datum
Jamnička Kiselica	4107	Kupa	754	19. 12 h	744	19. 02 h	746	19. 02 h	837	19. 07 h	845	19. 08 h
Karlovac	4111	Kupa	847	18. 02 h	843	17. 22 h	826	18. 05 h	820	18. 12 h	813	18. 06 h
Zapeć	4208	Kupa	390	16. 19 h	318	16. 20 h	336	17. 09 h	411	17. 01 h	308	16. 19 h
Donja Kupčina	2556	OK Kupa - Kupa	742	19. 22 h	739	19. 10 h	738	19. 05 h	778	19. 03 h	821	19. 10 h
Mahično	2553	OK Kupa - Kupa	299	17. 18 h	289	17. 08 h	294	17. 06 h	313	17. 18 h	341	17. 10 h
Lazina brana	4166	Kupčina	81	17. 16 h	82	17. 06 h	83	16. 21 h	150	17. 03 h	124	17. 11 h
Karlovac	4026	Korana	852	18. 00 h	857	18. 01 h	824	18. 07 h	816	18. 11 h	772	18. 06 h
Velemerić	4073	Korana	533	18. 00 h	561	17. 22 h	524	18. 07 h	645	18. 08 h	492	17. 08 h
Veljun	4103	Korana	455	17. 15 h	471	18. 03 h	604	18. 01 h	496	18. 07 h	495	17. 00 h
Slunj uzvodni	4059	Korana	460	17. 16 h	413	18. 06 h	492	18. 04 h	482	18. 07 h	337	16. 23 h
Luketići	4105	Korana	205	17. 18 h	200	18. 02 h	242	18. 02 h	200	18. 06 h	164	18. 01 h
Juzbašići	4022	Mrežnica	318	17. 20 h	291	17. 20 h	310	17. 23 h	282	18. 03 h	249	17. 00 h
Široka Rijeka	4174	Glina	366	17. 08 h	321	17. 00 h	337	17. 18 h	304	17. 09 h	241	17. 23 h
Lešće toplice	4113	Donja Dobra	272	17. 16 h	225	17. 04 h	256	17. 00 h	331	17. 20 h	295	17. 01 h
Turkovići	4088	Gornja Dobra	304	16. 23 h	253	17. 03 h	204	17. 20 h	238	17. 16 h	188	16. 23 h
APSOLUTNA GREŠKA		MAKSIMALNA			72		149		112		125	
		PROSJEČNA			25		34		46		69	



Slika 9: PBIAS za postaje na uzvodnom dijelu područja

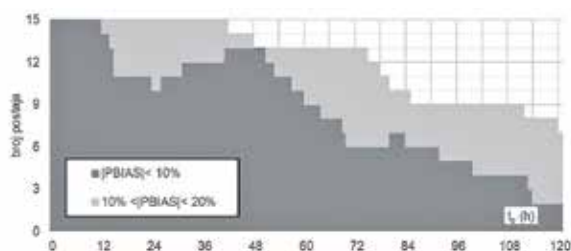
(Gornja Dobra), i to za prognozu 42 h unaprijed, a prati je postaja Juzbašići (Mrežnica), i to tek 2 dana i više unaprijed.

Vrijednosti PBIAS-a su uglavnom pozitivne ili vrlo malo negativne, što ukazuje na tendenciju modela da većinom prognozira vodostaje niže od onih koji će se realizirati.

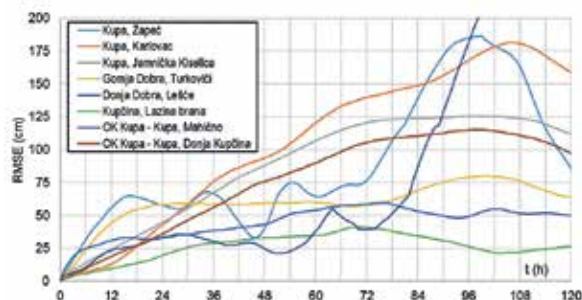


Slika 10: PBIAS za postaje na nizvodnom dijelu područja

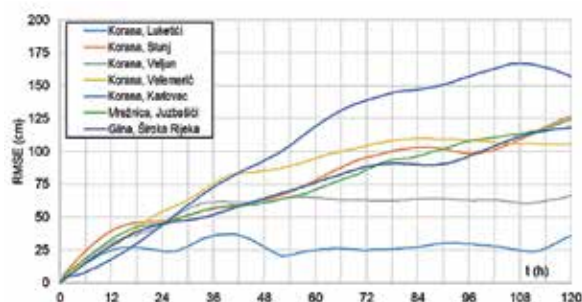
Za razliku od većine ostalih postaja kod kojih, kako je za očekivati, PBIAS raste stabilno s produljenjem prognostičkog razdoblja, na postajama Mahično (OK Kupa – Kupa) i Zapeć (Kupa) on približno nakon 60. sata počinje naglo rasti. Jedina postaja koja značajnije prelazi u negativne vrijednosti je Lazina brana (Kupčina), ali se ipak vrlo dugo zadržava iznad -20 %.



