

ارزیابی کارایی مدل بیلان آب روزانه Balansim-Spreadsheet در

شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز بهشت‌آباد

سمیرا بیاتی، ا خدایار عبدالمهی،* سیدحسین علوی‌نیا^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۴

چکیده

تخمین رواناب در حوزه‌های آبخیز کوهستانی، یک جنبه چالشی در هیدرولوژی است؛ به‌ویژه در مناطقی که ذوب برف به‌طور قابل توجهی بر جریان روزانه اثر می‌گذارد. هدف از مطالعه حاضر، بررسی بیلان آب و برآورد رواناب در حوزه آبخیز بهشت‌آباد است که به دلیل اهمیت آن به‌واسطه طرح انتقال آب از این حوزه آبخیز مورد توجه قرار گرفته است. یکی دیگر از مشکلات معمول در حوزه‌های آبخیز کوهستانی نیز محدودیت داده است؛ لذا در این تحقیق، از مدل صفحه گسترده بیلان آب روزانه بر مبنای مخزن Balansim با حداقل داده ورودی استفاده شد. سری زمانی داده‌های روزانه بارندگی، دما، تبخیر-تعرق پتانسیل و دبی در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ مورد استفاده قرار گرفت. در این راستا، ابتدا با استفاده از ابزار آنالین WHAT و روش فیلتر دیجیتال بازگشتی، جریان پایه از دبی کل روزانه مشاهداتی تفکیک شد. سپس با فرض رفتار مخزنی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی، جریان سطحی و جریان پایه شبیه‌سازی شدند. براساس نتایج به‌دست آمده از ارزیابی مدل، این مدل در دوره واسنجی با ضریب کارایی نش - ساتکلیف ۰/۶۶، عملکرد خوب و با مقدار ۰/۶۴ در دوره اعتبارسنجی، عملکرد رضایت‌بخشی داشت. همچنین نتایج، نشان از دقت قابل قبول مدل در برآورد جریان‌های کم و دقت پایین‌تر در مورد جریان‌های سیلابی داشت.

کلیدواژه‌ها: بیلان آب روزانه، حوزه آبخیز بهشت‌آباد، ذوب برف، رواناب سطحی، مدل مخزنی.

۱. دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران؛ bayatisamira36@yahoo.com
 ۲. دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، نویسنده مسئول؛ kabdolla@sku.ac.ir
 ۳. استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران s.h.alavinia@kashanu.ac.ir
- این مقاله برگرفته از پژوهش مستقل است.

مقدمه

بررسی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوزه‌های آبخیز، نقش مهمی در سیستم‌های منابع آب ایفا می‌کند (بدنار و مارتون،^۱ ۲۰۲۴). چرخه هیدرولوژیکی دارای اجزای به هم پیوسته زیادی است که رواناب، بارش را به جریان رودخانه مرتبط می‌کند. رواناب سطحی زمانی ایجاد می‌شود که مقداری از نزولات جوی به خاک نفوذ نکند و در عوض بر روی سطح زمین جاری شود و به آب‌های سطحی پیوندد (چندل و حدا،^۲ ۲۰۱۷). رواناب با برگرداندن بارندگی اضافی و کنترل میزان جریان آب به سیستم‌های جریان، در متعادل کردن چرخه هیدرولوژیکی نقش مهمی دارد (سیتسون^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). با کاهش روزافزون منابع آبی در سرتاسر جهان، اهمیت برآورد دقیق رواناب بیشتر می‌شود و این مهم، همواره روش‌های دقیق‌تری برای مدل‌سازی فرایند بارش- رواناب می‌طلبد. با این حال، به دلیل رابطه پیچیده بین بارندگی و رواناب، این یک کار چالش‌برانگیز است. تغییرات رواناب رودخانه‌ها نه تنها به میزان بارندگی بستگی دارد، بلکه به بسیاری از پارامترهای هواشناسی دیگر مانند تبخیر- تعرق، تابش خورشیدی، سرعت باد، دمای هوا و... و همچنین ویژگی‌های حوزه آبخیز مانند توپوگرافی، شکل، شیب، ارتفاع، نوع خاک، پوشش زمین، ظرفیت نگهداری رطوبت خاک و... نیز وابسته است (عدنان و همکاران، ۲۰۲۱). به همین دلیل تاکنون مدل‌های هیدرولوژیکی مختلفی به منظور ثبت این پدیده توسعه یافته‌اند (ولی‌پور و همکاران، ۲۰۱۵؛ شعیب و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۹؛ فراگا و همکاران، ۲۰۱۹). دیویا و همکاران (۲۰۱۵)، مدل رواناب را به عنوان مجموعه‌ای از معادلات توصیف می‌کنند که بارندگی تبدیل شده به رواناب را براساس چندین پارامتر حوزه آبخیز محاسبه می‌کند. مدل‌سازی رواناب به دلیل تعامل پیچیده عناصر مختلف به هم پیوسته، یک فرایند بسیار

دشووار است (جهانزیب و همکاران، ۲۰۲۲) ولی به درک بهتر پدیده‌های هیدرولوژیکی و چگونگی تأثیر تغییرات بر چرخه هیدرولوژیکی (خو، ۲۰۰۲۹)، پیش‌بینی در دسترس بودن آب، ردیابی تغییرات در طول زمان و پیش‌بینی بلایای شدید (مانند سیل و خشکسالی) کمک می‌کند (وازه و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین از این مدل‌ها برای درک بیلان آب حوزه آبخیز، پیش‌بینی جریان‌های سطحی، بارش و رواناب (تیمبادیا و همکاران، ۲۰۲۳) و تخمین پیش‌بینی‌های آبی از اقلیم و اثرات آن‌ها بر بیلان آب استفاده می‌شود (بدنار و مارتون، ۲۰۲۴). مهم‌ترین ورودی‌های مورد نیاز مدل‌ها برای شبیه‌سازی رواناب شامل بارش، دما، توپوگرافی حوزه آبخیز، پوشش گیاهی، هیدروژئولوژی و سایر پارامترهای فیزیکی است (دیویا و همکاران، ۲۰۱۵). برای اجرای موفقیت‌آمیز مدل‌ها، داده‌های مربوط به تمامی پارامترها ضروری است که این امر به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه و حوزه‌های آبخیز با اندازه‌گیری کم، چالش‌برانگیز است (وو و چاو، ۲۰۱۱). با این حال، با افزایش سطح پیچیدگی نمایش فیزیکی، پیکربندی مدل پیچیده‌تر می‌شود و به پارامترهای بیشتری نیاز دارد که می‌تواند منجر به پارامترسازی بیش از اندازه و تلاش بیشتر برای کالیبراسیون شود (سیریلو و همکاران، ۲۰۲۰).

