

1.1.1 Analýza scenárových zmien charakteristík priemerných mesačných a minimálnych prietokov do roku 2100 na povodí horného Hrona

Zuzana Sabová, Dagmara Skoncová

Anotácia

Príspevok sa zaoberá analýzou budúcich zmien priemerných mesačných prietokov a analýzou vybraných charakteristík minimálnych prietokov vo vodomernej stanici Banská Bystrica (7160) v povodí Hrona. Skúmali sa zmeny v štyroch časových periódach: 1981 – 2010, 2011 – 2040, 2041 – 2070 a 2071 – 2100. Na zistenie hydrologických zmien sa použil program The Indicators of Hydrologic Alteration (IHA). Pri analýzach sa použili nasledovné dáta: pozorované dáta, modelované dáta a dáta scenára MPI a KNMI.

Kľúčové slová: priemerné mesačné prietoky, minimálne prietoky, BFI, Hron, metóda IHA

Annotation

The paper deals with the analysis of the long-term changes of the average monthly discharges and analysis of the selected characteristics of the minimum discharge in the Banská Bystrica (7160) gauging station in the Hron River basin. Changes were examined over four time periods: 1981 – 2010, 2011 – 2040, 2041 – 2070, and 2071 – 2100. The Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) program was used to detect hydrologic changes. The following data were used in the analysis: the observed data, the modelled data and the data using the MPI and KNMI scenarios.

Keyword: average monthly flows, minimum flows, BFI, Hron River, IHA method

Abstrakt

Predložený príspevok je zameraný na analýzu dlhodobých zmien priemerných mesačných prietokov a vybraných charakteristík minimálnych prietokov (m-denné minimálne prietoky a index základného odtoku) vo vybranej vodomernej stanici Banská Bystrica (7160) v povodí Hrona. Na dosiahnutie výsledkov sa použila metóda IHA, ktorá dokáže vypočítať zmeny hydrologického režimu. V tomto príspevku sme sa sústredili na zmeny maximálnych a minimálnych priemerných prietokov a určitých charakteristík minimálnych prietokov od roku 1981 do roku 2100, pričom dané časové obdobie bolo rozdelené do štyroch skúmaných časových období. Cieľom príspevku je zhodnotenie zmien priemerných mesačných prietokov a charakteristík minimálnych prietokov v rámci každej časovej periódy, zhodnotenie zmien priemerných mesačných prietokov do budúcnosti ako aj overenie vhodnosti simulovaného scenára. Výsledky analýz potvrdili nárast priemerných mesačných prietokov v zimných mesiacoch a ich pokles v zimných mesiacoch. Nízke hodnoty indexu základného toku môžu mať negatívny vplyv na ekosystém.

Abstract

The presented paper is focused on the analysis of the long-term changes in the average monthly discharges and selected characteristics of the minimum discharges (m-daily minimum discharges and base flow index) in a selected Banská Bystrica (7160) gauging station in the Hron River basin. To obtain the results, IHA method was used, which can calculate changes in the hydrological regime. In this paper, we focused on changes in the maximum and minimum average discharges and certain characteristics of the minimum discharges from 1981 to 2100, with the time period divided into four time periods examined. The paper aims is to evaluate the changes in the average monthly discharges

and the characteristics of the minimum discharges within each time period, to evaluate changes in average monthly discharges in the future as well as to determine the suitability of the model scenario. The results of the analyses confirmed an increase in the average monthly discharges in the winter months and a decrease in the summer months. Low values of the base flow index can have a negative impact on ecosystems.

1 Úvod

Vzhľadom na globálne zmeny podnebia sa dá v budúcnosti očakávať rozsiahla zmena podnebia na regionálnych úrovniach, na ktoré má extrémne počasie veľký vplyv (Kim et al., 2011). Najčastejšie dopady klimatickej zmeny sú: vnútorná variabilita klimatického systému, vonkajšie faktory (slnečné žiarenie, oblačnosť, zrážky, zvyšovanie koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére) (Juráková et al., 2008).

Sucho je opakujúcim sa znakom európskej klímy. Vyskytuje sa v oblastiach s vysokými a nízkymi zrážkami, v každom ročnom období. V 20. storočí postihlo oblasť Európy. Tieto závažné a dlhotrvajúce suchá poukázali, že oblasť Európy je zraniteľná voči spomínanému prírodnému nebezpečenstvu (Lloyd-Hughes a Saunders, 2002). Sucho je v poslednom období aktuálnou problematikou vďaka jeho vyššej početnosti výskytu so silnejšou intenzitou. Problémom sucha je jeho nenápadný nástup, ktorý môže ovplyvniť väčší priestor a jeho pôsobenie môže trvať dlhú dobu. Výskyt nebezpečných udalostí, akými sú sucho a povodne, je považované za najcharakteristickejší prejav klimatickej zmeny (Janáčová et al., 2018).

Podľa Greenpeace Slovensko (2020) celkové úhrny zrážok klesnú medzi rokmi 2076 až 2100 približne o 10%. Zrážky budú rozložené nerovnomerne počas celého roka. V mesiacoch máj až jún sa daždivé počasie zmení na suché a v zime sa budú vyskytovať čoraz vyššie teploty, ktoré zabránia vzniku snehovej pokrývky. Napokon v letných mesiacoch budú suchá prerušované intenzívnymi búrkami a lejakmi, ktoré zvýšia intenzitu vzniku lokálnych povodní.

Zvyšujúca sa frekvencia spomínaných extrémnych udalostí vyžaduje potrebu riešenia širokého komplexu otázok protipovodňovej ochrany a opatrení na zvýšenie vodnosti v periódach minimálneho prietoku (Šachová, 2010).

Povodne môžu spôsobiť nielen obrovské ekonomické, sociálne a environmentálne škody, ale aj straty na životoch. Z tohto dôvodu sa vyžaduje použitie spoľahlivých a presných postupov na odhad povodní, aby sa vytvoril pevný základ pre investície do opatrení na protipovodňovú ochranu do budúcnosti (Booij, 2005).

V rokoch 1966 – 2000 sa vyskytli na území Slovenska rozsiahlejšie povodne, ktoré boli spôsobené aj privalovými zrážkami zasahujúcimi relatívne malé územia (Bárek, 2006).