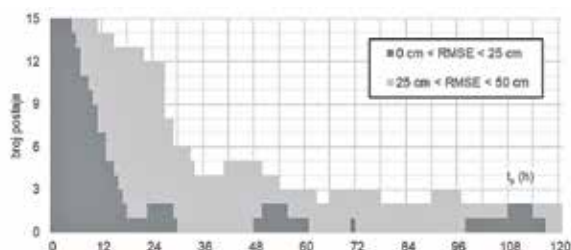
Slika 11: Postaje grupirane prema vrijednosti PBIAS-a



Slika 12: RMSE za postaje na uzvodnom dijelu područja



Slika 13: RMSE za postaje na nizvodnom dijelu područja



Slika 14: Postaje grupirane prema vrijednosti RMSE-a

Rezultati za statistiku RMSE su dosta slični onima za PBIAS poštujući razlike u formulama za proračun.

Zanimljivo je da na većini postaja RMSE počinje premašivati 50 cm za prognoze od jednog dana i više unaprijed.

5. ZAKLJUČNE NAPOMENE

Poplavni događaj iz svibnja 2023. godine prouzročio je vodostaje veće od pripremnog stanja na svim postajama branjenog područja 11, osim postaje Kamanje (Kupa) pa je omogućio preliminarnu analizu rada prognostičkog modela tijekom mjera operativne obrane od poplava. Svakako, pri tumačenju rezultata treba voditi računa da su oni izvedeni na temelju samo tog poplavnog događaja te da bi se oni mogli razlikovati

u manjoj ili većoj mjeri za neki drugi poplavni događaj, naročito na tako kompleksnom slivu kakav je Kupa.

Pregled literature pokazao je da postoji izuzetno veliki broj (ponekad redundantnih) statistika za procjenu stanja modela, kao i njihovih pragova za ocjenu prihvatljivosti, a koje su razvijene, najčešće kroz analize protoka, i to s manjom vremenskom razlučivosti od one koja se razmatra u ovom radu, ali se u nedostatku boljih rješenja primjenjuju i u drugim uvjetima.

Kako bi se testirala primjenljivost modela za potrebe operativne obrane od poplava u ovom radu proveden je proračun statistika NSE, PBIAS i RMSE za vodostaje, i to u razdoblju važenja hidroloških uvjeta za proglašenje mjera obrane od poplava.

Imajući u vidu sve nedorečenosti pristupa može se reći da je tijekom poplavnog događaja iz svibnja 2023. prognoza na oko pola mjerodavnih postaja branjenog područja 11 bila prihvatljiva do jedan dan unaprijed prema statistici NSE, a znatno duže prema statistici PBIAS. Također, RMSE je većinom bio manji od 0,5 m do jedan dan unaprijed. Također, čini se da prognoze, usprkos nešto lošijim numeričkim rezultatima dosta dobro predviđaju događaje i znatno duže vrijeme unaprijed.

Prosječna apsolutna greška prognoza maksimuma analiziranih postaja smanjivala se približavanjem trenucima u kom su oni i izmjereni, i to od 69 cm, 72 sata prije do 25 cm, 12 sati prije. S obzirom na neravnomjernu prostornu distribuciju događaja koji je uzrokovao poplavu, nije bilo moguće provesti pouzdanu međusobnu usporedbu kakvoće prognoza pojedinih postaja.

Ovim pregledom uspješnosti rada modela, niti izbliza nisu iscrpljene sve mogućnosti njegovog testiranja, a kako bi se polučilo što više informacija za njegovo bolje korištenje i unapređenje u budućnosti, što će biti i provođeno sukladno mogućnostima.

