

## مقایسه چهار روش تحلیل حساسیت پارامترهای مدل مفهومی HBV در حوضه آبریز کرخه و زیرحوضه‌های آن

مریم شفیعی<sup>۱</sup>، جواد بذرافشان<sup>۲\*</sup> و پرویز ایران نژاد<sup>۳</sup>

۱. دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۶/۱۲/۷، پذیرش نهایی: ۹۷/۱۰/۱۱)

### چکیده

مدل HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavledning) یک مدل مفهومی است که به‌طور گسترده‌ای برای پیش‌بینی‌های آب‌شناسی و مطالعات منابع آب به‌کار می‌رود. در این مطالعه تحلیل حساسیت پارامترهای مدل HBV برای زیرحوضه‌های کرخه و کل حوضه کرخه در چهار بازه زمانی مختلف ۱، ۵، ۱۰ و ۲۵ سال با چهار روش FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test)، RSA (Regional Sensitivity Analysis)، Sobol و رگرسیون بررسی شده است. پس از تعیین حساس‌ترین پارامترها مدل با روش الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب، NSGA (Nondominated Sorting Genetic Algorithm) واسنجی شده است. توابع هدف برای بررسی عملکرد مدل شامل NSE، RMSE، RSR و BIAS می‌باشند. نتایج تحلیل حساسیت پارامترها نشان می‌دهد که روش‌های Sobol و RSA به‌علت تغییرپذیری در بازه‌های زمانی و زیرحوضه‌های مختلف روش‌های قابل اطمینان‌تری هستند. حساس‌ترین پارامترهای مدل HBV برای زیرحوضه‌ها و حوضه کرخه در روال خاک پارامتر بیشینه ذخیره رطوبت خاک (Fcap) و در روال پاسخ پارامتر بیشینه ذخیره رطوبت لایه سطحی خاک (h1) هستند، این پارامترها در دبی‌های کمینه بیشترین حساسیت را نشان داده‌اند. پارامترهای روال برف مخصوصاً پارامتر دمای آستانه برای یخ‌زدگی (tlim) در زیرحوضه‌های قره‌سو و کشکان و در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت (۱ و ۵ سال) حساسیت نشان داده‌اند. مدل HBV توانایی شبیه‌سازی رواناب در حوضه کرخه و زیرحوضه‌های آن با دقت بالا را دارد. این مطالعه نشان می‌دهد انتخاب بازه‌های زمانی کوتاه‌تر واسنجی، نتایج شبیه‌سازی بهتری ارائه می‌دهد. در بازه زمانی یک سال بهترین ضریب NSE، RSR و RMSE مربوط به زیرحوضه گاماسیاب به‌ترتیب به‌مقدار ۰/۹۵، ۰/۲۱ و ۱/۴ و بهترین BIAS مربوط به زیرحوضه کشکان و حوضه کرخه به‌مقدار ۰/۱۳ است.

واژه‌های کلیدی: مدل مفهومی HBV، تحلیل حساسیت، واسنجی، حوضه آبریز کرخه.

### ۱. مقدمه

منبع اصلی عدم قطعیت‌های مدل‌های آب‌شناسی است (مرادخانی و سروشیان، ۲۰۰۸).

عدم قطعیت‌های مدل‌های آب‌شناسی مانند شرایط آغازین و مرزی، ساختار مدل و پارامترها می‌تواند به‌علت فقدان اطلاعات و دانش ضعیف از سازوکارهای پاسخ آب‌شناسی باشد (بی و همکاران، ۲۰۰۸). این عدم قطعیت‌ها تأثیر منفی بر دقت پیش‌بینی‌های مدل دارند. برای کاهش عدم قطعیت در پارامترهای مدل و به‌دست آوردن پاسخ مناسب سامانه مشاهده‌شده در یک حوضه مشخص، پارامترهای مدل‌های آب‌شناسی باید واسنجی

مدل‌های آب‌شناسی ابزارهای مهمی برای مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب در ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم و کاربری اراضی در چرخه‌های آب‌شناسی و رژیم‌های رواناب هستند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۲). دقت مدل‌های آب‌شناسی تحت تأثیر عدم قطعیت‌هایی در ساختار مدل، پارامترها و مشاهدات است. مشاهدات شامل داده‌های واداشتی مانند بارش و دما؛ داده‌های ایستا مانند توپوگرافی، نوع خاک و پوشش زمین و داده‌های پاسخ سیستم مانند داده‌های دبی و سطح آب زیرزمینی هستند. در بین این عدم قطعیت‌ها، عدم قطعیت در پارامترهای مدل،

مدل‌های آب‌شناسی استفاده می‌شوند (سانگ و همکاران، ۲۰۱۴). در بین روش‌های تحلیل حساسیت کلی کاربرد روش‌های مبتنی بر رگرسیون به علت اجرای ساده و تفسیر آسان نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد (سانگ و همکاران، ۲۰۱۵). با این حال، برای یک مدل آب‌شناسی پیچیده با پارامترهای فراوان و هزینه محاسباتی بالا روش Morris می‌تواند بهترین انتخاب باشد (ژان و همکاران، ۲۰۱۳). روش‌های مبتنی بر رگرسیون توانایی ایجاد شاخص‌های حساسیت قوی و دقیق برای مدل‌های پیچیده غیرخطی را دارند (تانگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ هرمان و همکاران، ۲۰۱۳). تحلیل رگرسیون در مدل‌های آب‌شناسی مثل HYMOD (مولتا و نیکلو، ۲۰۰۵)، SWAT (یانگ، ۲۰۱۱) و SAC-SMA (گن و همکاران، ۲۰۱۴) به کار رفته است.

ژان و همکاران (۲۰۱۳) حساسیت پارامترهای مدل SWAT را بر پایه روش Sobol برای چهار تابع هدف مختلف بررسی کردند. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد این روش توانایی تحلیل حساسیت مدل‌های آب‌شناسی پیچیده با ۱۰ تا ۱۰۰ پارامتر را دارد (سانگ و همکاران، ۲۰۱۵). پاپنرگر و همکاران (۲۰۰۸) پنج روش تحلیل حساسیت مختلف شامل روش‌های Morris، Sobol، آنتروپی، رگرسیون و تحلیل حساسیت منطقه‌ای را برای بررسی حساسیت پارامترهای مدل یک‌بعدی سامانه تحلیل رودخانه مرکز مهندسی آب‌شناسی (HEC-RAS) در رودخانه Alzette به کار بردند. آن‌ها دریافتند که روش‌های مختلف منجر به رتبه‌بندی کاملاً متفاوت از نظر اهمیت پارامترها می‌شوند و نتیجه‌گیری قطعی در مورد حساسیت نسبی پارامترهای مختلف ممکن نبود. مسمن و هولزمن (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای سه روش تحلیل حساسیت کلی شامل Sobol، RSA و آنتروپی دوطرفه را در سه مقیاس زمانی روزانه، ماهانه و سالانه برای یک مدل بارش-رواناب به کار بردند. نتایج نشان داد روش‌های تحلیل حساسیت بر پایه آنتروپی و RSA به علت تغییرپذیری بالاتر در حساسیت پارامترهای محاسبه شده

شوند. برای به دست آوردن پیش‌بینی‌های بهتر مدل قبل از واسنجی از رهیافت‌هایی مثل بهینه‌سازی پارامترها، تحلیل حساسیت و تحلیل عدم قطعیت استفاده می‌شود (رضوی و همکاران، ۲۰۱۲).