Vodohospodári na celom svete sa snažia zabezpečiť spoľahlivé a dostupné zásoby vody pre obyvateľov. Napriek tomu by využitie vodných zdrojov nemalo degradovať sladkovodné ekosystémy alebo narúšať ekosystémové služby (rybolov, rekreácia, cestovný ruch a iné kultúrne aktivity) (Poff et al., 2009).

Zásadnú úlohu pre trvalo udržateľný rozvoj vodných zdrojov zohráva hydrologická zmena a jej dopady na ekosystémy. Posúdenie súčasnej zmeny režimu je dôležitým krokom vyžadujúcim vhodné ukazovatele. Do súčasnosti bolo vyvinutých mnoho prístupov s rôznymi premennými na kvantifikáciu ekologicky relevantných hydrologických zmien (Yang et al., 2017).

Z hľadiska zložitosti prírodných systémov, si efektívne riadenie ekosystémov vodných, mokrad'ových a brehových systémov vyžaduje, aby sa existujúce hydrologické režimy charakterizovali pomocou biologicky relevantných hydrologických parametrov. Existuje viacero parametrov, ktoré poskytujú informácie o niektorých z ekologicky najvýznamnejších znakov hydrologických režimov povrchových a podzemných vôd (Zhang et al., 2014). Tieto parametre sú napr. súčasťou programu *The Indicators of Hydrologic Alteration* (IHA), ktorý vyvinuli Brian Richter a ďalší od roku 1996 do roku 1998 na hodnotenie stupňa hydrologických zmien, ktoré možno pripísať vplyvu človeka na narušenie ekosystému (Hersh, Maidment, 2006).

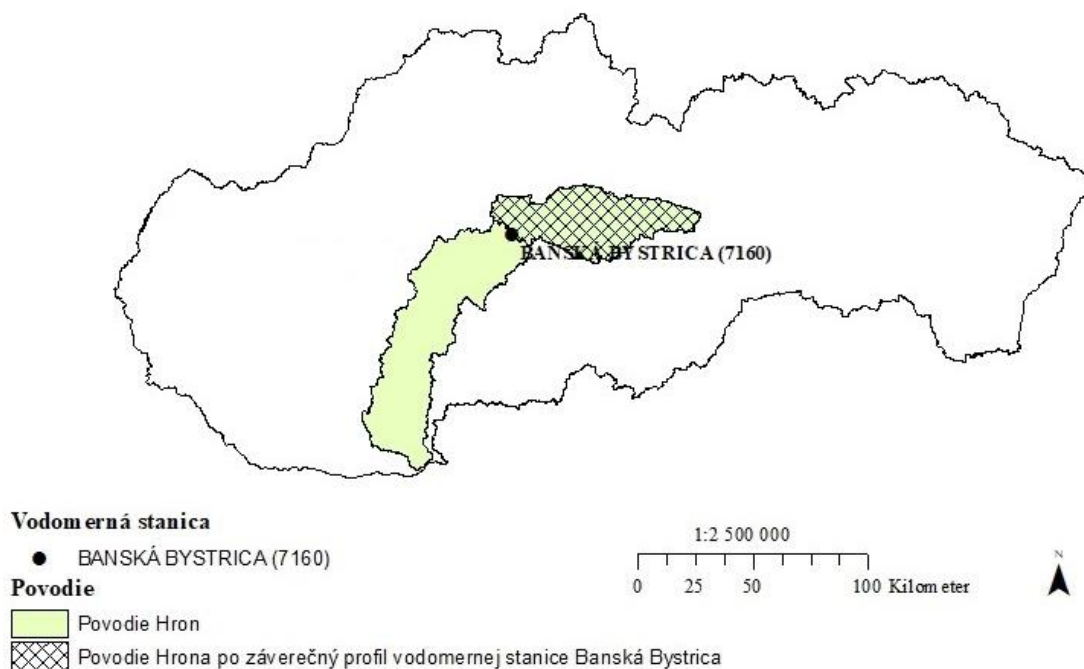
Príspevok je zameraný na skúmanie zmien priemerných prietokov a vybraných charakteristík minimálnych prietokov v rámci skúmaných časových periód v závislosti od použitých dát. Štúdia sa

zameriava na porovnanie simulovaných prietokoch modelovaných dát v prvej časovej perióde (MODEL HBV, scenár MPI, scenár KNMI), porovnanie výsledných simulovaných prietokov podľa scenárov MPI a KNMI do roku 2100 a vybratie vhodnosti klimatického scenára na použitie do budúcich analýz.

2 Vstupné dáta a metodika práce

Opis povodia

Skúmaným povodiím v príspevku je povodie horného Hrona po vodomernú stanicu Banská Bystrica (7160). Plocha vybraného čiastkového povodia (Obrázok 1) so záverečným profilom v Banskej Bystrici, s nadmorskou výškou 350 m. n. m. je 1766,38 km². Vybrané povodie Hrona je veľmi členité, maximálne prevýšenie je 2004 m. n. m. a priemerná nadmorská výška je 850 m. n. m. Lesy zaberajú 70 % plochy povodia, lúky 10 %, poľnohospodárska pôda 17 % a 3 % zaberajú mestské oblasti (Výleta et al., 2020, Hlavčová et al., 2008). Odtokový režim oblasti je charakteristický svojou sezónnosťou. V apríli sa vyskytujú maximálne mesačné prietoky a najsuchšie mesiace sú január a február. Dané čiastkové povodie má vysokohorský charakter povodia, čo má dostatočný vplyv na výskyt povodní. Najmä na jar je dôvodom povodní topenie snehu (Pekárová, Szolgay, 2005). Priemerný ročný úhrn zrážok pozorovaný v povodí horného Hrona je menší ako 650 mm.rok⁻¹ na juhu a viac ako 1200 mm.rok⁻¹ na severe. Vo vybranej vodomernej stanici Hron – Banská Bystrica (7160) je priemerná teplota vzduchu 5,4 °C, priemerné zrážky 828 mm a priemerný odtok 394 mm (Parajka et al., 2004).