مطالعات مختلفی بر روی تخمین رواناب با استفاده از مدل‌های بیلان آب تمرکز داشته‌اند. نتایج مطالعه آرتیمانی و همکاران (۲۰۲۴)، در شبیه‌سازی بیلان آب روزانه حوزه آبخیز کشکان در استان لرستان با استفاده از مدل TOPKAPI-X نشان داد که این مدل با ضریب نش- ساتکلیف بالای ۰/۶، مؤلفه‌های بیلان آبی را به خوبی پیش‌بینی نموده است. در مطالعه ینهون و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی و مرور مقالات متعدد در مورد مدل‌سازی بارش-رواناب و بیلان آب، شکاف‌های تحقیقاتی عمده‌ای مانند خصوصیات هیدرولیکی آبخوان، برهم‌کنش آب سطحی و زیرزمینی، جریان آب زیرزمینی و بیلان آب زیرزمینی

8. Jehanzaib

9. Xu

1 . Vaze 0

1 . Timbadiya 1

1 . Wu & Chau 2

1 . Cirilo 3

1 . Yenehun 4

1. Bednár & Marton

2. Chandel & Hadda

3. Sitterson

4. Adnan

5. Zhou

6. Fraga

7. Devia

دشت‌های استان چهارمحال و بختیاری نیز در این حوزه آبخیز واقع شده است (زارع بیدکی و همکاران، ۲۰۲۱).

معرفی مدل مخزنی بیلان آب روزانه مورد استفاده

به دلیل کوهستانی بودن منطقه مورد مطالعه، برای بررسی بیلان آب، از ساختار مفهومی در مدل استفاده شده که شامل دو مخزن برای ذخیره برف ناشی از بارش‌های جامد و مخزن دیگری برای جمع‌آوری آب باران است (پاتیل و استیگلitz، ۲۰۱۴). به منظور درک بهتر از ساختار مدل Balansim و ورودی‌ها و خروجی‌های آن، طرح‌واره مدل در شکل (۲) ارائه شده است. روش‌های محاسبه هریک از مؤلفه‌های بیلان آب با آزمون سعی و خطا و در نظر گرفتن سادگی روش انتخابی و در دسترس بودن داده‌های آن انتخاب شدند (جدول ۱). به طوری که به منظور محاسبه تبخیر-تعرق واقعی از روش توزیع احتمال (اوچوا سانچز و همکاران، ۲۰۱۹)، برای محاسبه برگاب از معادله تجربی (علیزاده، ۲۰۱۵) و برای محاسبه آب حاصل از ذوب برف و دبی اوج سیل به ترتیب از روش ارائه شده توسط گروه مهندسی ارتش آمریکا (علیزاده، ۲۰۱۵) و روش تابع نمایشی عملکرد مخزن (تومالا، ۲۰۰۳) استفاده شد. در این مدل، رواناب مازاد بر ظرفیت مخزن زمانی اتفاق می‌افتد که بارش یا ذوب برفی مازاد بر نفوذ برای ورود به مخازن حوزه آبخیز در دسترس باشد و در عین حال ذخیره‌سازی در داخل مخزن هم به ظرفیت کامل یا حداکثر آن رسیده باشد. به منظور محاسبه رواناب روزانه خروجی حوزه آبخیز نیز در هر گام، اثر ذوب برف، رواناب مازاد بر ظرفیت مخزن و رواناب تولید شده در مخزن در گام قبلی در نظر گرفته شد. در نهایت، بیلان آب معادل برف و بیلان آب در هر گام زمانی به طور هم‌زمان به صورت زیر محاسبه شدند:

$$\frac{ds}{dt} = P_r - AET - I_a - R_{\text{bucket}} - R_{\text{spill}} \quad (7)$$

$$\frac{ds_{\text{snow}}}{dt} = P_s - M \quad (8)$$

که در آن، S_{snow} ذخیره‌سازی در مخزن برف (mm) است.

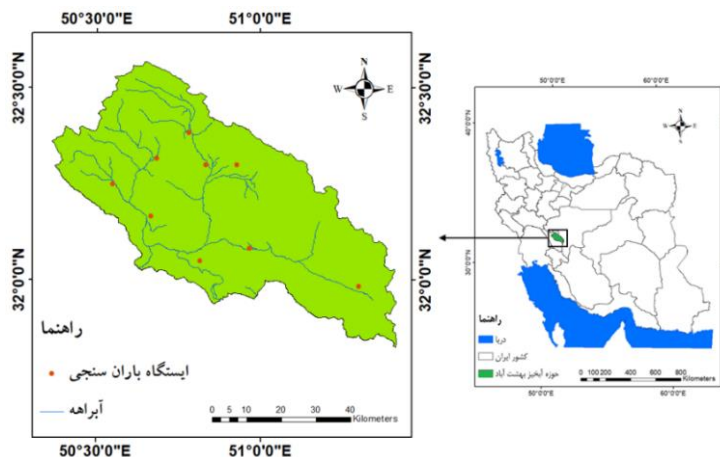
شناسایی گردید. واسیلیادس و مسترافتسیس (۲۰۲۳) عدم قطعیت رواناب سطحی شبیه‌سازی شده را به وسیله مدل بیلان آب ماهانه R-UTHBAL در حوزه آبخیز کوهستانی رودخانه پورتایکوس، آدریونان برآورد کردند. عدم قطعیت‌ها با استفاده از بسته hydropro یک الگوریتم جهانی بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای واسنجی مدل برآورد شد. اسلیمان و کوزلوف (۲۰۲۳) کارایی مدل MIKE 11-NAM را در مدل‌سازی رواناب با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم استنتاج فازی (FIS) و میانگین متحرک خودهمبسته یکپارچه (ARIMA) در ایستگاه هیدرومتری الجوادیه در رودخانه عاصی در سوریه بررسی کردند. در مطالعه ایشان استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای تخمین و پیش‌بینی پارامترهای هیدرولوژیکی توصیه شدند.