مدل‌های آب‌شناسی به دو طریق مختلف به پارامترها حساس هستند: ۱- تغییرپذیری یا عدم قطعیت مربوط به یک پارامتر حساس که در سراسر مدل انتشار پیدا می‌کند و در نتیجه منجر به عدم قطعیت در نتایج مدل می‌شود. ۲- خروجی‌های مدل می‌توانند همبستگی بالایی با یک پارامتر مشخص داشته باشد به طوری که تغییرات کوچک در مقدار ورودی منجر به تغییرات قابل توجهی در خروجی مدل می‌شود. دو نوع کاربردی تحلیل حساسیت در مدل‌های آب‌شناسی شامل تحلیل حساسیت محلی (Local) و تحلیل حساسیت کلی (Global) است. در تحلیل حساسیت محلی یکی از پارامترها تغییر می‌کند و پارامترهای دیگر ثابت می‌مانند. در نتیجه انتخاب وضعیت پایه در این روش خیلی مهم است. این روش به دلیل کاربرد و تفسیر آسان روش مفیدی است و در مقایسه با تحلیل حساسیت کلی نیاز به اجزای شبیه‌سازی کمتری دارد (همبی و همکاران، ۱۹۹۴). در تحلیل حساسیت کلی تأثیر همه ورودی‌ها یا تأثیر ترکیب آن‌ها بر روی تغییرات خروجی بر اساس اجزای زیاد مدل برآورد می‌شود. این روش اثرات اصلی (اثر هر پارامتر ورودی به تنهایی) و مشترک چندین ورودی را بررسی می‌کند (تانگ و همکاران، ۲۰۰۷). در مدل‌های آب‌شناسی کاربرد روش‌های تحلیل حساسیت کلی، به دلیل برتری این روش در مقایسه با روش‌های تحلیل حساسیت محلی، توصیه می‌شود (برونی و تارانولا، ۲۰۱۴).

در حال حاضر روش‌های مختلف تحلیل حساسیت کلی شامل: روش غربالگری (موریس، ۱۹۹۱)، تحلیل رگرسیون (هالتون و دیویس، ۲۰۰۲)، روش مبتنی بر واریانس (سالتلی، ۲۰۰۲) مانند تکنیک‌های Sobol و FAST، روش تحلیل حساسیت منطقه‌ای (هونبرگر و اسپیر، ۱۹۸۱) و روش مبتنی بر آنتروپی به طور گسترده در

مختلف (بازه‌های زمانی مختلف) براساس توابع هدف مشخص و جریان شبیه‌سازی شده از اهداف دیگر این پژوهش هستند.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱. منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی این تحقیق حوضه آبریز کرخه است (شکل ۱). این حوضه از نظر تأمین منابع آب در غرب کشور حائز اهمیت است. حوضه کرخه در غرب کشور، در مناطق میانی و جنوب غربی رشته کوه‌های زاگرس قرار دارد و شامل ۵ زیرحوضه گاماسیاب، سیمره، قره سو، کشکان و کرخه جنوب می‌باشد. مساحت حوضه بالغ بر ۵۰۷۶۸ کیلومترمربع است و در طول جغرافیایی  $10^{\circ} 49' - 06^{\circ} 46'$  شرقی و  $34^{\circ} 56' - 30^{\circ} 52'$  عرض شمالی قرار گرفته است. ویژگی‌های حوضه کرخه و زیرحوضه‌های آن در جدول ۱ آورده شده است.

در این مطالعه برای محاسبه بارش و دما از میانگین مکانی به روش تیسن (Thiessen) استفاده شده است. برای محاسبه بارش و دما در حوضه کرخه از میانگین داده‌ها در ایستگاه‌های همدان، سنندج، کرمانشاه، و خرم‌آباد استفاده شده است. داده‌های ایستگاه سینوپتیک از سازمان هواشناسی کشور و داده‌های آب‌سنجی از وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران تهیه شده است.

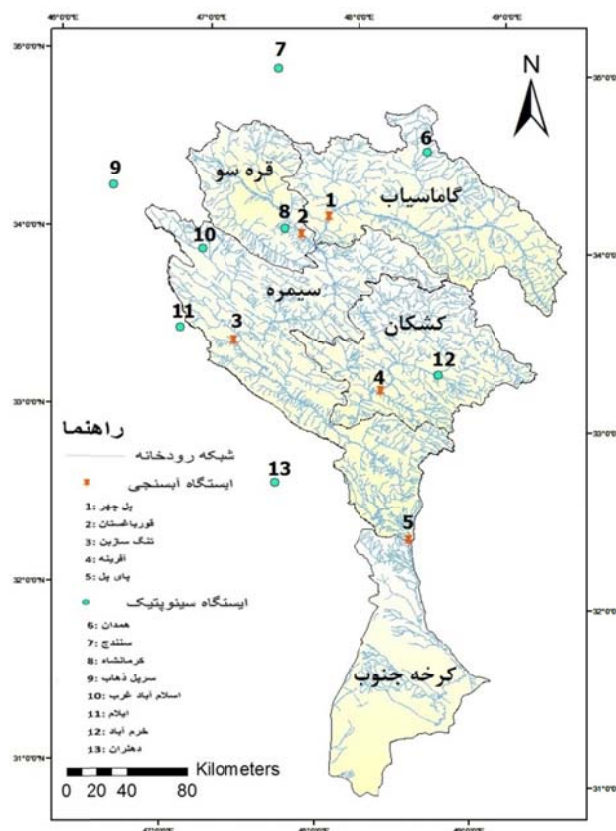
جدول ۱. مشخصات حوضه کرخه و زیرحوضه‌های آن.

نام زیرحوضه / حوضه	ایستگاه آب‌سنجی	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	مساحت زیرحوضه / حوضه (کیلومترمربع)	دوره آماری
زیرحوضه گاماسیاب	پل چهر	$47^{\circ} 26'$	$34^{\circ} 21'$	۱۰۸۶۰	۱۹۵۶-۱۹۸۰
زیرحوضه قره‌سو	قورباغستان	$47^{\circ} 15'$	$34^{\circ} 14'$	۵۳۷۰	۱۹۵۸-۱۹۸۲
زیرحوضه سیمره	تنگ سازین	$46^{\circ} 51'$	$33^{\circ} 34'$	۱۵۷۳۵	۱۹۸۷-۱۹۹۶
زیرحوضه کشکان	آفرینه	$47^{\circ} 54'$	$33^{\circ} 20'$	۹۱۴۰	۱۹۵۷-۱۹۸۱
حوضه کرخه	پای پل	$48^{\circ} 05'$	$32^{\circ} 15'$	۴۲۲۳۹	۱۹۶۲-۱۹۸۰

توسط داده‌های مختلف قوی‌تر از روش Sobol هستند. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد روش‌های تحلیل حساسیت کلی در مقایسه با روش محلی رهیافت مناسب‌تری برای تعیین حساس‌ترین پارامترها در مدل‌های آب‌شناسی است، با این حال کاربرد چند روش تحلیل حساسیت کلی برای یک مدل آب‌شناسی ممکن است منجر به نتایج متفاوت شود. کاربرد چند روش تحلیل حساسیت کمک بیشتری به درک بهتر تحلیل حساسیت و شناسایی پارامترهای حساس می‌کند.