Obrázok 1: Lokalizácia vybranej vodomernej stanice Banská Bystrica v povodí Hrona

Vstupné údaje a použitá metóda

V roku SHMÚ po konzultácii s Ministerstvom životného prostredia Slovenskej republiky navrhol projekt, v ktorom mali byť spracované nové klimatické scenáre pre Slovensko. Najnovšie klimatické scenáre pre Slovenskú republiku boli na základe výstupov zo štyroch klimatických modelov (nemecký ECHAM5 a MPI, kanadský CGCM3.1 a holandský KNMI) všeobecnej cirkulácie atmosféry spracované na Oddelení meteorológie a klimatológie Fakulty matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave v roku 2011 (Lapin et al., 2012).

Modely KNMI a MPI predstavujú integráciu atmosférických a oceánskych dynamických rovníc s rozlíšením v uzlovej sieti 25x25 km. Scenáre boli zameraná najmä na: denné priemery, maximálnu a minimálnu teplotu vzduchu, denné priemerné hodnoty relatívnej vlhkosti vzduchu, denný úhrn zrážok, denné priemery rýchlosti vetra a denné súčty globálneho žiarenia (Rončák et al., 2021). V Slovenskej republike majú klimatické modely KNMI a MPI až 190 uzlových bodov (19x10) (Rončák et al., 2017). Dáta z klimatického scenára MPI boli pre nás dostupné od 1.1.1951 do 31.12.2100 a dáta z klimatického scenára KNMI boli pre nás dostupné od 1.1.1950 do 31.12.2100. Predpokladá sa, že klimatický scenár MPI sa najviac približuje k reálnym pozorovaným údajom. Výsledné hodnoty simulovaných prietokov pre MPI scenár majú extrémnejšie výkyvy ako hodnoty modelovaných prietokov podľa scenára KNMI, ktorého priebeh je pokojnejší.

Na modelovanie priemerných denných prietokov sa použil zrážkovo-odtokový model HBV, pri ktorom boli ako vstupné parametre zrážky a teplota vzduchu. Z výsledkov sa zistili už dávnejšie predpoklady o miernom oteplení a raste úhrnov zrážok v chladnom polroku v porovnaní s teplým polrokom (Výleta et al., 2020).

Pri analýze hydrologických zmien prietokov sme použili pozorované prietokové údaje v dennom slede z vodomernej stanice Banská Bystrica (7160) od roku 1981 do roku 2010, modelované dáta (MODEL) použitím HBV modelu za obdobie 1981 – 2010, dáta klimatického scenára MPI za obdobie od roku 2011 do roku 2100 a dáta klimatického scenára KNMI od roku 2011 do roku 2100. Dostupné dáta boli vo formáte denných prietokov. Pozorované dáta boli dostupné od 1.11.1930 do 31.12.2019 a poskytol nám ich Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMÚ). Vybrané skúmané časové periódy sú zhrnuté v Tabuľka 1.

Tabuľka 1: Rozdelenie časových periód

Použité dáta	Časová perióda
Pozorované dáta (OBS), MODEL HBV, MPI a KNMI dáta	1.1.1981 – 31.10.2010
MPI a KNMI dáta	1.11.2010 – 31.10.2040
	1.11.2040 – 31.10.2070
	1.11.2070 – 31.10.2100

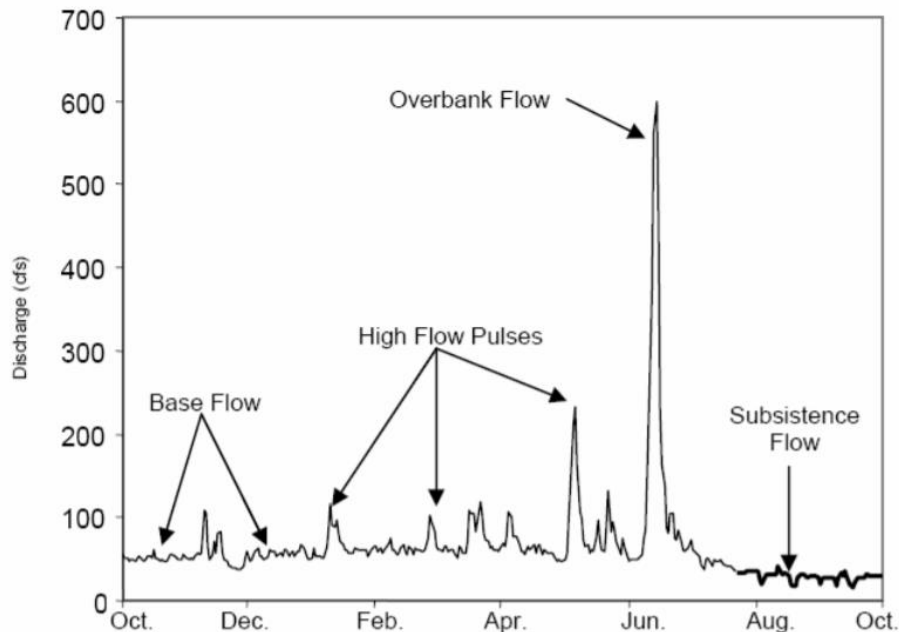
Na identifikáciu dlhodobých hydrologických zmien sa použil IHA program, ktorý bol vyvinutý organizáciou The Nature Conservancy. Program IHA je možné použiť na vyhodnotenie minimálnych a maximálnych prietokov, vyhodnotenie extrémnych udalostí (veľké povodne, extrémne sucho). Ich dĺžka sa môže líšiť v závislosti od: variability klímy, závažnosti hydrologických zmien a pod. (Pramuk, 2016).

IHA obsahuje nástroje na definovanie analýz, ktoré sú založené na skúmanie jednej časovej periódy alebo na porovnávanie dvoch časových periód. Daná vlastnosť patrí medzi pozitíva programu, pretože vybrané časové obdobia sa dajú použiť na izoláciu a charakterizáciu prietokového režimu pre tie časové obdobia, ktoré sú predmetom záujmu. Príklady využitia analýz: pred a po implementácii projektu rozvoja distribúcie vody, pred a po veľkých odberoch vody, výstavba priehrad, nádrží a pod. (Hersh, Maidment, 2006).