در مطالعه حاضر، رواناب روزانه حوزه آبخیز بهشت‌آباد با استفاده از مدل Balansim (بیاتی، ۱۴۰۲) که به زبان ویژوال بیسیک ماکرونویسی شده و به داده‌های روزانه بارندگی، تبخیر از تشت، دما و دبی روزانه نیاز دارد، طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ برآورد گردید. اهمیت بررسی بیلان آب در این منطقه به سبب طرح انتقال آب از این حوزه آبخیز به مناطق مقصد درخور توجه مضاعف است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز بهشت‌آباد با مساحت ۳۸۶۵ کیلومتر مربع در استان چهارمحال و بختیاری و بین طول‌های جغرافیایی ۲۳°۵۰ تا ۲۵°۵۱ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۴۹°۳۱ تا ۳۴°۳۴ شمالی قرار گرفته است. حداقل و حداکثر ارتفاع در این حوزه آبخیز به ترتیب ۱۶۸۱ متر در خروجی و ۳۶۱۳ متر در ارتفاعات آن است (شکل ۱). این حوزه آبخیز به عنوان یکی از سرشاخه‌های حوزه آبخیز کارون شناخته می‌شود و از نظر منابع و مصرف آب اهمیت فراوانی دارد. بیش از نیمی از وسعت



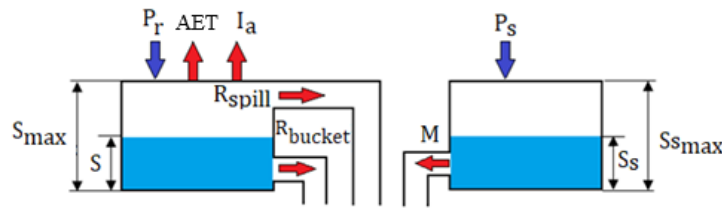
شکل (۱): موقعیت حوزه آبخیز بهشت‌آباد در ایران

Figure (1): Location of Beheshtabad watershed in Iran

جدول (۱): روش‌های محاسبه مؤلفه‌های بیلان آب در مدل مورد استفاده

Table (1): Methods of calculating water balance components in the used model

توضیحات	مؤلفه	معادله
P_r : بارش باران (mm)	بارش برف و باران	$\begin{cases} P_s = P, & P_r = 0 \\ P_s = 0, & P_r = P \end{cases}$ if $T_a < T_{min}$ else
P_s : بارش برف (mm)		
T_a : دمای روزانه (°C)		
T_{min} : دمای آستانه ذوب برف (°C)		
AET: تبخیر-تعرق واقعی (mm/day)	تبخیر-تعرق واقعی	$AET = \left\{ 1 - \left[\frac{S_{max} - S}{S_{max}} \right] \right\} \times PET$
PET: تبخیر-تعرق پتانسیل (mm/day)		
S: ذخیره آب در خاک (mm)		
S_{max} : حداکثر ذخیره آب در خاک (mm)		
$S_{max} - S$: کمبود رطوبت خاک		
I_a : برگاب (mm/day)	برگاب	$I_a = a P + b(1 - e^{-(P/b)})$
P: عمق بارش (mm)		
a و b: ضرایب ثابت		
M: ارتفاع آب حاصل از ذوب برف (mm)	ذوب برف	$M = (v_1 + v_2 P)T + v_3$
P: بارش (mm)		
T: دما (°C)		
v_1, v_2, v_3 : ضرایب ثابت		
R_{sim} : رواناب روزانه خروجی حوزه آبخیز	رواناب	$R_{sim_i} = X(R_{bucket_i} + R_{spill_i} + M_i) + (1 - X)(R_{bucket_{i-1}} + R_{spill_{i-1}} + M_{i-1})$
i: گام زمانی (روز)		
X: عامل تأخیر در اثر ذخیره (بین صفر و یک)		
R_{bucket} : رواناب تولیدشده در مخزن حوزه آبخیز (mm)		
R_{spill} : رواناب سرریز یا مازاد بر ظرفیت مخزن (mm)		
Q_{max} : دبی اوج (m ³ /s)	دبی اوج سیل	$Q_{max} = k_a S^m$
k_a و m: ضرایب واسنجی		
S: آب ذخیره‌شده در مخزن حوزه آبخیز (mm)		



شکل (۲): نمایش طرح‌واره مدل Balansim (بیاتی، ۱۴۰۲)

Figure (2): Schematic Representation of the Balansim Model (Bayati, 2023)

روش تحقیق

داده‌های مورد نیاز در این مدل، سری زمانی روزانه تبخیر از تشت، دما، بارش و دبی بوده که از شرکت سهامی آب منطقه‌ای اداره کل هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری تهیه شدند. با توجه به تعدد ایستگاه‌های موجود در منطقه، به منظور برآورد متوسط مکانی دما، بارش و تبخیر از تشت در حوزه آبخیز مورد مطالعه، روش چندضلعی‌های تیسسن استفاده گردید. همچنین تفکیک سهم رواناب و جریان پایه از داده‌های دبی روزانه با استفاده از ابزار آنلاین WHAT^۱ و روش فیلتر دیجیتال بازگشتی انجام شد (اکهاردت، ۲۰۰۸):

$$q_t = \frac{(1 - BFI_{max})\alpha \times q_{t-1} + (1 - \alpha)BFI_{max}Q_t}{1 - \alpha BFI_{max}} \quad (9)$$

که q_t و q_{t-1} به ترتیب جریان پایه فیلتر شده در زمان‌های t و $t-1$ (m^3/s)، Q_t جریان کل در زمان t (m^3/s)، α ثابت منحنی فرود و BFI_{max} حداکثر مقدار شاخص جریان پایه هستند.

مدل مخزنی Balansim در این مطالعه به صورت ماکروویژوال بیسیک در نرم‌افزار صفحه گسترده اکسل نوشته شد و بهینه‌سازی پارامترهای این مدل با استفاده از روش تابع داخلی جست‌وجوی هدف انجام گرفت. دوره واسنجی، سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ و دوره اعتبارسنجی، سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ در نظر گرفته شدند. ارزیابی عملکرد مدل نیز با استفاده از ضرایب کارایی نش و ساتکلیف (NSE)، کلینگ گوپتا (KGE)، r و RMSE و MAE انجام شد.