سوالات اصلی این تحقیق این است که آیا روش‌های مختلف تحلیل حساسیت در یک حوضه مشخص به‌صورت یکسان عمل می‌کنند؟ و تأثیر طول دوره‌های زمانی مختلف در شناسایی پارامترها و عملکرد مدل HBV چقدر است؟ برای پاسخ به این سوالات تحلیل حساسیت پارامترهای مدل HBV برای حوضه کرخه و زیرحوضه‌های آن با چهار روش تحلیل حساسیت کلی در ۴ دوره زمانی بررسی شده است. سپس واسنجی مدل با روش الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب صورت گرفته است.

هدف اصلی این تحقیق شناسایی پارامترهای مدل HBV در حوضه کرخه برای ارزیابی سازگاری مدل با رفتار واقعی حوضه از طریق واسنجی است. تغییرات زمانی پارامترها، ارزیابی عملکرد مدل در طول شبیه‌سازی‌های



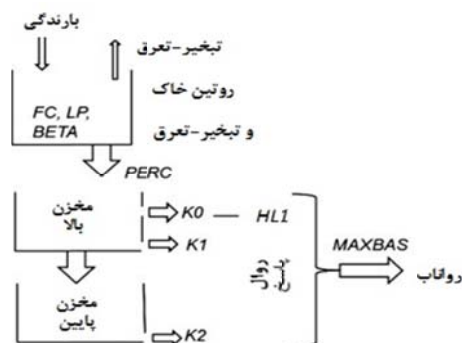
شکل ۱. حوضه آبریز کرخه و زیرحوضه‌های آن.

## ۲-۲. ساختار مدل HBV

بارش و دمای هوا، همچنین برآوردهای ماهانه دراز مدت تبخیر پتانسیل صورت می‌گیرد. مدل شامل ۴ روال (Routine) برف، رطوبت خاک، پاسخ (آب زیرزمینی) و روندیابی است. ساختار کلی مدل HBV در شکل ۲ آمده است.

مدل HBV (برگسترم، ۱۹۹۵) یک مدل مفهومی بارش- رواناب است که برای پیش‌بینی جریان رودخانه در سراسر دنیا به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود (اولنبروک و همکاران، ۱۹۹۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ ناتزمن و می، ۲۰۰۷؛ اکثر و همکاران، ۲۰۰۸؛ ون پلت و همکاران، ۲۰۰۹؛ درینسن و همکاران، ۲۰۱۰). در این مدل شبیه‌سازی دبی روزانه بر اساس سری زمانی

مدل HBV ۱۲ پارامتر دارد که شامل پارامترهای روال‌های برف، خاک، پاسخ و روندیابی می‌باشند. توضیحات مربوط به این پارامترها در جدول ۲ آمده است.



شکل ۲. ساختار کلی مدل HBV

جدول ۲. پارامترهای مدل HBV بر اساس مطالعات قبلی (هرمان و همکاران، ۲۰۱۳).

ردیف	پارامتر	واحد	توضیح	محدوده بالا	محدوده پایین
۱	K2	۱/روز	نرخ رکود از لایه عمیق خاک	۰/۱	۰/۰۰۰۰۵
۲	K1	۱/روز	نرخ رکود لایه میانی خاک	۱	۰/۰۱
۳	K0	۱/روز	نرخ رکود لایه سطحی خاک	۲	۰/۰۵
۴	MaxBas	ساعت	طول انتقال آب نمود روندیابی	۱۲۰	۲۴
۵	degd	میلی متر بر (روز در درجه سلسیوس)	فاکتور درجه روز (نرخ ذوب برف)	۲۰	۰
۶	degw	درجه سلسیوس	دمای پایه که بالاتر از آن ذوب برف رخ می دهد	۳	-۳
۷	ttl	درجه سلسیوس	دمای آستانه که در کمتر از آن یخ زدگی رخ می دهد	۳	-۳
۸	perc	میلی متر بر روز	نرخ نفوذ در لایه عمیق خاک	۱۰۰	۰
۹	B	-	ضریب توزیع ذخیره رطوبت خاک	۷	۰
۱۰	lp	-	محدودیت رطوبت خاک در تبخیر- تعرق پتانسیل	۱	۰/۳
۱۱	Fcap	میلی متر	بیشینه ذخیره رطوبت خاک	۲۰۰۰	۱۰
۱۲	h11	میلی متر	بیشینه ذخیره رطوبت لایه سطحی خاک	۱۰۰	۰

#### ۲-۳. روش پژوهش

در این مطالعه برای تحلیل حساسیت پارامترهای مدل HBV ابتدا مدل با روش الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب (NSGA) در ۴ زیرحوضه کرخه و کل حوضه کرخه برای همه دوره های آماری مورد مطالعه به وسیله دو تابع هدف ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) واسنجی شد. در مرحله بعد حساسیت پارامترهای مدل با ۴ روش تحلیل حساسیت کلی (GSA) شامل روش های رگرسیون، مبتنی بر واریانس (FAST, Sobol) و روش تحلیل حساسیت منطقه ای (RSA) مورد بررسی قرار گرفت. سپس مدل با تثبیت پارامترهای غیرحساس مجدداً واسنجی شد. در همه دوره های آماری یک سال برای آماده سازی (Warm-up) جهت حذف اثرات شرایط آغازین به کار رفته است (سایبرت و ویس، ۲۰۱۲؛ ویس و همکاران، ۲۰۱۵).

حساسیت پارامترهای مدل HBV استفاده شده است. این نرم افزار مبتنی بر زبان برنامه نویسی جاوا می باشد که برای ارزیابی مدل های زیست محیطی ارائه شده است (اسکاچ و همکاران، ۲۰۱۵). این نرم افزار ابتدا بر اساس سامانه واسنجی مدل OPTAS (فیشر و همکاران، ۲۰۱۲) طراحی شده است. در این مطالعه با لینک کردن مدل HBV با این جعبه افزار و تغییر تنظیمات پیکربندی (Setup Configuration) مدل و پارامترهای آن محاسبات تحلیل حساسیت صورت گرفته است. برای تحلیل حساسیت پارامترهای مدل HBV بر اساس روش نمونه گیری مونت- کارلو و روش دنباله هالتن برای هر کدام از نمونه ها (دوره های زمانی) در هر زیرحوضه به صورت جداگانه ۱۰۰۰ نمونه گیری برای مجموعه پارامترهای ورودی با محدوده مشخص برای هر پارامتر صورت گرفته است.

در ادامه روش الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب و

در این مطالعه از جعبه ابزار MOUSE برای تحلیل

روش‌های تحلیل حساسیت به کار گرفته شده در این مطالعه به اختصار شرح داده می‌شود.

رگرسیون استاندارد شده یک شاخص حساسیت برای پارامتر  $x_i$  ایجاد می‌کنند.