Također tijekom rada pojavilo se i niz pitanja o kojim bi u budućnosti trebalo porazmisliti kako bi buduće aktivnosti na analizi bile što ujednačenije, usporedivije, ali i korisnije. Tako primjerice bilo bi uputno razmotriti kako promatrati jedan događaj sa stanovišta njegovog prostornog i vremenskog obuhvata, kako tretirati prekide u mjerenjima i prognozama, je li sa stanovišta operativne obrane od poplava bitnija prognoza uzlaznog dijela hidrograma/nivograma ili cijelo razdoblje dok traju mjere, kako tretirati protoke, s obzirom na to da se oni ne mjere direktno, a na nekim lokacijama radi raznih utjecaja nisu definirani jednoznačni i pouzdani konsumpcijski odnosi, može li se primjenjivati uobičajeni sustav ocjene prihvatljivosti i za ovakve tipove prognoza, kao i niz drugih pitanja.

Sava SM2, kao i novi prognostički modeli za sliv Drave, Dunava i Jadranskog mora vrlo su kompleksni sustavi, pa je neophodno osigurati efikasno upravljanje njima kako bi se operativna obrana od poplava mogla što više osloniti na njihove rezultate. Također, treba imati na umu da značajno ograničenje prilikom kalibracije i

verifikacije modela predstavlja razvoj modela u smjeru korištenja za predviđanje vrlo rijetkih ekstremnih događaja što ograničava fond podataka za njegovu nadogradnju, a tehnologija, npr. meteorološkog prognoziranja, stalno se usavršava, fond dostupnih podataka za razvoj modela povećava što onda dovodi do toga da su promjene modela češće nego što su to prilike za provjeru njegovog rada. Sigurno je da u tom kontekstu veliku ulogu imaju i klimatske promjene koje utječu ne samo na promjene intenziteta ekstremnih događaja nego i na mehanizme njihovog nastajanja.

Radi toga, praćenje rada prognostičkih modela svakako bi trebalo biti sustavna aktivnost te bi bilo uputno naročito:

- razlučiti utjecaje meteorološke prognoze od prognoze protoka i prognoze vodostaja kako bi se lakše fokusiralo na mjesta gdje su moguća najveća unapređenja,
- definirati metodologiju praćenja, uključujući koje parametre pratiti, najpogodnije statistike za praćenje,

granice prihvatljivosti, razdoblja praćenja i agregaciju vrlo velikog broja rezultata,

- provoditi odgovarajuću analizu nakon svakog značajnog velikovodnog događaja,
- prihvatiti i dosljedno implementirati nepouzdanost meteorološke prognoze kroz cijeli prognostički lanac jer je besmisleno očekivati "točnu" determinističku prognozu vodostaja nekoliko dana unaprijed,
- ojačati timove prognozera i korisnika prognoza (Hrvatskih voda i Državnog zavoda za hidrometeorologiju) koji bi veće vrijeme mogli posvetiti radu i unapređenju modela jer su to aktivnosti koje nije učinkovito povremeno "naručivati" nego ih treba provoditi stalno.

I na kraju, može se zaključiti da Hrvatska ima na raspolaganju vrlo sofisticirani i neosporno koristan alat za upravljanje rizicima od poplava koji zahtijeva stalnu pažnju i usavršavanje kako bi pružio što bolje informacije svim korisnicima. ■

LITERATURA

Cheng, K. S.; Lien, Y. T.; Wu, Y. C. 2017. On the criteria of model performance evaluation for real-time flood forecasting. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 31: 1123–1146. <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1322-7>.

DHMZ 2023. https://meteo.hr/objave_najave_natjecaji.php?section=onnlm=objave&el=priopcenja&daj=pr17052023hidro (pristup 3. kolovoza 2023.).

Gauch, M.; Kratzert, F.; Gilon, O.; Gupta, H.; Mai, J.; Nearing, G. 2023. In defense of metrics: Metrics sufficiently encode typical human preferences regarding hydrological model performance. *Water Resources Research.* 59: e2022WR033918. <https://doi.org/10.1029/2022WR033918>.

Hrvatske vode 2014. *Provedbeni plan obrane od poplava branjenog područja 11: Područje maloga sliva Kupa na Sektoru D - srednja i donja Sava*. Ožujak. http://www.voda.hr/sites/default/files/dokumenti/novosti/2022-07/bp_11_-_provedbeni_plan_obrane_od_poplava.pdf

Hrvatske vode 2023.a <http://www.voda.hr/hr/novost/prognoza-i-stanje-vodostaja-24> (pristup 3. kolovoza 2023.).

Hrvatske vode 2023.b <http://www.voda.hr/hr/novost/prognoza-i-stanje-vodostaja-27> (pristup 3. kolovoza 2023.).

Josić, S. 2023. *Analiza rezultata hidrološko-hidrauličkog prognostičkog modela tijekom poplavnog događaja iz svibnja 2023. na području maloga sliva Kupa*. Diplomski rad br. g 1217. Tehničko veleučilište u Zagrebu. Stručni diplomski studij graditeljstvo. Zagreb.

Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D. i Veith, T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE.* 50(3): 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.

Moriasi, D. N.; Gitau, M. W.; Pai, N. i Daggupati, P. 2015. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE.* 58(6): 1763–1785.

Vukmanić, L.; Vujnović, T. 2023. Operativni sustavi za prognoziranje poplava u Republici Hrvatskoj. 8. *Hrvatska konferencija o vodama. Poreč 23. - 25. studenog 2023.*

WMO 2011. WMO: Manual on Flood Forecasting and Warning. No. 1072.

OPERATION OF THE SAVA SM2 FORECASTING HYDROLOGICAL AND HYDRAULIC MODEL DURING THE MAY 2023 FLOOD EVENT IN THE SMALL BASIN KUPA

ABSTRACT: In mid-May 2023, a thunderstorm hit a larger Croatian area. In addition to material damage, it caused flooding in the town areas of Gračac, Obrovac, Duga Resa, Hrvatska Kostajnica, Karlovac and Petrinja. As always in such circumstances, one questions the accuracy level of forecasting model results, particularly in case of forecasts for several days ahead, while also having in mind the needs of participants in operational flood defence. For these reasons, a preliminary analysis of the operation of the Sava SM2 forecasting hydrological and hydraulic model was conducted during this flood event as a contribution to a review of its performance in operational use. Although the focus of the analysed event was somewhat further south in the Otuča/Zrmanja basin, flooding in the Kupa basin, particularly Defended Area 11, and a series of flood defence sections also required making decisions on the necessary measures, where forecasting information can be very useful. Considerations of the results of the NSE, PBIAS and RMSE statistics have revealed that the Sava SM2 is a very complex system requiring efficient management in order to provide maximal forecasting reliability for operational flood defence. Monitoring forecasting models' operation should definitely be a systemic activity and recommendations have been provided regarding further steps of its improvement, as well as potential activities.

KEY WORDS: Sava SM2 model, forecast, NSE, PBIAS, RMSE, Kupa basin, Defended Area 11

DIE FUNKTIONSWEISE DES HYDROLOGISCH-HYDRAULISCHEN VORHERSAGEMODELLS SAVA SM2 WÄHREND DES HOCHWASSERS IM MAI 2023 IM KLEINEN EINZUGSGEBIET DER KUPA

ZUSAMMENFASSUNG: Mitte Mai 2023 wurde ein großes Gebiet Kroatiens von schwerem Gewitter heimgesucht, das Schäden und Überschwemmungen auf dem Gebiet der Städte Gračac, Obrovac, Duga Resa, Hrvatska Kostajnica, Karlovac und Petrinja verursachte. Wie immer in solchen Fällen stellt sich die Frage, inwieweit man sich auf die Ergebnisse eines Vorhersagemodells verlassen kann, namentlich auf die Vorhersagen für mehrere Tage im Voraus unter Berücksichtigung der Bedürfnisse von Beteiligten im betrieblichen Hochwasserschutz. Aus diesem Grund wurde eine vorläufige Analyse der Funktionsweise des hydrologisch-hydraulischen Vorhersagemodells Sava SM2 während dieses Hochwasserereignisses durchgeführt als Beitrag zur Wahrnehmung seiner Leistungsfähigkeit im betrieblichen Einsatz. Obwohl der Schwerpunkt des analysierten Ereignisses etwas weiter südlich im Einzugsgebiet der Flüsse Otuča und Zrmanja lag, erforderten die hohen Wasserstände auf einer Reihe von Hochwasserschutzabschnitten im Einzugsgebiet der Kupa, und besonders im Verteidigten Bereich 11, Entscheidungen über die notwendigen Maßnahmen, wofür die Prognoseinformationen sehr nützlich sein können. Die Analyse der statistischen Indikatoren NSE, PBIAS und RMSE zeigte, dass Sava SM2 ein sehr komplexes System ist und dass es notwendig ist, eine effiziente Verwaltung des Systems zu gewährleisten, damit sich der operative Hochwasserschutzdienst weitestgehend auf seine Prognosen verlassen kann. Folglich ist eine systematische Überwachung der Funktionsweise von Vorhersagemodellen erforderlich. Im Beitrag werden auch Empfehlungen für weitere Schritte und mögliche Aktivitäten gegeben.

SCHLÜSSELWÖRTER: Modell Sava SM2, Prognose, NSE, PBIAS, RMSE, Einzugsgebiet der Kupa, Verteidigter Bereich 11