Národná rada pre výskum národných akadémií (The National Research Council, 2005) predložila koncepčný model, ktorý režim prirodzeného toku rozdeľuje do štyroch zložiek prietoku (Obrázok 2):

- *existenčný prietok*: minimálny prietok, ktorý je potrebný na udržanie vyhovujúcim podmienok kvality vody a na zabezpečenie minimálneho priestoru vodných biotopov pre prežitie vodných organizmov v období kritického sucha;
- *základný prietok*: prietok, ktorý poskytuje adekvátne prostredie na podporu rôznych pôvodných vodných spoločenstiev; udržiava hladinu podzemnej vody;
- *vysoké prietokové pulzy/obdobia*: krátkodobé vysoké prietoky vyskytujúce sa počas búrkovej činnosti alebo ihneď po nej; ich význam – preplachovanie jemných usadenín, obnovenie normálnej kvality vody po dlhšie trvajúcich nízkych prietokoch;

- *prietok, ktorý presahuje koryto*: dokáže porušiť brehy vodných tokov alebo drasticky reštrukturalizovať koryto vodného toku (Hersh, Maidment, 2006).



Obrázok 2: Príklad identifikovania zložiek prietoku pre riekú Guadalupe, Victoria, Texas pre rok 2000 (National Research Council Committee, 2005)

(Base Flow – základný prietok, High Flow Pulses – vysoké prietokové pulzy/obdobia, Overbank flow – prietok, ktorý presahuje koryto, Subsistence Flow – existenčný prietok)

Výstupy IHA programu tvoria grafy a tabuľky obsahujúce 67 parametrov, ktoré sa rozdeľujú na dve skupiny: IHA parametre a EFC (Environmental Flow Component) parametre. Počítajú sa pomocou parametrických (priemerná hodnota/štandardná odchýlka) alebo neparametrických (percentil) štatistík (Pramuk, 2016).

IHA parametre

IHA parametre tvorí 33 parametrov, ktoré sa rozdeľujú do piatich skupín:

- hodnoty priemerných mesačných prietokov (12 parametrov): priemerná hodnota alebo medián pre každý mesiac v roku;
- hodnoty a trvanie ročných m-denných extrémov odtoku (12 parametrov):
 - ročné minimum: 1-dňový, 3-dňový, 7-dňový, 30-dňový a 90-dňový priemer;
 - ročné maximum: 1-dňový, 3-dňový, 7-dňový, 30-dňový a 90-dňový priemer;
 - počet dní s nulovým prietokom
 - index základného odtoku (base flow index): 7-dňový minimálny prietok/priemerný ročný prietok;
- sezónnosť ročných extrémov (2 parametre): Juliánsky dátum 1-dňového minima a maxima;
- frekvencia a trvanie vysokých a nízkych pulzov prietokov (4 parametre):
 - počet nízkych a vysokých impulzov v každom roku;
 - priemer alebo medián trvania nízkych a vysokých impulzov (v dňoch);
- frekvencia zmien prietokov (3 parametre):
 - rýchlosť rastu: priemer alebo medián všetkých pozitívnych rozdielov medzi za sebou idúcimi dennými hodnotami prietokov;
 - rýchlosť poklesu: priemer alebo medián všetkých negatívnych rozdielov medzi za sebou idúcimi dennými hodnotami prietokov;
 - počet hydrologických zvrátov.

Príspevok sa zameriava na vyhodnocovanie zmien v priemerných mesačných hodnotách prietokov vo vybraných časových obdobiach. Daná skupina IHA parametrov má nasledovný vplyv na ekosystém: dostupnosť biotopov pre vodné organizmy, dostupnosť pôdnej vlhkosti pre rastliny, dostupnosť vody pre suchozemské živočíchy, dostupnosť potravy a úkrytu pre živočíchy, prístup dravcov k miestam hniezdenia, ovplyvňovanie teploty vody, hladiny kyslíka a fotosyntézy vo vodnom stĺpci (The Nature Conservancy, 2007). Štúdia je ďalej zameraná aj na vybrané charakteristiky minimálneho prietoku ako: m-denné minimum a BFI (base flow index). BFI je jedným z ukazovateľov malej vodnosti a určuje pomer základného odtoku k celkovému. Ak sú hodnoty BFI vysoké, znamená to že povodie je schopné zachovať si odtok počas dlhších období sucha. Hodnoty medzi 0,15 – 0,2 hovoria o nepriepustnom povodí. Pre priepustné povodia platia hodnoty 0,95 a viac (Halmová et al., 2011).

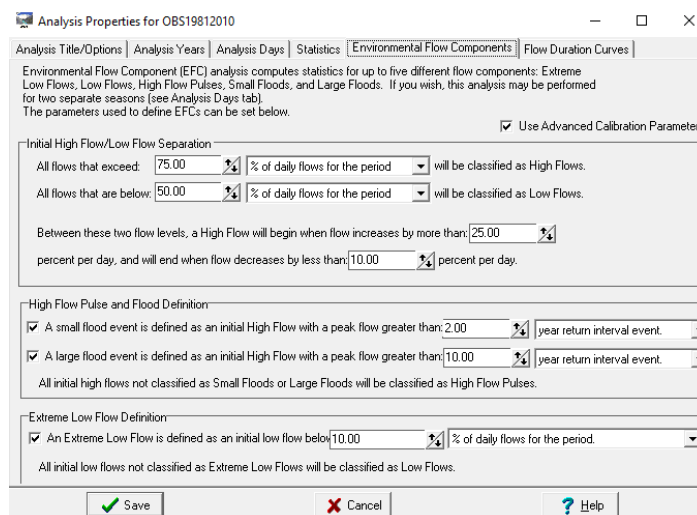
EFC parametre

EFC parametre tvorí 34 parametrov, ktoré sa delia na 5 skupín:

- nízke prietoky: vyskytujú sa vo väčšine riek;
- extrémne nízke prietoky: nastávajú v období sucha, kedy prietoky vodných tokov klesnú; z vodohospodárskeho a ekologického hľadiska môžu byť stresujúce pre ekosystémy;
- vysoké pulzy prietokov: intenzívne dažde alebo topenie snehu môžu zvýšiť hladinu vody, kedy stúpajúca voda prevyšuje hladiny nízkych prietokov, ale nepresahuje brehy riek;
- malé povodne: nárasty hladiny vody, kedy nastáva preliatie vodného toku; nepatria sem extrémne povodne;
- veľké povodne: vznikajú zmeny vo vodnom toku a v záplavovom území (Halmová et al., 2011).