### ۲-۳-۱. الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب

الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های حل مسأله است که از مدل‌سازی زیستی جمعیت جانداران به وجود آمده است (بنت و همکاران، ۱۹۹۹). در این روش انتخاب بر اساس دو عامل رتبه جمعیت و محاسبه فاصله صورت می‌گیرد. جمعیت‌ها در رتبه‌های پایین‌تر و فاصله ازدحامی بیشتر انتخاب می‌شوند. پس از انجام تقاطع و جهش برای تولید فرزندان جدید، تلفیق جمعیت اولیه و جمعیت به دست آمده از تقاطع و جهش صورت می‌گیرد و جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت تلفیق شده در مراحل قبل جایگزین می‌شود. تمامی مراحل قبلی تا نسل (یا شرایط بهینه) مورد نظر تکرار می‌شوند (کولو و همکاران، ۲۰۰۷).

### ۲-۳-۲. روش‌های تحلیل حساسیت کلی

#### ۲-۳-۳-۱. روش رگرسیون

در این روش، محاسبات سریع و فهم آن آسان است. اساس روش رگرسیون برآورد روابط بین خروجی و پارامترهاست:

$$y_i = b_0 + \sum_j b_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (1)$$

که  $x_j$  ( $j=1,2,3,\dots,k$ ) زامین پارامتر است. ( $i=1,2,3,\dots,N$ ) نشان‌دهنده تعداد اجراهای مدل است.  $b_j$  ضریب برآورد شده از طریق روش حداقل مربعات برای هر  $x_j$  و  $\varepsilon_i$  خطای تصادفی. وقتی  $b_j$  تعیین شد، مدل رگرسیون به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{y-\bar{y}}{s} = \sum_j \frac{b_j s_j}{s} \frac{x_j - \bar{x}_j}{s_j} \quad (2)$$

ضرایب  $\frac{b_j s_j}{s}$  در معادله (۵) ضرایب رگرسیون استاندارد شده (standardized regression coefficients) هستند.

وقتی پارامترهای  $x_j$  مستقل از یکدیگر هستند، ضرایب

### ۲-۳-۳-۲. روش‌های مبتنی بر واریانس

روش‌های مبتنی بر واریانس از یک نسبت واریانس برای برآورد پارامترهای مهم بر اساس تحلیل واریانس استفاده می‌کند (سالتلی و همکاران، ۱۹۹۹؛ سوبل، ۱۹۹۳) و مبتنی بر تحلیل عدم قطعیت خروجی برای ورودی مربوط هستند. روش‌های مبتنی بر واریانس شامل دو تکنیک FAST و Sobol (سوبل، ۲۰۰۱) می‌باشد (سالتلی، ۲۰۱۲). در این روش دو نوع اندازه‌گیری حساسیت شامل مرتبه اول (First Order) و تأثیر کل یا مرتبه کل (Total Order) وجود دارد. تأثیرات مرتبه اول اثرات اصلی را برای واریانس‌های خروجی با توجه به ورودی‌های مربوط بررسی می‌کند. مجموع اثرات، کل واریانس خروجی ورودی مربوطه را محاسبه می‌کند و در واقع شامل تأثیرات مرتبه اول و مراتب بالاتر مربوط به تأثیرات متقابل بین ورودی‌هاست. در این مطالعه از شاخص حساسیت کل هر پارامتر استفاده شده است.

### ۲-۳-۳-۳. تحلیل حساسیت منطقه‌ای (RSA)

روش تحلیل حساسیت منطقه‌ای ابتدا در زمینه مدل‌های زیست‌محیطی ارائه شد (اسپیر و هومبرگر، ۱۹۸۰) و سپس توسط بون و بنلی (۱۹۹۲) برای مدل‌های آب‌شناسی توسعه یافت. این روش به طور کلی یک رهیافت گرافیکی بر اساس شبیه‌سازی مونت کارلو است. در این روش مجموعه پارامترها بر اساس مقایسه نتایج مدل با یک آستانه از پیش تعیین شده به دو گروه رفتاری (behavioral) و غیر-رفتاری (non-behavioral) دسته بندی می‌شوند (سالتلی و همکاران، ۲۰۰۴). در این مطالعه برای سنجش عملکرد هر مجموعه پارامتر، ضریب نش-ساتکلیف (NSE)، به عنوان تابع هدف به کار رفت. پس از محاسبه مقادیر ضریب نش-ساتکلیف برای هر مجموعه پارامتر، آستانه احتمالاتی برای رد پارامترهای غیر-رفتاری

است. مقادیر اریبی مثبت و منفی به ترتیب نشان‌دهنده فرابرا آورد و فروبر آورد مدل هستند.

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{simi} - Q_{obsi})}{\sum_{i=1}^N (Q_{obsi})} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{[\sum_{i=1}^N (Q_{obsi} - Q_{simi})^2] / N} \quad (5)$$

در مورد آماره RMSE مقادیر کمتر از نصف انحراف معیار قابل قبول هستند.

RSR می‌تواند از صفر تا یک مقدار مثبت بزرگ تغییر کند. هر چه این آماره کوچک‌تر باشد اجرای بهتر مدل را نشان می‌دهد.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{obsi} - Q_{simi})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{obsi} - \bar{Q}_{obs})^2}} \quad (6)$$

که در آن  $N$  تعداد مشاهدات،  $Q_{obs}$  و  $Q_{sim}$  دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده،  $\bar{Q}_{obs}$  و  $\bar{Q}_{sim}$  متوسط دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای کل دوره زمانی است.

### ۳. نتایج

#### ۳-۱. تأثیر طول شبیه‌سازی بر حساسیت پارامترهای

##### مدل HBV

در این مطالعه ۴ دوره آماری برای هر کدام از زیرحوضه‌ها و حوضه کرخه (به جز زیرحوضه سیمره به دلیل فقدان داده‌های دبی) بررسی شده است. شکل ۳ نتایج چهار روش تحلیل حساسیت در بازه زمانی ۱۰ سال را برای حوضه کرخه و زیرحوضه‌های آن نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد برای همه زیرحوضه‌ها و کل کرخه در روش FAST حساس‌ترین پارامترها  $tlim$  و  $Fcap$  هستند و در روش رگرسیون پارامتر  $lp$  حساس‌ترین پارامتر با حساسیت ۸۰ درصدی است. روش‌های Sobol و RSA برای زیرحوضه‌ها و مقیاس‌های زمانی مختلف نتایج متفاوتی نشان داده‌اند. در زیرحوضه گاماسیاب نتایج روش Sobol برای هر ۴ مقیاس زمانی مشابه است و پارامتر  $hl1$  (روال پاسخ) و پارامترهای روال خاک ( $Fcap$ ،  $B$  و  $lp$ ) حساسیت بیشتری نشان می‌دهند. در روش RSA در

بر اساس ضریب نش-ساتکلیف ۰/۵ تعیین شد. مجموعه پارامترها با ضریب نش-ساتکلیف بزرگ‌تر از ۰/۵ به‌عنوان پارامترهای رفتاری مشخص شدند. سپس توزیع احتمال تجمعی نسبی دو پارامتر در برابر مقادیر پارامتر رسم شد و تحلیل آماری (آزمون کولموگروف اسمیرنوف) برای تشخیص معنی‌داری بین دو گروه صورت گرفت. چنانچه توزیع پارامتر مورد نظر در دو گروه متفاوت باشد، پارامتر مورد نظر به‌عنوان پارامتر موثر در نظر گرفته می‌شود و بالعکس.