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_o - Q_s)^2}{\sum(Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (10)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (11)$$

$$r = \frac{\bar{Q}_s \bar{Q}_o - Q_s Q_o}{\sqrt{(\bar{Q}_o^2 - Q_o^2) - (\bar{Q}_s^2 - Q_s^2)}} \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Q_s - Q_o)^2}{N}} \quad (13)$$

$$MAE = \frac{\sum|Q_s - Q_o|}{N} \quad (14)$$

که در روابط فوق، Q_s و Q_o به ترتیب دبی شبیه‌سازی شده و دبی مشاهداتی، \bar{Q}_s و \bar{Q}_o به ترتیب میانگین‌های دبی شبیه‌سازی شده و دبی مشاهداتی، N تعداد داده‌ها، α نسبت انحراف معیار دبی شبیه‌سازی شده به دبی مشاهداتی، β نسبت میانگین مقادیر دبی شبیه‌سازی شده به دبی مشاهداتی و r ضریب همبستگی خطی پیرسون بین مقادیر دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده هستند. محدوده تغییرات ضریب NSE از منفی بی‌نهایت تا یک

است (نش و ساتکلیف، ۱۹۷۹). در توصیف عملکرد مدل با استفاده از این ضریب، محدوده بین ۰/۷۵ تا ۱ بسیار خوب، بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ خوب، بین ۰/۵ تا ۰/۶۵ رضایت‌بخش و کمتر از ۰/۵ غیرقابل قبول‌اند (کلت و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین عملکرد مدل با ضریب KGE کمتر از صفر خیلی ضعیف، بین ۰ تا ۰/۵ ضعیف، بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ متوسط و بزرگ‌تر از ۰/۷۵ خوب است (تاونر و همکاران، ۲۰۱۹). مقادیر نزدیک به صفر ضریب RMSE و مقادیر نزدیک به یک ضریب r نیز نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل و فاصله کمتر مقادیر شبیه‌سازی با مشاهداتی هستند.

نتایج و بحث

نمودار تفکیک جریان پایه از جریان کل یا دبی روزانه ایستگاه بهشت‌آباد در شکل (۳) ارائه شده است. مقادیر بارش در این شکل، مقادیر میانگین وزنی بارش روزانه در حوزه آبخیز محدود به ایستگاه هیدرومتری هستند.

می‌شوند که می‌تواند منجر به تخمین بیش از حد یا دست‌کم گرفتن در خروجی‌های مدل شود. مطالعات پیشین نشان داده است که اکثر مدل‌ها به دلیل تخمین زیاد سهم آب‌های زیرزمینی در این دوره‌ها، معمولاً جریان‌های کم را بیشتر از حد واقعی برآورد می‌کنند (یو و همکاران، ۲۰۲۰).

مدل‌های پیش‌بینی: مدل‌های پیش‌بینی پیشرفته، مانند مدل MuTHRE-FD، برای بهبود قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌های جریان در رژیم‌های مختلف جریان ایجاد شده‌اند. این مدل‌ها پیشرفت‌های قابل توجهی را در پیش‌بینی جریان‌های کم در مقایسه با جریان‌های زیاد نشان داده‌اند که چالش‌های ذاتی در پیش‌بینی دقیق رویدادهای سیل را برجسته می‌کنند (مک اینرنی^۲ و همکاران، ۲۰۲۱).

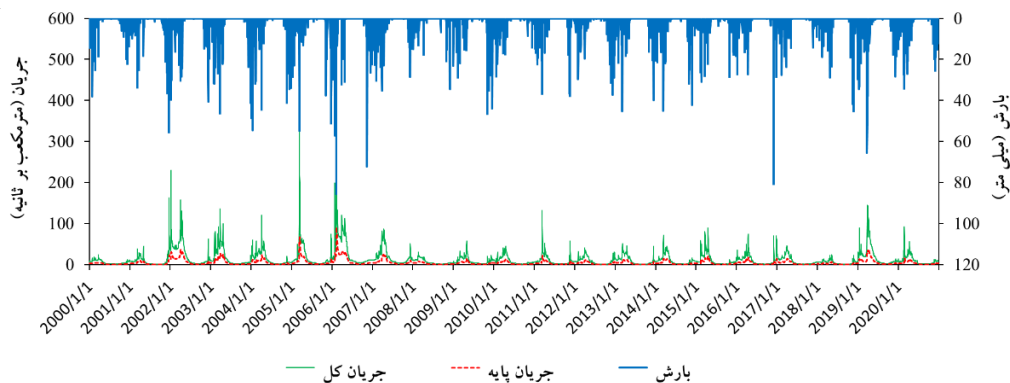
سنجه‌های خشکسالی و جریان: تحقیقات بر روی معیارهای خشکسالی جریان رودخانه نشان می‌دهد درحالی‌که جریان‌های کم را می‌توان به‌طور قابل اعتماد ارزیابی کرد، رویدادهای جریان بالا مانند سیل، تنوع و عدم قطعیت بیشتری را نشان می‌دهند. این تنوع، مدل‌سازی جریان‌های سیلابی را پیچیده می‌کند و جریان‌های کم را برای پیش‌بینی‌های دقیق سازگارتر می‌کند (هاموند^۳ و همکاران، ۲۰۲۲).

علاوه‌بر این، در شکل (۵) در برخی قسمت‌ها بیش‌برآوردی در تخمین رواناب مشاهده می‌شود. یکی از دلایل این امر را می‌توان واسنجی مدل متناسب با شرایط دوره واسنجی (وجود مقادیر بالای جریان) بیان کرد.

رواناب به‌عنوان یکی از خروجی‌های مدل بیلان‌آب است. هیدروگراف‌های رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل مورد استفاده برای حوزه آبخیز بهشت‌آباد در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده‌اند. بررسی بصری این هیدروگراف‌ها حاکی از آن است که مدل در شبیه‌سازی مقادیر اوج رواناب مشاهداتی عملکرد نسبتاً مناسبی دارد؛ اما به‌طور کلی مقادیر رواناب را کمتر از مقادیر واقعی تخمین زده است. براساس نتایج، حداکثر درصد بیش‌برآوردی رواناب سالانه در دوره واسنجی برابر با ۵۱ درصد و در دوره اعتبارسنجی برابر با ۴ درصد بود. علاوه‌بر این، حداکثر درصد کم‌برآوردی رواناب سالانه در هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی برابر با ۵۱ درصد بوده است. یکی از ویژگی‌های بارز این حوزه آبخیز، رواناب حاصل از ذوب برف آن است که برای تأمین منابع آبی در ماه‌های گرم بسیار حیاتی است. همچنین تحقیقات مدل‌هایی را برای ارزیابی اثرات تغییرات آب‌وهوایی بر رواناب ذوب برف به کار گرفته است که تغییرات در زمان و کمیت رواناب را آشکار می‌کند. به‌طور خاص، نتایج یکی از این مطالعات در حوزه آبخیز بهشت‌آباد، نشان‌دهنده جابه‌جایی اوج جریان از آوریل تا مارس و کاهش سهم رواناب ذوب برف در دوره‌های آینده به دلیل تغییر شرایط آب‌وهوایی است (رئیسی و همکاران، ۲۰۲۱). این اختلاف موجود در جریان‌های سیلابی که بیشتر در ماه‌های ذوب برف رخ داده‌اند، ممکن است به روش انتخابی برای شبیه‌سازی ذوب برف مربوط باشد. به‌طور کلی، می‌توان گفت که مدل در شرایط جریان‌های کم عملکرد بهتری داشته و هیدروگراف‌ها در برخی نقاط به‌خوبی با یکدیگر تطابق دارند. همچنین براساس نتایج دیگر مطالعات، این تفاوت عملکرد را در برآورد بهتر جریان‌های با مقدار کم در مقایسه با جریان‌های سیلابی، می‌توان به چندین عامل ذاتی در فرایند مدل‌سازی و ماهیت رویدادهای هیدرولوژیکی نسبت داد که به شرح زیرند:

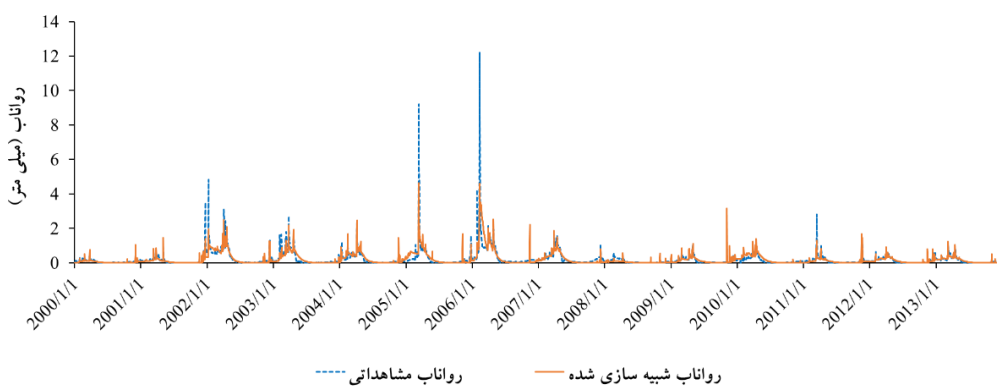
دینامیک جریان: جریان‌های کم اغلب ناشی از تخلیه تدریجی آب‌های زیرزمینی و جریان پایه ثابت هستند که شبیه‌سازی آن‌ها را برای مدل‌ها آسان‌تر می‌کند. در مقابل، جریان‌های سیلابی با تغییرات ناگهانی و شدید در دبی مشخص

1. Yu
2. McInerney
3. Hammond



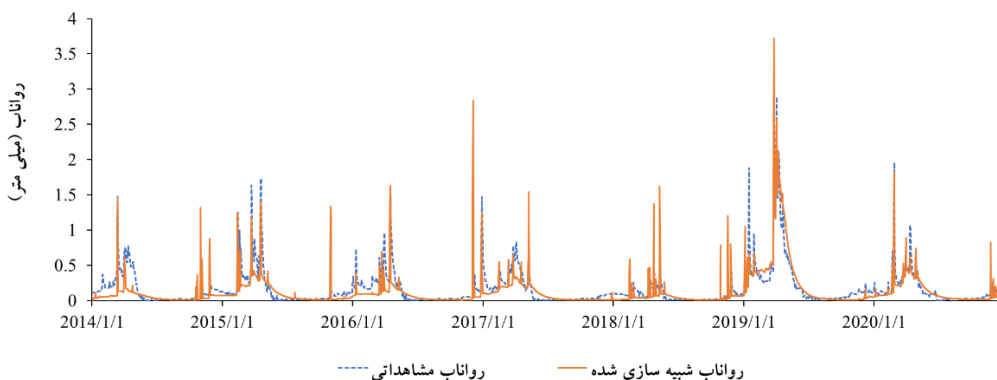
شکل (۳): هیدروگراف تفکیک جریان پایه از دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری بهشت‌آباد

Figure (3): The hydrograph of separation of base flow from daily discharge of Beheshtabad hydrometric station



شکل (۴): هیدروگراف رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ایستگاه بهشت‌آباد طی دوره واسنجی

Figure (4): The observation and simulation runoff hydrograph of Beheshtabad station during the calibration period



شکل (۵): هیدروگراف رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ایستگاه بهشت‌آباد طی دوره اعتبارسنجی

Figure (5): The observation and simulation runoff hydrograph of Beheshtabad station during the validation period

چالش مدل در شبیه‌سازی دقیق رواناب‌های با مقادیر بیشتر است. دلیل این امر می‌تواند پیچیدگی فرایندهای هیدرولوژیکی یا محدودیت داده‌های مشاهده‌ای در این بازه‌ها باشد. با توجه به این شکل‌ها در برخی نقاط پیک رواناب در زیر خط ۱:۱ و برخی بالای این خط واقع شده‌اند و نمی‌توان گفت به‌طور کلی مدل در دوره اعتبارسنجی بیش‌برآوردی داشته است. یکی از

شکل‌های (۶) و (۷) نمودارهای پراکنش نقاط رواناب مشاهده‌ای در مقابل رواناب شبیه‌سازی شده ایستگاه بهشت‌آباد را به ترتیب در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهند. در مقادیر پایین رواناب، تراکم نقاط بیشتر و نشان‌دهنده عملکرد پایدار مدل در بازه‌های رواناب کم و در مقادیر بالاتر رواناب، پراکندگی نقاط و فاصله بیشتر آن‌ها از خط ۱:۱ نشان‌دهنده

اعتبارسنجی ممکن است داده‌های معرف بیشتری داشته باشد که مدل می‌تواند بهتر با آن متناسب باشد، که منجر به بهبود معیارهای عملکرد مدل در مقایسه با دوره واسنجی می‌شود (صدوانی و الدو، ۲۰۲۳؛ سالاس و همکاران، ۲۰۲۴). تطبیق بیش از حد در طول کالیبراسیون نیز گاهی اوقات می‌تواند منجر به عملکرد ضعیف‌تر در داده‌های اعتبارسنجی مستقل شود. فرایند اعتبارسنجی به شناسایی و تصحیح این امر کمک می‌کند (ناسونوا و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین بهبود در مدل یا داده‌های ورودی بین واسنجی و اعتبارسنجی ممکن است توانایی مدل را برای ثبت رفتار سیستم در دوره اعتبارسنجی افزایش دهد (گنان و همکاران، ۲۰۲۳).

با این حال، تفاوت در معیارهای ارزیابی عملکرد در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی اغلب کوچک است و مدل باید به‌طور کلی ارزیابی شود. یک معیار ارزیابی عملکرد بهتر در دوره اعتبارسنجی لزوماً به این معنا نیست که مدل کامل است یا تحت همه شرایط عملکرد خوبی خواهد داشت.