Nastavenie parametrov

Použitie nastavenie programu IHA je nasledovné: použili sme časové ohraničenie hydrologického roka, neparametrickú štatistiku a základné nastavenie pre hranice na separáciu hydrogramu s EFC charakteristikami (Obrázok 3).



Obrázok 3: Základné nastavenie analýzy pre Hron – Banská Bystrica (7160) pre OBS dáta

Na separáciu hydrogramu s EFC charakteristikami sme použili nasledovné nastavenia:

- nízke prietoky – prietoky pod hranicou 50% denného prietoku;
- pulzy/obdobia zvýšených prietokov – prietokové udalosti s prietokom nad 75%, pričom vlna začína, ak prietok narastie o viac ako 25% za deň a končí, aj je jeho pokles menší ako 10% za deň, pričom prietok neklesne pod hodnotu 50%;
- malé povodne – pulzy/obdobia zvýšených prietokov s dobou opakovania aspoň raz za 2 – 10 rokov;

- veľké povodne – pulzy/obdobia zvýšených prietokov s dobou opakovania aspoň raz za 10 a viac rokov;
- extrémne nízke prietoky – prietoky pod hranicou 10% nízkych prietokov.

3 Výsledky práce

V tejto práci sme sa zamerali na zmeny v priemerných mesačných hodnotách prietokov a vybraným charakteristikách minimálneho prietoku (m-denné minimálne prietoky a index základného odtoku). Mali sme k dispozícii štyri druhy dát priemerných denných prietokov: pozorované dáta (OBS) – od 1.1.1981 do 31.10.2010, modelované dáta (MODEL HBV) od 1.1.1981 do 31.12.2019, dáta klimatického scenára KNMI – od 1.11.2010 do 31.10.2100 a dáta klimatického scenára MPI – od 1.11.2010 do 31.10.2100. Zamerali sme sa na porovnanie prietoku MODEL HBV so simulovanými prietokmi podľa klimatických scenárov MPI a KNMI v rovnakej skúmanej časovej perióde a na zmeny prietokov klimatických scenárov MPI a KNMI do roku 2100.

Na výsledné priemerné hodnoty prietokov sa môžeme pozrieť z viacerých hľadísk:

- porovnanie výsledných hodnôt priemerných mesačných prietokov modelovaných dát (MODEL HBV) so simulovanými prietokmi podľa scenára MPI v rámci prvej časovej periódy (1981 – 2010),
- porovnanie výsledných hodnôt priemerných mesačných prietokov modelovaných dát (MODEL HBV) so simulovanými prietokmi pre scenár KNMI v rámci prvej časovej periódy (1981 – 2010),
- porovnanie zmien výsledných hodnôt priemerných mesačných prietokov klimatických scenárov MPI a KNMI do roku 2100, a vybranie vhodnosti budúceho použitia klimatického scenára.

V nasledujúcej Tabuľke 2 sú znázornené výsledné hodnoty priemerných mesačných prietokov pre prvú časovú periódu 1981-2010 pre vodomernú stanicu Banská Bystrica (7160).

Tabuľka 2: Mediány priemerných mesačných prietokov v $m^3 \cdot s^{-1}$ pre pozorované dáta (OBS), MODEL HBV a simulovaných priemerných mesačných prietokov pre klimatické scenáre MPI a KNMI v prvej časovej perióde 1981-2010 vo vodomernej stanici Banská Bystrica (7160)

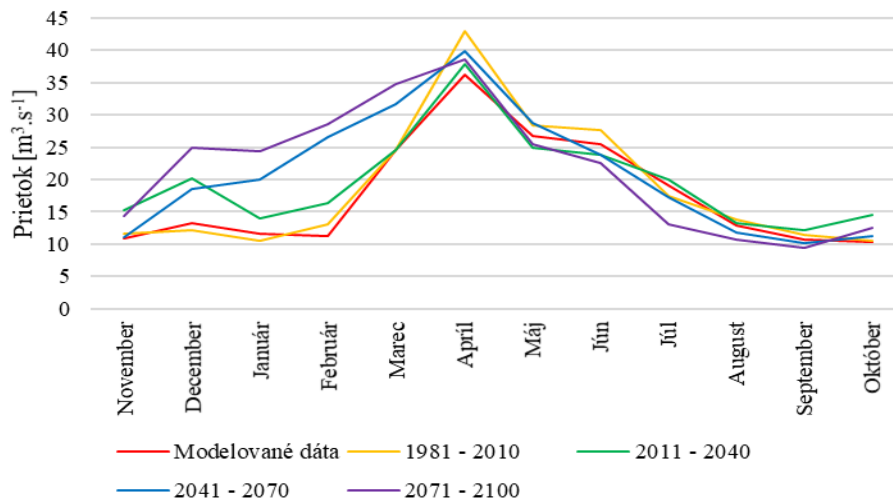
Banská Bystrica (7160)	OBS	MODEL HBV	MPI	KNMI
	1981-2010			
November	12.63	10.93	11.61	12.61
December	14.28	13.30	12.16	14.51
Január	11.82	11.60	10.59	13.83
Február	11.57	11.17	13.10	17.37
Marec	23.29	24.58	24.6	23.97
Apríl	40.96	36.26	42.94	32.27
Máj	30.61	26.72	28.34	25.18
Jún	21.30	25.38	27.61	25.61
Júl	16.35	19.00	17.50	17.81
August	12.12	12.85	13.76	13.54
September	10.06	10.69	11.36	10.30
Október	9.98	10.39	10.54	9.93

- Modelované dáta (MODEL HBV) v rokoch 1981 – 2010 vykazujú maximálne priemerné mesačné prietoky v mesiacoch apríl (max. hodnota prietoku $36,26 m^3 \cdot s^{-1}$), máj a jún. V rovnakom období sa hodnoty simulovaných prietokov podľa scenára MPI zhodujú s maximálnymi prietokmi s MODELOM HBV v mesiacoch apríl (max. hodnota prietoku pre MPI scenár $42,94 m^3 \cdot s^{-1}$) a máj. Minimálne priemerné mesačné prietoky sa vyskytujú v októbri (MODEL HBV – $10,39 m^3 \cdot s^{-1}$, scenára MPI – $10,54 m^3 \cdot s^{-1}$).