#### ۲-۴. توابع هدف

ارزیابی عملکرد یک مدل آب‌شناسی نیاز به برآورد دقت رفتار شبیه‌سازی شده مدل در مقایسه با داده‌های مشاهداتی دارد. در این مطالعه از ۴ تابع هدف برای سنجش عملکرد مدل HBV استفاده شده است. آماره‌های مورد استفاده شامل ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، اریبی (BIAS)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و نسبت ریشه میانگین مربعات خطا به انحراف استاندارد داده‌های اندازه‌گیری (RSR) می‌باشد.

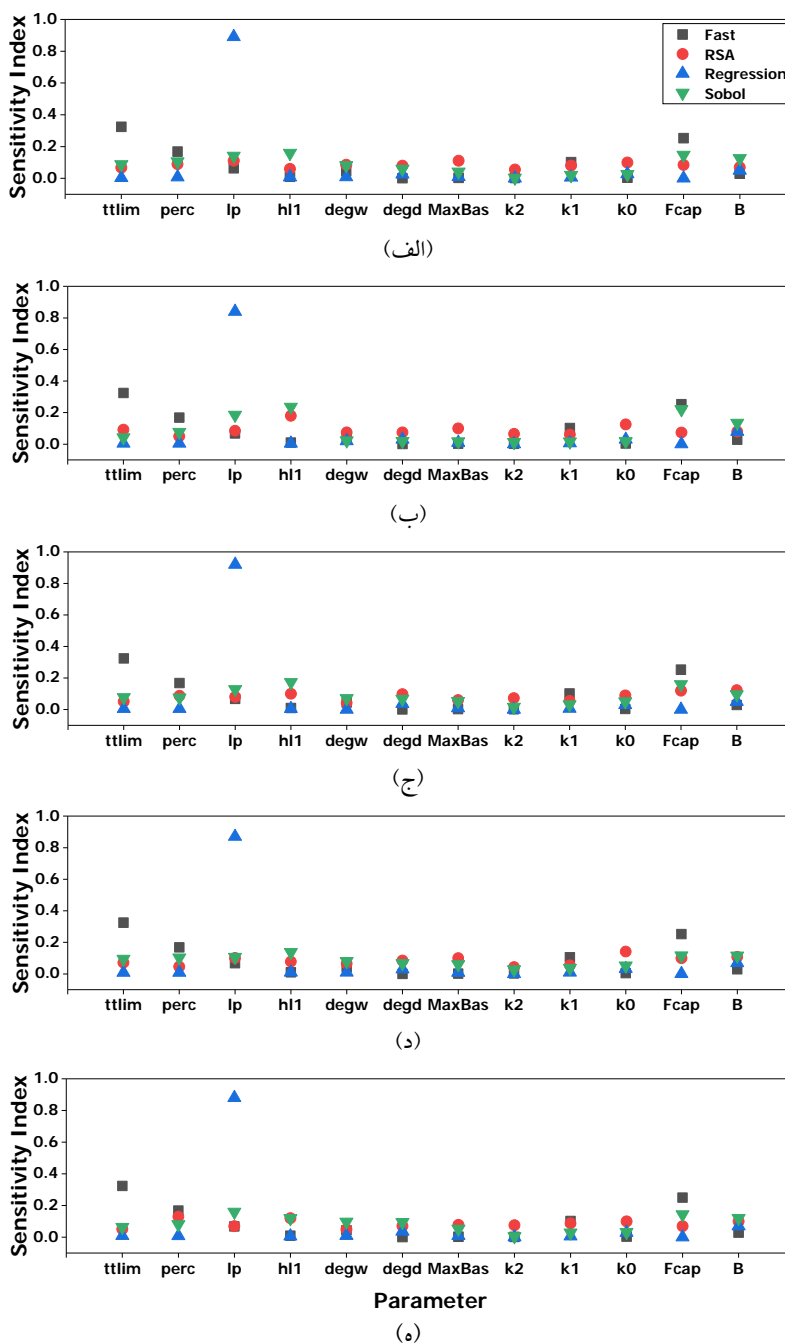
شاخص NSE یک مقدار نرمال شده است که بزرگی نسبی واریانس باقیمانده‌ها را ارزیابی می‌کند و تغییرات آن از منهای بی‌نهایت تا یک است (نش و ساتکلیف، ۱۹۷۰). مقادیر NSE بزرگ‌تر از صفر نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های مدل دقیق‌تر از میانگین داده‌های مشاهداتی هستند و NSE برابر با یک نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های مدل کاملاً با داده‌های مشاهداتی یکسان هستند. NSE یکی از آماره‌هایی است که به‌طور گسترده برای ارزیابی توافق بین دو متغیر در مدل‌سازی آب‌شناسی استفاده می‌شود (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obsi} - Q_{simi})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obsi} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (3)$$

BIAS نشان‌دهنده توافق کلی بین دو متغیر است (گوپتا و همکاران، ۱۹۹۹). BIAS صفر به معنی عدم وجود اریبی کلی در خروجی شبیه‌سازی شده در مقایسه با مشاهداتی

بیشتری دارند و در مقیاس زمانی ۱۰ و ۲۵ سال پارامترهای h1l و Fcap حساس‌ترند. در روش RSA هم در مقیاس‌های زمانی ۱، ۵، ۱۰ و ۲۵ سال به ترتیب پارامترهای degd، perc، Fcap و h1l حساسیت بیشتری نشان می‌دهند.

مقیاس زمانی ۱ و ۵ سال پارامتر روندیابی (MaxBas)، در مقیاس زمانی ۱۰ و ۲۵ سال Ip حساس‌ترین پارامتر است. در زیرحوضه قره‌سو نتایج روش Sobol نشان داده است در مقیاس‌های زمانی کوچک‌تر (۱ و ۵ سال) پارامترهای بخش برف (degw و tlim) حساسیت



شکل ۳. نتایج تحلیل حساسیت به چهار روش Fast، Sobol، Regression و RSA در بازه زمانی ۱۰ ساله در زیرحوضه‌های الف) گاماسیاب، ب) قره‌سو، ج) کشکان، د) سیمره و ه) کل حوضه کرخه.



هرچند در بیشتر زیرحوضه‌ها سایر پارامترهای روال خاک (B و lp) و در روال پاسخ هم پارامتر perc حساسیت نشان داده‌اند. به‌طور کلی پارامترهای دو روال پاسخ و خاک حساسیت بیشتری نسبت به پارامترهای روال‌های برف و روندیابی نشان داده‌اند.