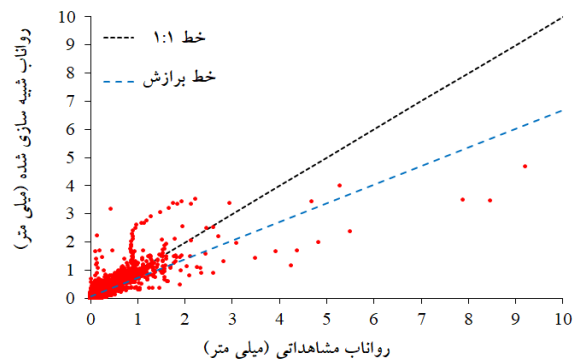
جدول (۲): نتایج ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی رواناب ایستگاه بهشت‌آباد

Table (2): The results of Model Performance Evaluation in Simulating Runoff at Beheshtabad Station					
دوره	KGE	NSE	r	RMSE	MAE
واسنجی	۰/۷۳	۰/۶۶	۰/۸۱	۰/۲۶	۰/۱
اعتبارسنجی	۰/۷۳	۰/۶۴	۰/۸۲	۰/۱۶	۰/۰۹

نتیجه‌گیری

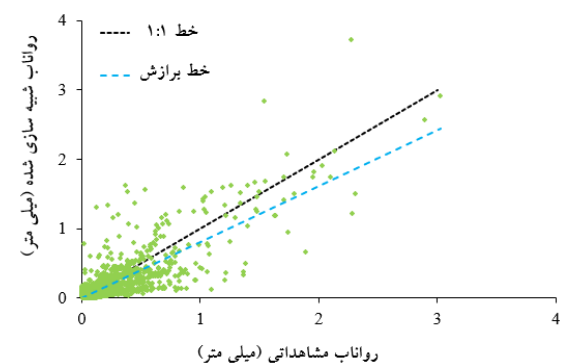
یافته‌های این مطالعه بر اثربخشی استفاده از مدلی با داده‌های ورودی حداقل و ساختاری ساده در نرم‌افزارهای صفحه‌گسترده برای شبیه‌سازی بیلان‌آب سطحی حوزه آبخیز بهشت‌آباد تأکید می‌کند. استفاده از یک مدل بیلان‌آب روزانه براساس دینامیک مخزن، ثابت کرده است که یک روش قابل دوام است؛ به‌ویژه در مناطق کوهستانی که با محدودیت داده مواجه‌اند.

دلایل متفاوت بودن دقت شبیه‌سازی رواناب به‌وسیله مدل و مسئله بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی رواناب را می‌توان به‌صورت بخشی متفاوت بودن الگوی بارش و همچنین اختلاف زیاد مقادیر جریان مشاهداتی در این ایستگاه بیان کرد.



شکل (۶): پراکنش نقاط رواناب مشاهداتی در مقابل رواناب شبیه‌سازی شده ایستگاه بهشت‌آباد طی دوره واسنجی

Figure (6): The distribution of observation runoff points versus the simulation runoff of Beheshtabad station during the calibration period



شکل (۷): پراکنش نقاط رواناب مشاهداتی در مقابل رواناب شبیه‌سازی شده ایستگاه بهشت‌آباد طی دوره اعتبارسنجی

Figure (7): The distribution of observation runoff points versus the simulation runoff of Beheshtabad station during the validation period

در جدول (۲)، نتایج ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از ضرایب کارایی مختلف ارائه شده است. براساس ضریب NSE مدل در دوره واسنجی با مقدار ۰/۶۶ دارای عملکرد خوب بوده و در دوره اعتبارسنجی با مقدار ۰/۶۴ عملکرد رضایت‌بخشی داشته است. همچنین عملکرد مدل براساس ضریب KGE در هر دو دوره با مقدار ۰/۷۳ متوسط بوده است. نتایج ضرایب RMSE و MAE نیز نشان داد که در حالت کلی، عملکرد مدل با اختلاف کمی در دوره اعتبارسنجی کمی بهتر از دوره واسنجی بود. این ممکن است به چند دلیل رخ دهد: دوره

1. Sadhwani & Eldho
2. Salas
3. Nasonova
4. Gnann

۱. بهبود پیش‌بینی جریان سیل با تمرکز بر اصلاح الگوریتم‌های شبیه‌سازی برای ثبت بهتر رویدادهای هیدرولوژیکی انجام شود. برای مثال یکپارچه‌سازی منابع داده‌ی اضافی مانند اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای بارندگی یا مدل‌های پیش‌بینی سیل، برای افزایش دقت پیش‌بینی در شرایط جریان بالا ضروری است.

۲. اجرای شبکه‌ای قوی از ایستگاه‌های پایش هواشناسی و هیدرولوژیکی در سرتاسر حوزه‌ی آبخیز بهشت‌آباد، در دسترس بودن داده‌ها را بهبود می‌بخشد.

۳. انجام مطالعات تطبیقی با حوزه‌های آبخیز مشابه می‌تواند معیارهای ارزشمندی برای عملکرد و کاربرد مدل ارائه دهد. این می‌تواند به شناسایی بهترین روش‌ها و راه‌حل‌های نوآورانه‌ای که در مناطق دیگر موفق بوده‌اند، کمک کند. اجرای این پیشنهادها، تلاش‌های تحقیقاتی و مدیریتی آتی می‌تواند درک و مدیریت منابع آب سطحی در حوزه‌ی آبخیز بهشت‌آباد را به میزان قابل توجهی افزایش دهد و در نهایت به فعالیت‌های منابع آب پایدار در مناطق کوهستانی کمک کند.

نتایج ارزیابی مدل Balansim نشان داد که در دوره‌های مختلف، مدل در شبیه‌سازی رواناب سالانه با خطاهایی در جهت بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی مواجهه بوده است، به‌طوری‌که با توجه به تغییرپذیری شدید دبی حداکثر درصد کم‌برآوردی در هر دو دوره برابر با ۵۱ درصد بود. با این حال، واسنجی و اعتبارسنجی موفق مدل، که با ضرایب نش-ساتکلیف ۰/۶۶ و ۰/۶۴ به‌ترتیب در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی مشهود است، نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب در تکرار رفتارهای هیدرولوژیکی مشاهده شده است. با نشان دادن اینکه مدل‌سازی بیلان آب مؤثر را می‌توان با داده‌های محدود به دست آورد، راه‌هایی را برای مطالعات آینده و کاربردهای عملی در زمینه‌های مشابه باز می‌کند. همچنین توانایی مدل برای تخمین دقیق جریان به‌ویژه جریان‌های کم قابل توجه است، زیرا به یک جنبه‌ی حیاتی از مدیریت منابع آب می‌پردازد. با این حال، کم‌برآوردی در جریان‌های سیلابی نشان می‌دهد که اصلاحات بیشتر ممکن است برای افزایش قابلیت‌های پیش‌بینی مدل در طول رویدادهای آب‌وهوایی شدید ضروری باشد. در اینجا چند راهکار پیشنهاد می‌گردد:

منابع

- Adnan, R.M., Petroselli, A., Heddami, S., Santos, C.A.G., & Kisi, O., (2021). Short term rainfall-runoff modelling using several machine learning methods and a conceptual event-based model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 35(3), 597-616.
- Alizadeh, A. (2015). *Applied Hydrology*. Astan Quds Razavi Publication, Mashhad. Iran.
- Artimani, M., Zeinivand, H., & Tahmasebipour, N. (2024). Simulation of water balance components using TOPKAPI-X distributed hydrological model (Case study: Kashkan basin). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(4), 637-651.
- Bayati, S. (2023). *Development of a flexible model with capability of multi-site automatic calibration for daily component-based water balance simulation*. PhD thesis, Shahrekord University. 110 pp.
- Bednář, M. & Marton, D. (2024). Developing a lumped rainfall-runoff model in daily timestep for the Central European regions: A case study of the Czech Republic. *Environmental Modelling & Software*, 179, p.106092.
- Chandel, S. & Hadda, M.S. (2017). Quantification of surface runoff in Patiala-Ki-Rao watersheds using modified NRCS model: a case study. *Journal of Applied and Natural Science*, 9(3), 1573-1581.
- Cirilo, J.A., Verçosa, L.F.D.M., Gomes, M.M.D.A., Feitoza, M.A.B., Ferraz, G.D.F. & Silva, B.D.M. (2020). Development and application of a rainfall-runoff model for semi-arid regions. *Rbrh*, 25, p.e15.
- Devia, G.K., Ganasri, B.P., & Dwarakish, G.S. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007.
- Eckhardt, K. (2008). A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. *Journal of Hydrology*, 352(1-2), 168-173.
- Fraga, I., Cea, L., & Puertas, J., (2019). Effect of rainfall uncertainty on the performance of physically based rainfall-runoff models. *Hydrological Processes*, 33(1), 160-173.
- Gnann, S., Reinecke, R., Stein, L., Wada, Y., Thiery, W., Müller Schmied, H., Satoh, Y., Pokhrel, Y., Ostberg, S., Koutroulis, A., Hanasaki, N. (2023). Functional relationships reveal differences in the water cycle representation of global water models. *Nature Water*, 1(12), 1079-1090.
- Hammond, J.C., Simeone, C., Hecht, J.S., Hodgkins, G.A., Lombard, M., McCabe, G., Wolock, D., Wiczorek, M., Olson, C., Caldwell, T. & Dudley, R. (2022). Going beyond low flows: Streamflow drought deficit and duration illuminate distinct spatiotemporal drought patterns and trends in the US during the last century. *Water Resources Research*,

- 58(9), p.e2022WR031930.
13. Jehanzaib, M., Ajmal, M., Achite, M., & Kim, T.W. (2022). Comprehensive review: Advancements in rainfall-runoff modelling for flood mitigation. *Climate*, 10(10), 147.
 14. Kult, J., Choi, W., & Choi, J. (2014). Sensitivity of the Snowmelt Runoff Model to snow covered area and temperature inputs. *Applied Geography*, 55, 30-38.
 15. McInerney, D., Thyer, M., Kavetski, D., Laugesen, R., Woldemeskel, F., Tuteja, N., & Kuczera, G., (2021). Improving the reliability of sub-seasonal forecasts of high and low flows by using a flow-dependent nonparametric model. *Water Resources Research*, 57(11), p.e2020WR029317.
 16. Nash, J.E., & Sutcliffe, J.V. (1979). River flow forecasting through conceptual models 1: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
 17. Nasonova, O.N., Gusev, E.M., Kovalev, E.E., & Shurkhno, E.A. (2021). Global estimates of changes in the terrestrial water balance components in the context of possible climate changes. *Water Resources*, 48, 459-473.
 18. Ochoa-Sanchez, A., Crespo, P., Carrillo-Rojas, G., Sucozhanay, A., & Celleri, R. (2019). Actual evapotranspiration in the high Andean grasslands: A comparison of measurement and estimation methods. *Frontiers in Earth Science*, 7, 1-16.
 19. Patil, S. & Stieglitz, M. (2014). Modelling daily streamflow at ungauged catchments: what information is necessary?. *Hydrological Processes*, 28(3), 1159-1169.
 20. Raisi, M.B., Vafakhah, M., & Moradi, H. (2021). Modeling snowmelt runoff under CMIP5 scenarios in the Beheshtabad watershed. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45, 1919-1927.
 21. Sadhwani, K. & Eldho, T.I. (2023). Assessing the vulnerability of water balance to climate change at river basin scale in humid tropics: Implications for a sustainable water future. *Sustainability*, 15(11), 9135.
 22. Salas, H.D., Builes-Jaramillo, A., Florian, C., Valencia, J., Tamayo, Y., Bermúdez, M., Rodríguez, M., & Echeverri, K. (2024). Projected effects of climate change in precipitation and streamflows of the Upper Orinoco River Basin from global and regional climate models. *Journal of Water and Climate Change*, p.jwc2024659.
 23. Shoaib, M., Shamseldin, A.Y., Khan, S., Sultan, M., Ahmad, F., Sultan, T., Dahri, Z.H., & Ali, I. (2019). Input selection of wavelet-coupled neural network models for rainfall-runoff modelling. *Water resources management*, 33, 955-973.
 24. Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R., Wolfe, K., Avant, B., & Mucche, M. (2018). An overview of rainfall-runoff model types. *9th International Congress on Environmental Modelling and Software*. Collins, Colorado, USA.
 25. Slieman, A.A. & Kozlov, D. (2023). Verification of MIKE 11-NAM Model for runoff modeling using ANN, FIS, and ARIMA methods in poorly studied basin. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 401, p. 01035). EDP Sciences.
 26. Timbadiya, P.V., Patel, P.L., Singh, V.P., & Sharma, P.J. (Eds.). (2023). *Hydrology and Hydrologic Modelling: Proceedings of 26th International Conference on Hydraulics, Water Resources and Coastal Engineering (HYDRO 2021)* (Vol. 312). Springer Nature.
 27. Towner, J., Cloke, H.L., Zsoter, E., Flamig, Z., Hoch, J.M., Bazo, J., Coughlan de Perez, E., & Stephens, E.M. (2019). Assessing the performance of global hydrological models for capturing peak river flows in the Amazon basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(7), 3057-3080.
 28. Tummala, V. (2003). *Hydrology of the Beaver Creek watershed using the TR-20 model and the HECHMS program*. West Virginia University.
 29. Valipour, M. (2015). Long-term runoff study using SARIMA and ARIMA models in the United States. *Meteorological Applications*, 22(3), 592-598.
 30. Vasiliades, L. & Mastrafitsis, I. (2023). A monthly water balance model for assessing streamflow uncertainty in hydrologic studies. *Environmental Sciences Proceedings*, 25(1), 39.
 31. Vaze, J., Jordan, P., Beecham, R., Frost, A., & Summerell, G. (2012). *Guidelines for rainfall-runoff modelling: Towards best practice model application*. pp. 47.
 32. Wu, C.L. & Chau, K.W. (2011). Rainfall-runoff modeling using artificial neural network coupled with singular spectrum analysis. *Journal of Hydrology*, 399(3-4), 394-409.
 33. Xu, C.Y. (2002). *Hydrologic models. Sweden: Uppsala University Department of Earth Sciences Hydrology*. Vol. 2.
 34. Yenehun, A., Dessie, M., Azeze, M., Nigate, F., Belay, A.S., Nyssen, J., Adgo, E., Van Griensven, A., Van Camp, M., & Walraevens, K. (2021). Water resources studies in headwaters of the Blue Nile Basin: a review with emphasis on lake water balance and hydrogeological characterization. *Water*, 13(11), 1469.
 35. Yu, S., Do, H.X., Van Dijk, A.I., Bond, N.R., Lin, P., & Kennard, M.J. (2020). Evaluating a landscape-scale daily water balance model to support spatially continuous representation of flow intermittency throughout stream networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(11), 5279-5295.
 36. Zare Bidaki, R., Moradi, B., & Bahrami, H. (2021). Locating susceptible areas for short earth fill dams (Case study: Beheshtabad Watershed). *Management of Natural Ecosystems*, 1(1), 37-48.
 37. Zhou, Q., Chen, L., Singh, V.P., Zhou, J., Chen, X., & Xiong, L. (2019). Rainfall-runoff simulation in karst dominated areas based on a coupled conceptual hydrological model. *Journal of Hydrology*, 573, 524-533.