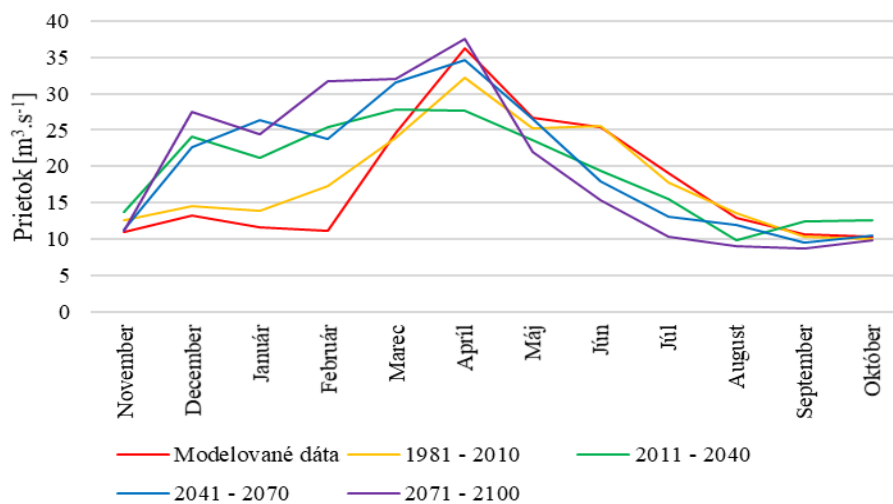
- b.) Výsledné hodnoty pre klimatický scenár KNMI preukazujú v prvej časovej perióde maximálne mesačné prietoky v mesiaci apríl s hodnotou $32,27 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Minimálny priemerný mesačný prietok sa sústreďuje podľa simulovaných prietokov klimatického scenára KNMI v mesiaci október v hodnotou $9,93 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Najväčšie rozdiely medzi MODELOM HBV a modelovanými prietokmi scenára KNMI sú v mesiacoch november, január a apríl.
- c.) Pri skúmaní klimatických scenárov MPI a KNMI do roku 2100, bol zistený rovnaký priebeh zmien priemerných mesačných prietokov v mesiacoch december, marec, apríl, máj a september (Tabuľka 3). Oproti prvej časovej perióde sa zvýšia priemerné mesačné prietoky v druhom skúmanom období, následne v perióde 2041 – 2070 priemerné mesačné prietoky klesnú a do roku 2100 opäťovne vzrastú. Výsledné hodnoty prietokov podľa scenára MPI poukazujú na zvýšenie priemerných mesačných prietokov do roku 2100 v mesiacoch január a február (Obrázok 4). Vzhľadom na výsledné hodnoty priemerných mesačných prietokov v prvej skúmanej časovej perióde 1981-2010 môžeme zhodnotiť, že výsledky klimatického scenára MPI môžu byť vhodnejšie na nasledujúce vykonané analýzy. Pri klimatickom scenári KNMI môžeme vidieť pokles priemerných mesačných prietokov v letných mesiacoch (Obrázok 5).

Tabuľka 3: Mediány priemerných mesačných prietokov v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pre klimatické scenáre MPI a KNMI pre vodomernú stanicu Banská Bystrica (7160) do roku 2100

Banská Bystrica (7160)	MPI				KNMI			
	1981-2010	2011-2040	2041-2070	2071-2100	1981-2010	2011-2040	2041-2070	2071-2100
November	11.61	15.31	11.01	14.36	12.61	13.77	11.22	11.12
December	12.16	20.25	18.46	24.89	14.51	24.18	22.64	27.44
Január	10.59	13.98	20.09	24.43	13.83	21.14	26.38	24.42
Február	13.10	16.38	26.56	28.58	17.37	25.44	23.79	31.69
Marec	24.60	24.61	31.60	34.74	23.97	27.86	31.50	32.01
Apríl	42.94	37.93	39.87	38.63	32.27	27.71	34.60	37.48
Máj	28.34	25.00	28.84	25.38	25.18	23.60	26.48	22.00
Jún	27.61	23.77	23.78	22.48	25.61	19.45	17.88	15.35
Júl	17.50	19.95	17.19	13.05	17.81	15.50	13.12	10.34
August	13.76	13.18	11.71	10.61	13.54	9.90	11.92	9.02
September	11.36	12.11	10.22	9.48	10.30	12.44	9.49	8.73
Október	10.54	14.54	11.19	12.56	9.93	12.67	10.43	9.82



Obrázok 4: *Priebeh modelovaných priemerných mesačných prietokov vo vodomernej stanici Banská Bystrica (7160) od roku 1981 – 2010 pre MODEL HBV a od roku 1981 – 2100 pre simulované priemerné mesačné prietoky pre klimatický scenár MPI*



Obrázok 5: *Priebeh modelovaných priemerných mesačných prietokov vo vodomernej stanici Banská Bystrica (7160) od roku 1981 – 2010 pre MODEL HBV a od roku 1981 – 2100 pre simulované priemerné mesačné prietoky pre klimatický scenár KNMI*

Ďalšou problematikou, ktorou sa príspevok zaoberá sú vybrané charakteristiky minimálnych prietokov, ktoré sú: m-denné minimálne prietoky a hodnoty indexu základného odtoku BFI (Tabuľka 4). Pri porovnaní 1-dňových až 7-dňových minimálnych prietokov v prvej časovej perióde, nevidieť extrémne zmeny medzi MODELOM HBV a simulovanými prietokmi klimatických scenárov MPI a KNMI. Najväčšie zmeny sa objavujú pri výsledkoch 30-denného a 90-denného minimálneho prietoku. Pri oboch prípadoch sú výsledné hodnoty prietokov klimatických scenárov MPI a KNMI podhodnotené oproti MODELOM HBV.

Môžeme pozorovať pokles 30-denného minimálneho prietoku podľa scenárov MPI a KNMI od roku 2011 do roku 2100. Pri 90-denných minimálnych prietokoch vidíme nárast výsledných hodnôt prietokov klimatického scenára KNMI v období 2041-2070. Prietoky klimatického scenára MPI preukazujú negatívny trend pri 90-denných minimálnych prietokoch.