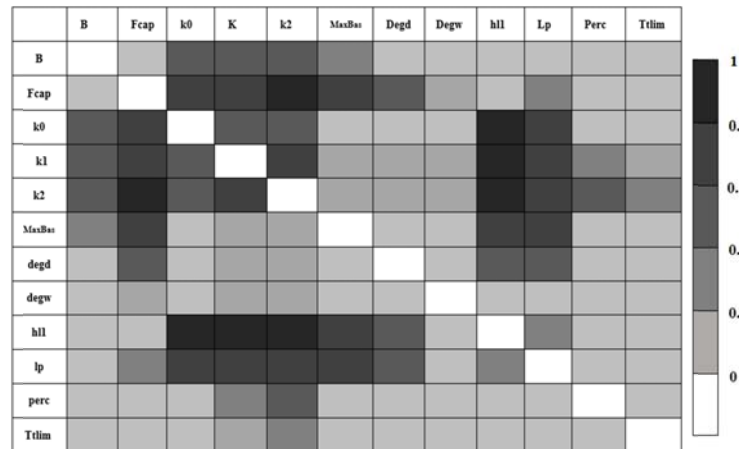
مطالعه حساسیت پارامترهای مدل در دوره‌های مختلف ممکن است منجر به ایجاد دو حالت متفاوت شود: ثبات پارامترها و یا تغییرات نسبی در دوره‌های مختلف. ثبات پارامترها نشان‌دهنده پایداری شرایط حوضه و عدم دخالت انسان در حوضه می‌باشد. در این مطالعه دوره واسنجی برای زیرحوضه‌ها و حوضه کرخه بازه زمانی است که تأثیر عوامل انسانی در آن کم است. بنابراین انتظار می‌رود که پارامترهای واسنجی در هر کدام از زیرحوضه‌ها در دوره‌های مختلف ثابت باشد. بیشترین ثبات در پارامترها برای زیرحوضه گاماسیاب اتفاق افتاد و در سایر زیرحوضه‌ها تغییرپذیری نسبی در حساسیت پارامترها وجود داشت. مطالعات نشان داده است که بین پارامترهای واسنجی در دوره‌های مختلف رابطه غیرمستقیم وجود دارد (مرز و بلاشل، ۲۰۰۴) ولی تغییرات در پوشش زمین و دخالت انسان می‌تواند بر رژیم‌های آب‌شناسی حوضه تأثیرگذار باشد (برونستر و همکاران، ۲۰۰۲).

یکی از بخش‌های مهم تحلیل حساسیت شناخت برهم‌کنش بین پارامترهاست. همانطور که در بخش روش کار اشاره شده است برهم‌کنش بین پارامترها با استفاده از روش Sobol قابل محاسبه است. برهم‌کنش بین پارامترها یکی از عوامل مهم برای واسنجی مدل می‌باشد. در بعضی موارد تغییرات کوچک در این پارامترها منجر به تغییرات شدیدی در نتایج مدل می‌شود. با شناسایی و تغییر مقادیر پارامترهایی که دو به دو برهم‌کنش دارند واسنجی مدل با صرف وقت کمتری انجام می‌شود. شکل ۴ برهم‌کنش‌های بین پارامترها در زیرحوضه قره‌سو را نشان می‌دهد. طبق شکل ۴ قوی‌ترین برهم‌کنش‌ها بین پارامترهای Fcap با K2 و K1، K0، h1l با K2 و K1 می‌باشد.

نتایج روش Sobol در زیرحوضه کشکان نشان می‌دهد در مقیاس زمانی ۱ و ۵ سال پارامترهای روال خاک و در مقیاس زمانی ۱۰ و ۲۵ سال پارامترهای h1l و Fcap حساسیت بیشتری دارند. در روش RSA در مقیاس‌های زمانی ۱، ۵ و ۱۰ سال پارامترهای بخش پاسخ (K0 و h1l) و در مقیاس زمانی ۲۵ سال پارامتر Fcap حساس‌ترین پارامترها هستند. در زیرحوضه سیمره در همه مقیاس‌های زمانی در روش Sobol پارامترهای حساس h1l و Fcap هستند. در روش RSA در مقیاس زمانی ۱ و ۵ سال پارامترهای h1l و B و در مقیاس زمانی ۱۰ سال پارامترهای K0 و B حساس‌ترین پارامترها هستند. در حوضه کرخه و در روش Sobol برای همه مقیاس‌های زمانی پارامترهای خاک حساسیت بیشتری نشان می‌دهند. همچنین در مقیاس زمانی ۵ و ۲۵ سال پارامتر h1l حساس است. در روش RSA در همه مقیاس‌های زمانی پارامترهای پاسخ (perc) و خاک (lp و Fcap) حساس‌ترینند.

اببی و همکاران (۲۰۱۰) حساسیت پارامترهای مدل HBV را برای حوضه Leaf River واقع در ایالات متحده طی سال‌های ۱۹۸۳-۱۹۷۲ با روش محلی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد دو گروه از پارامترها هستند که خطاهای مربوط به حجم رواناب و دبی بیشینه را کنترل می‌کنند. این پارامترها شامل Fcap، B و lp پارامترهای رطوبت خاک و اجزاء تبخیر-تعرق هستند که بر روی حجم جریان تأثیر دارند. گروه دوم پارامترهای K0، K1، h1l و MaxBas مربوط به روال پاسخ و روندیابی هستند که بر روی دبی‌های بیشینه تأثیر دارند.

یعقوبی و مساح بوانی (۱۳۹۳) تحلیل حساسیت مدل HBV را برای حوضه اعظم هرات- یزد در بازه زمانی ۲۰۰۶-۱۹۹۹ با روش محلی بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد پارامترهای h1l، MaxBas و B حساس‌ترین پارامترهای مدل HBV هستند. مطالعه حاضر در حوضه کرخه و زیرحوضه‌های آن پارامترهای h1l و Fcap را به‌عنوان پارامترهای حساس این مدل نشان داده است.



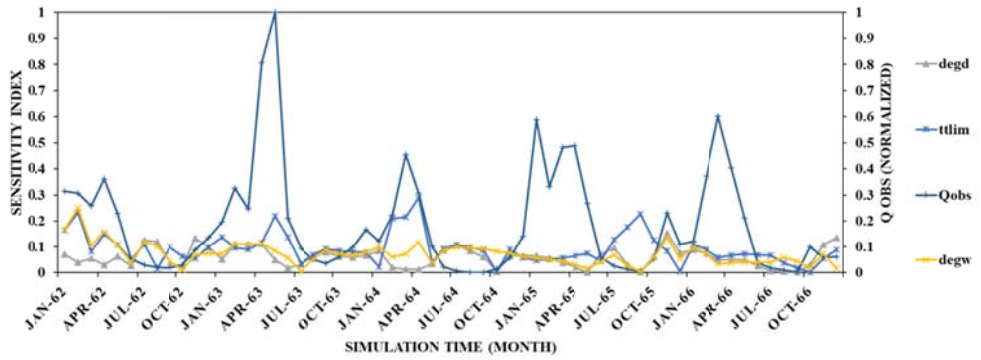
شکل ۴. برهم کنش بین پارامترها در تحلیل حساسیت به روش Sobolj در زیرحوضه قره‌سو دوره آماری ۱۹۶۲-۱۹۵۸ (رنگ تیره‌تر نشان‌دهنده برهم‌کنش قوی‌تر بین پارامترهاست).