Performance Evaluation of the Balansim-Spreadsheet Daily Water Balance Model in Simulating Runoff in the Beheshtabad Watershed

Samira Bayati,¹ Khodayar Abdollahi,^{2*} Seyyed-Hasaan Alavinia³

Received: 30/09/2024

Accepted: 02/02/2025

Extended Abstract

Introduction: Water balance modeling with minimal input data is critical for mountain watersheds, where data scarcity often poses significant challenges to effective water resource management. These regions are characterized by complex hydrological processes influenced by topography, climate variability, and seasonal snowmelt, making accurate water balance assessments essential for sustainable management practices. Models that require minimal input data enable researchers and water managers to estimate key hydrological components—such as precipitation, evaporation, and runoff—without the need for extensive data collection. The Beheshtabad watershed, like many mountainous regions, faces significant challenges in water resource management due to its complex hydrological processes and limited data availability. Effective management of surface water resources is crucial for sustainable development, agricultural productivity, and ecological health. Traditional hydrological models often rely on extensive datasets, which can be difficult to obtain in remote or data-scarce areas. To address these challenges, this study employs a daily water balance model based on reservoir dynamics. The model aims to simulate the surface water balance of the Beheshtabad watershed using minimal input data. The results of this research are expected to provide valuable insights that can enhance water resource management strategies in similar data-limited environments.

Materials and methods: The methodology of this study comprises several key components. Daily runoff in the Beheshtabad watershed was estimated using the Balansim model, which requires only daily data on rainfall, temperature, potential evapotranspiration, and discharge. The analysis covered the period from 2000 to 2020, with two-thirds of the data used for model calibration and the remaining third for validation. To separate base flow from total daily flow observations, the study employed the WHAT software in combination with a recursive digital filter method. This approach enabled a clear distinction between base flow and surface flow, which is critical for accurately simulating the hydrological components of the watershed. The Balansim model operates under the assumption of reservoir behavior, simplifying the representation of water storage and release processes within the watershed. This assumption allows for an efficient and practical simulation of the watershed's hydrological dynamics, even with limited input data.

Results and discussion: The model's performance was evaluated using the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) coefficient, a widely accepted metric for assessing predictive accuracy in hydrological modeling. The results revealed a favorable NSE coefficient of 0.66 during the validation period, indicating that the model effectively captured the observed hydrological dynamics. Additionally, a satisfactory NSE coefficient of 0.64 was achieved during the calibration period, further reinforcing the model's reliability.

One of the model's notable strengths is its improved accuracy in estimating low flows, which is critical for understanding water availability during dry periods. This capability is particularly important for agricultural water management, as low flow conditions can significantly impact crop yields and irrigation practices. However, the model tended to underestimate flood flows, highlighting an area for future improvement. This

1. PhD in Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran; Email: bayatisamira36@yahoo.com

2. Associate Professor, Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, (Corresponding author); Email: kabdolla@sku.ac.ir

3. Assistant Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Kashan University, Kashan, Iran; Email: s.h.alavinia@kashanu.ac.ir

limitation could pose challenges for flood management strategies, underscoring the need for further refinements to enhance the model's predictive accuracy during extreme weather events. The findings of this study demonstrate that the developed model holds significant promise for improving water resource management in data-scarce mountainous watersheds. By achieving a reliable water balance simulation with minimal input data, this research provides a valuable tool for decision-makers and water resource managers. The model's ability to simulate both base flow and surface flow dynamics offers a comprehensive understanding of the watershed's hydrological behavior, enabling more informed and effective management decisions.

Conclusion: This study successfully developed and validated a daily water balance model for the Beheshtabad watershed, demonstrating its ability to simulate hydrological processes effectively using minimal input data. The model's performance, as evidenced by favorable Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) coefficients, highlights its potential as a practical tool for water resource management in data-limited mountainous regions.

The insights from this research contribute to the broader fields of hydrology and water resource management, offering a pathway for sustainable practices in similar contexts. By leveraging simple yet effective modeling techniques, stakeholders can better address the complexities of water management in the face of climate variability and increasing demand. This approach not only supports immediate water management needs but also promotes long-term sustainability in mountainous watersheds.

Future research should focus on refining the model to enhance its predictive accuracy, particularly for flood events. Incorporating additional data sources, improving simulation algorithms, and integrating advanced technologies such as remote sensing could address the current limitations in flood flow predictions. Additionally, establishing a comprehensive monitoring network would significantly improve data availability and model calibration efforts, further strengthening the model's applicability and reliability.

Keywords: Daily water balance, Beheshtabad watershed, Snow melt, Surface runoff, Reservoir model.