Ak sa zameriame na index základného odtoku (BFI), môžeme vidieť že sa pohybuje v rozmedzí od 0,28 do 0,35. Nízke hodnoty BFI hovoria o tom, že povodie nie je schopné si zachovať odtok počas dlhších suchých období.

Tabuľka 4: Priemerné m-denné minimálne prietoky a hodnoty indexu BFI pre pozorované dáta, MODEL HBV a klimatické scenáre MPI a KNMI pre zvolené časové obdobia vo vodomernej stanici Banská Bystrica (7160)

Banská Bystrica (7160)	OBS	MODEL HBV	MPI	KNMI	MPI	KNMI	MPI	KNMI	MPI	KNMI
	1981 - 2010				2011 - 2040		2041 - 2070		2071 - 2100	
1-dňové minimum	6.87	6.92	6.99	6.82	7.81	6.74	7.48	6.64	7.20	6.36
3-dňové minimum	7.07	6.99	7.06	6.85	7.85	6.81	7.74	6.71	7.25	6.43
7-dňové minimum	7.26	7.14	7.18	7.05	7.96	6.94	7.93	6.78	7.37	6.61
30-denné minimum	8.18	8.18	7.86	7.75	9.35	7.85	8.96	7.55	8.14	7.47
90-denné minimum	10.62	10.90	9.74	9.68	11.08	9.71	11.03	10.71	10.46	8.88
BFI	0.33	0.33	0.35	0.35	0.32	0.32	0.32	0.30	0.29	0.28

4 Diskusia a záver

V predloženom príspevku sme sa zamerali na analýzu priemerných mesačných prietokov a vybraných charakteristík minimálnych prietokov (m-denné minimálne prietoky a index základného odtoku) vo vodomernej stanici Banská Bystrica (7160) v povodí horného Hrona od roku 1981 do roku 2100. Práca bola zameraná na zmeny v rámci štyroch analyzovaných časových období pre pozorované dáta, modelované dáta (MODEL HBV) a dáta klimatických scenárov MPI a KNMI.

Z výsledkov analýz môžeme usúdiť, že maximálne priemerné mesačné hodnoty prietokov sa sústreďujú prevažne v mesiacoch marec a apríl. September a október sú mesiace, ktoré sa vyznačujú minimálnymi prietokmi v rámci priemerných mesačných prietokov. Na budúce analýzy hydrologických charakteristík je lepšou možnosťou využiť na predpovedanie zmien do budúcnosti dáta klimatického scenára MPI vo vodomernej stanici Banská Bystrica (7160).

Z hľadiska zmien do budúcnosti simulované prietoky podľa scenárov MPI a KNMI majú v mesiacoch december, marec, máj a september rovnaký priebeh: v období 2011 – 2040 hodnoty priemerných mesačných prietokov vzrastú, v nasledujúcom období 2041 – 2070 klesnú a do roku 2100 opäť narastú. V zimných mesiacoch sa predpokladá podľa výsledných hodnôt priemerných mesačných prietokov ich nárast, čo môže znamenať zvýšené množstvo spadnutých zrážok v tomto období alebo zvýšené množstvo topenia snehu a ľadu nachádzajúce sa vo vyšších polohách čiastkového povodia. Podľa štúdie „Klimatické zmeny a ich možné dôsledky v mestách“ (Lapin et al., 1997) sa zvýšenie zimného odtoku do roku 2075 môže meniť nasledovne: sever Slovenska 10 – 40%, centrálna časť Slovenska: 20 – 50% a južná časť Slovenska 30 – 80%.

V letných mesiacoch sa očakáva do roku 2100 zvýšenie výskytu málo zrážkových období. Priemerné teploty vzduchu by sa mali zvýšiť priemerne o 2 – 4 °C a medzi obdobiami sucha zvýšenie úhrnov zrážok, zosilnenie búrok (zvýšenie rýchlosti vetra, víchrice, tornáda) (Mind'áš et al., 2011).

Vzhľadom na to, že posledné 10-ročie sa snehová pokrývka na Slovensku neudrží dlho z dôvodu zvýšených teplôt, zvýšené množstvo prietoku v zimných mesiacoch môžu znamenať aj to, že spadnuté zrážky sa nebudú akumulovať vo forme snehu, ale dažďa. Snehová pokrývka do roku 2100 bude čím ďalej, tým viac nepravidelnejšia najmä v nižších polohách Slovenska.

Z výsledných hodnôt m-denných minimálnych prietokov je zrejmé, že do budúca môžeme očakávať zníženie minimálnych prietokov. Pri 90-denných minimálnych prietokoch sa eviduje nárast v tretej skúmanej časovej perióde podľa klimatického scenára KNMI. S výslednými hodnotami indexu základného odtoku je zjavné, že horné povodie Hrona možno nebude schopné zachovať odtok počas období sucha.

V rámci letných mesiacoch podľa modelových scenárov môžeme očakávať zníženie priemerných mesačných prietokov, čo môžu mať za následok zvyšujúce sa výskytu období sucha. Periódou sucha môžu narušiť ekosystémy s nedostatnosťou vody na ich existenciu. Podľa Poff et al. (2009) na

udržanie sladkovodných ekosystémov je v súčasnosti potrebné poznať nie len minimálny prietok vo vodnom toku, ale aj prirodzene sa meniaci režim prietoku.

Klimatická zmena so sebou prinesie extrémny, ktoré môžeme pozorovať už v súčasnosti v podobe silných búrok, extrémnych horúčav, častejší výskyt tornád už aj v strednej Európe a pod. Vedci po celom svete upozorňujú na častejšie výskyt prírodných katastrof, ktoré ohrozujú majetky a ľudské životy. Pri zmenách prietokov do budúcnosti bude naša spoločnosť nútená vytvoriť prostriedky na zachytávanie väčších objemov vody, aby sme krajinu chránili v období sucha a akumuláciu vody pri zvýšených množstvách spadnutých zrážok.

5 Referencie

Bárek, W., 2006: *Klimatické zmena a závlaha*. In: Štúdia Slovenskej bioklimatologickej spoločnosti pri SAV. Vydavateľstvo Technickej univerzity vo Zvolene, s. 37, ISBN 80-228-1717-2.