### ۲-۳. تغییرات زمانی (Time-varying) حساسیت پارامترها

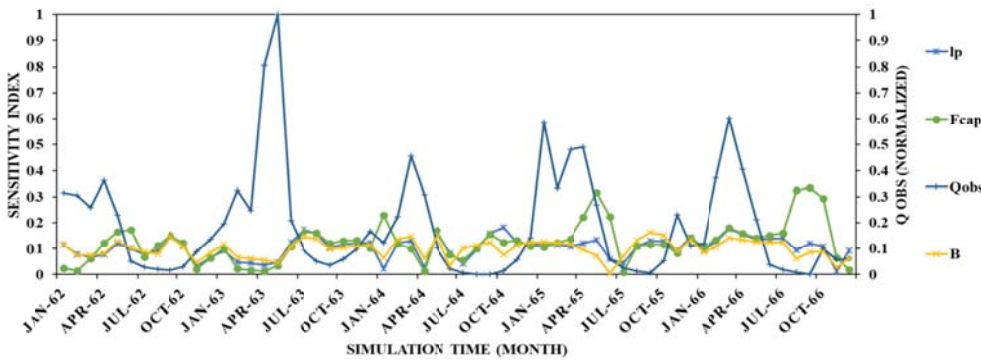
تغییرپذیری زمانی پارامترها طبق شکل ۵ برای حوضه کرخه در بازه زمانی ۵ سال از ژانویه ۱۹۶۲ تا دسامبر ۱۹۶۶ بررسی شده است. با توجه به کوهستانی بودن حوضه کرخه و وقوع بارش‌ها در ارتفاعات به شکل برف، پارامترهای روال برف برای قسمت‌های مرتفع حوضه به عنوان یک بخش مهم در ورودی مدل محسوب می‌شوند. در بین پارامترهای روال برف حساسیت پارامتر  $ttlim$  از بقیه پارامترها بیشتر است. پارامتر  $atlim$  آستانه دما برای فرآیند یخ‌زدگی بیشترین تغییرپذیری را دارد و در طی این دوره در ماه‌های فصل زمستان، بهار و پاییز حساسیت نشان داده است. پارامتر  $degd$  آهنگ ذوب برف بر اساس عامل درجه-روز در ماه‌های فصل تابستان و با بالا رفتن دما حساسیت بیشتری نشان داده است. پارامتر  $degw$  دمای پایه که در بالاتر از آن ذوب برف رخ می‌دهد، بیشترین حساسیت را در ماه‌های فصل بهار و تابستان مخصوصاً در اولین رخداد عمده ذوب برف در بهار نشان می‌دهد.

در روال خاک، پارامتر  $Fcap$  به عنوان ظرفیت ذخیره رطوبت خاک نسبت به  $B$  و  $lp$  تأثیر بیشتری بر نتایج مدل داشته است. با توجه به تأثیر  $Fcap$  بر  $Perc$  و انتقال ذخیره رطوبت خاک به آب زیرزمینی در زمانی‌هایی که خاک

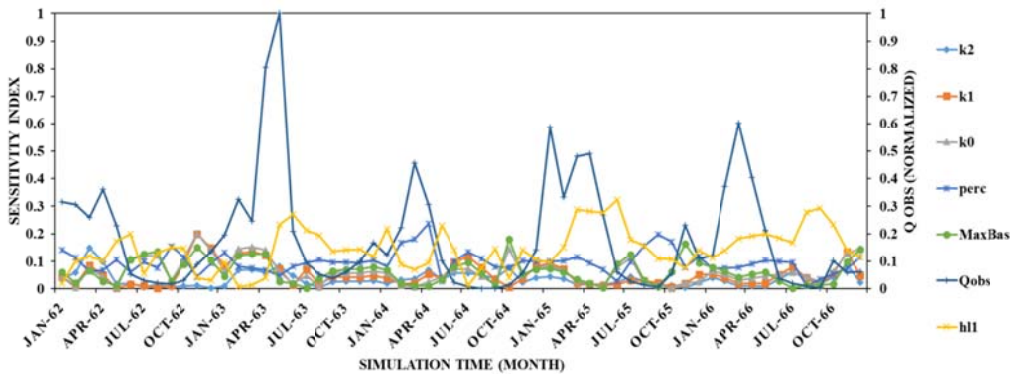
اشباع نشده است، و اینکه تأثیر  $Fcap$  در دوره‌های خشک بیشتر است زیرا در ماه‌های زمستان و اوایل بهار که بارندگی زیاد و خاک از نظر ذخیره رطوبتی تأمین است، نقش  $Fcap$  کم‌رنگ می‌شود و در دوره‌هایی که رطوبت خاک پایین‌تر از بیشینه ظرفیت خاک است این پارامتر حساس‌تر است. بنابراین بر اساس شرایط واقعی حوضه طبق شکل ۵-ج در ماه‌های خشک‌تر تأثیر پارامتر  $Perc$  بیشتر از ماه‌های مرطوب‌تر است. پارامتر  $p$  که کاهش تبخیر-تعرق پتانسیل را در خاک را شرح می‌دهد در فصول گرم‌تر حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. پارامتر  $B$  هم که نقش تقسیم بارش ورودی به رواناب و ذخیره رطوبت خاک را بر عهده دارد، مانند دو پارامتر دیگر روال خاک در ماه‌های خشک‌تر حساسیت بیشتری نشان داده است. در واقع حساسیت هر سه پارامتر روال خاک در زمان‌هایی که دبی بالا می‌رود و مخصوصاً در دبی بیشینه به شدت کاهش می‌یابد و بیشترین حساسیت را در شرایط دبی کمینه دارند. اوپانگ و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی تحلیل حساسیت پارامترهای مدل HBV را برای حوضه Pailugou چین در بازه زمانی ۲۰۱۰-۱۹۹۰ با روش RSA بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد پارامترهای  $Fcap$  و  $Perc$  حساس‌ترین پارامترها هستند هرچند حساسیت پارامترها در طول دوره‌های خشک و تر تغییر می‌کند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵. تغییرات زمانی ماهانه حساسیت پارامترها به روش Sobol در حوضه کرخه دوره آماری ۱۹۶۶-۱۹۶۲. الف) پارامترهای روال برف. ب) پارامترهای روال خاک. ج) پارامترهای روال پاسخ و روندیابی.

ماه‌های فصل پاییز و تابستان و در نقاطی که جریان کمینه رخ داده، حساسیت بیشتری نشان داده‌اند. با توجه وقوع بارش‌های عمده حوضه کرخه در فصل زمستان و بهار، رواناب سطحی سریع و نزدیک سطح در این دوره و مخصوصاً پس از بارندگی‌های شدید، بیشتر از رواناب کند رخ می‌دهد. نتایج مطالعه هرمان و همکاران (۲۰۱۳)

در بین پارامترهای روال پاسخ پارامتر hll مربوط به بیشینه ذخیره آب در لایه سطحی خاک بیشترین تأثیر را بر خروجی مدل داشته است. این پارامتر در ماه‌هایی که بارندگی در حوضه رخ نمی‌دهد و در شرایط جریان کمینه بیشترین حساسیت را نشان داده است. پارامترهای K0 و K1 مربوط به رواناب سریع سطحی و نزدیک سطح، در

ماه‌های فصل تابستان و پاییز که بارش‌ها در این حوضه کمتر است حساسیت بیشتری نشان داده است.