Booij, M. J., 2005: *Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions*. In: Journal of Hydrology, vol. 303, s. 176-198.

Greenpeace Slovensko, Barát, A., Pecho, J., 2020: Dopady klimatickej krízy na Slovensku. Greenpeace, s. 16.

Halmová, D., Pekárová, P., Meszároš, I., 2011: *Identifikácia zmien minimálnych denných prietokov vo vybraných staniách rieky Dunaj*. In: Acta Hydrologica Slovaca, vol. 12, no. 2, s. 286-295.

Hersh, E., Maidment, D., 2006: *Assessment of Hydrologic Alteration Software*. CRWR Online Report 06-11, TX 78712-4497.

Hlavčová, K., Szolgay, J., Kohnová, S., Hlásny, T., 2008: *Simulation of hydrological response to the future climate in the Hron River Basin*. In: Journal of Hydrology and Hydromechanics. vol. 56, no. 3, s. 163-175.

Janáčková, T., Labudová, L., Labuda, M., 2018: *Meteorologické sucho v oblastiach Slovenska s nížinným charakterom v rokoch 1981 – 2010*. In: Geographia cassoviensis XII., vol. 1, s. 53-64.

Juráková, M., Lapin, M., Skalová, J., 2008: *Vplyv zmeny klímy na priebeh hladiny podzemnej vody v lokalite zelienska*. In: Acta Hydrologica Slovaca. vol. 9, no. 2, s. 208-2017.

Kim, B., Kim, B., Kwon, H., 2011: *Assessment of the impact of climate change in the flow regime of the Han River basin using indicators of hydrologic alteration*. In: Hydrological processes. vol. 25, s. 691-704.

Lapin, M. et al, 1997: *Scenáre klimatickej zmeny v Slovenskej republike*. In: Národný klimatický program SR Klimatické zmeny – hydrológia a vodné hospodárstvo, 6/97. Bratislava, s. 111-117.

Lapin, M., Bašták, I., Gera, M., Hrvol', J., Kremlet, M., Melo, M., 2012: *New climate change scenarios for Slovakia based on global and regional general circulation models*. In: Acta Meteorologica Universitatis Comeniana. vol. 37, s. 25-73.

Lloyd-Hughes, B., Saunders, M, A., 2002: *A drought climatology for Europe*. In: International journal of Climatology. vol. 22, s. 1571-1592.

Mind'aš, J., Páleník, V., Nejedlík, P., 2011: *Dôsledky klimatickej zmeny a možné adaptačné opatrenia v jednotlivých sektoroch*. EFRA – Vedecká agentúra pre lesníctvo a ekológiu. Zvolen. S. 253.

- Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky, 2015: *Plán manažmentu čiastkového povodia Hrona*. s. 217.
- Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky, 2018: *Predbežné hodnotenie povodňového rizika v čiastkovom povodí Hrona – aktualizácia 2018*. s. 176.
- National Research Council Committee, 2005: *The Science of Instream Flows: A Review of the Texas Instream Flow Program. Committee on Review of Methods for Establishing Instream Flows for Texas Rivers, National Research Council*. The National Academies Press, Washington, D.C.
- Parajka, J., Szolgay, J., Meszároš, I., Kostka, Z., 2004: *Grid-based mapping of the long-term mean annual potential and actual evapotranspiration in upper Hron River basin*, In: *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. vol. 52, no. 4, s. 239-254.
- Pekárová, P., Szolgay, J., 2005: *Scenáre zmien vybraných zložiek hydrosféry a biosféry v povodí Hrona a Váhu v dôsledku klimatickej zmeny*. Bratislava. Veda. s. 496. ISBN 80-224-0884-0.
- Poff, N. L., Richter, B. D., Arthington A. H., Bunn S. E., Naiman, R. J., Kendy, E., Acreman, M., Apse, C., Bledsoe, B. P., Freeman, M. C., Henriksen, J., Jacobson, R. B., Kennen J. G., Merritt, D. M., O'Keeffe, J. H., Olden, J. D., Rogers, K., Tharme, R. E., Warner, A., 2009: *The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): A new framework for developing regional environmental flow standards*. In: *Freshwater Biology*. vol. 55, s. 147-170.
- Pramuk, B., Pekárová, P., Škoda, P., Halmová, D., Mitková, V., 2016: *Identifikácia zmien režimu denných prietokov slovenských riek*. In: *Acta Hydrologica Slovaca*, vol. 17, no. 1, s. 65 – 77.
- Rončák, P., Hlavčová, K., Kohnová, S., Szolgay, J., 2017: *Zmena návrhových prietokov vo vybraných povodniach na Slovensku v budúcich desaťročiach*. In: *Acta Hydrologica Slovaca*. Vol. 19, no. 2, s. 174-182.
- Rončák, P., Šurda, P., Vitková, J., 2021: *The impact of climate change on the hydropower potential: A case study from Topľa River basin*. In: *Acta Hydrologica Slovaca*. Vol. 22, no. 1, s. 22-29.
- Šachová, B., 2010: *Hydrologické sucho v kontextu klimatickej zmeny ve svete a v českém povodí Labe*. Balakářská práce, s. 95.
- The National Research Council, 2005: *The Science of Instream Flows: A Review of the Texas Instream Flow Program*. The National Academies Press, Washington, D. C. s. 126.
- The Nature Conservancy, 2007: *Indicators of Hydrologic Alteration Version 7 User's Manual*. s.
- Výleta, R., Hlavčová, K., Szolgay, J., Kohnová, S., Valent, P., Danáčová, M., Kandra, M., Alekšić, M., 2020: *Prehodnotenie štruktúry a medotiky kvantitatívna vodohospodárska bilancia povrchových vôd*. Vedecko-výskumná rozborová štúdia. Bratislava. s. 282.
- Yang, T., Cui, T., Xu, Ch., Ciais, P., Shi, P., 2017: *Development of a new IHA method for impact assessment of climate change on flow regime*. In: *Global and Planetary Change*, vol. 156, s. 68-79.
- Zhang, Q., Xiao, M., Liu, CH., Singh, V. P., 2014: *Reservoir-induced hydrological alterations and environmental flow variation in the East River, the Pearl River basin, China*. In: *Stoch Environ Res Risk Assess*, vol. 28, s. 2119-2131.