### ۳-۳. واسنجی مدل HBV با روش NSGA

بر اساس نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای مدل HBV در حوضه کرخه و زیرحوضه‌های آن، پارامترهای حساس برای هر زیرحوضه و دوره‌های زمانی مختلف تعیین شده است. واسنجی به روش الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب با توجه به نتایج تحلیل حساسیت صورت گرفته است. پارامترهای غیرحساس در یک مقدار ثابت نگه داشته شده‌اند. مقدار ثابت برای پارامتر غیرحساس براساس نتایج واسنجی اولیه مدل و توابع هدف ضرب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا به دست آمده است. سایر پارامترهای حساس در محدوده مورد نظر تعیین شده قرار گرفته‌اند. نتایج شبیه‌سازی در جدول ۳ آمده است. طبق جدول ۳ توابع هدف در دوره‌های زمانی کوتاه‌تر نتایج بهتری نشان داده‌اند. بهترین ضریب کارایی نش-ساتکلیف در همه زیرحوضه‌ها و حوضه کرخه به جز زیرحوضه سیمره مربوط به بازه زمانی یک سال است. توابع هدف RSR و RMSE هم در همه زیرحوضه‌ها به جز زیرحوضه سیمره و حوضه کرخه برای دوره آماری یک سال بهترین نتیجه را داشته‌اند. در بازه زمانی یک سال بهترین ضریب NSE، RSR و RMSE مربوط به زیرحوضه گاماسیاب به ترتیب به مقدار ۰/۹۵، ۰/۲۱ و ۱/۴ و بهترین BIAS مربوط به زیرحوضه کشکان و حوضه کرخه به مقدار ۰/۱۳ است.

شکل ۶ نتایج نمودار پراکندگی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای حوضه کرخه و زیرحوضه‌های آن را در بازه زمانی ۱۰ سال نشان می‌دهد. طبق شکل ۶ در حوضه کرخه و زیرحوضه‌های آن برای بیشتر نقاط داده‌های دبی خطای مدل خیلی کم است و بیشترین خطا (عدم قطعیت) در دبی بیشینه مخصوصاً در زیرحوضه‌های کشکان، قره سو و گاماسیاب مشاهده می‌شود. عدم قطعیت مربوط به دبی بیشینه در حوضه کرخه از زیرحوضه‌های

در بررسی حساسیت پارامترهای سه مدل آب‌شناسی Hymod، HBV و SAC-SMA برای ۱۲ حوضه در ایالات متحده طی سال‌های ۱۹۶۳-۱۹۷۲ نشان می‌دهد که پارامترهای غالب مدل به شدت به تغییرات زمانی شرایط هیدرواقلمی وابسته هستند. به طور کلی پارامترهای مربوط به فرآیندهای سطحی مانند تبخیر-تعرق و رواناب در شرایط خشک حساسیت بیشتری نشان می‌دهند. علاوه بر این حساسیت پارامترهای مدل به لحاظ تغییر شرایط آب‌شناسی به طور قابل توجهی تغییر خواهد کرد.

پارامتر Perc ارائه دهنده آهنگ بیشینه نفوذ عمیق از مخزن بالایی به مخزن پایینی آب زیرزمینی است، پارامتر حساس دیگر روال پاسخ است. تأثیر زیاد Perc بر نتایج مدل نشان‌دهنده اهمیت رواناب زیرزمینی کند در حوضه است. همانطور که قبلاً اشاره شد پارامتر Perc عموماً در نقاطی از نمودار که جریان کمینه رخ داده، حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. K2 پارامتر دیگری است که رواناب زیرزمینی کند را کنترل می‌کند. حساسیت این پارامتر از همه پارامترهای روال پاسخ کمتر است و بیشترین حساسیت آن در ماه‌های فصل زمستان و بهار مشاهده شده است. پارامترهایی که رواناب سریع را کنترل می‌کنند مربوط به بخش بالاروی آب‌نمود هستند و به ویژگی‌های حوضه و اقلیم، مانند شدت و مدت بارش، وابسته‌اند. بخش پایین‌روی آب‌نمود تحت تأثیر عواملی مانند زهکشی، تخلیه آب زیرزمینی و رواناب‌های زیرسطحی حوضه می‌باشد. شیب تغییرات ضریب رکود لایه سطحی خاک که رواناب سریع و بخش بالاروی آب‌نمود را کنترل می‌کند زیاد است. ضریب رکود لایه عمیق که رواناب کند را کنترل می‌کند کمترین شیب تغییرات را دارد.

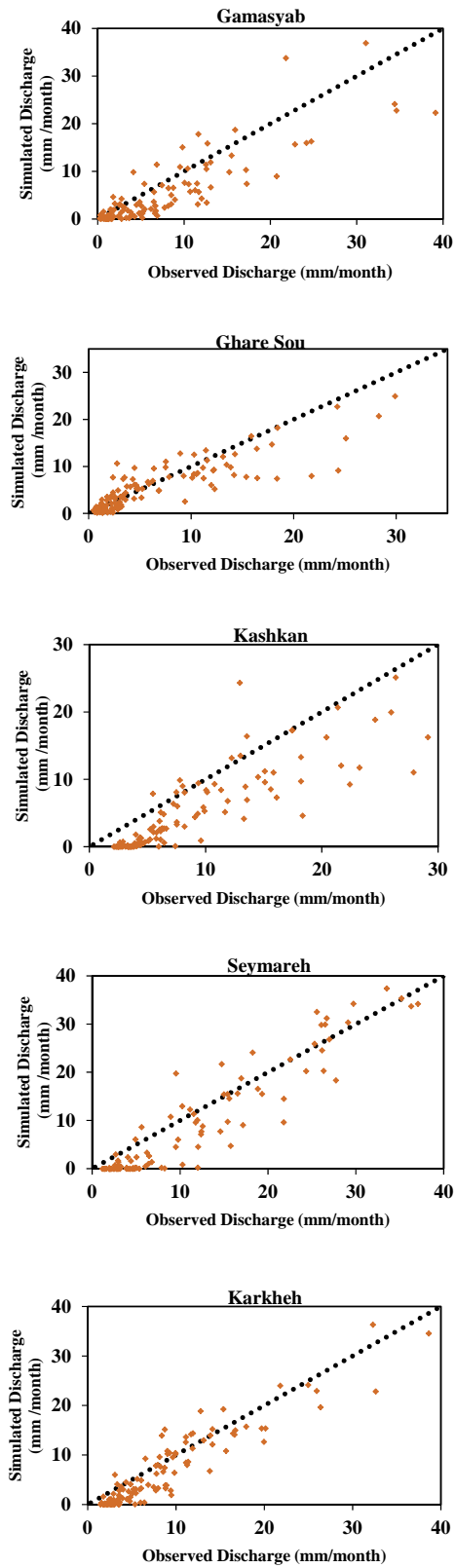
در انتقال آب‌نمود رواناب دو عامل تأخیر زمانی و کاهش رواناب به علت برداشت، تأثیر دارند. با توجه به اینکه فرض اولیه این پژوهش عدم دخالت عوامل انسانی بوده، تنها اثر عامل تأخیر زمانی بر پارامتر MaxBas در نظر گرفته شده است. این پارامتر در دوره‌های خشک و

واسنجی مدل HBV برای حوضه Jiangwan چین به این نتیجه رسیدند که انتخاب دوره‌های طولانی‌تر برای واسنجی مدل منجر به نتایج بهتری با توجه به مقادیر بهتر NSE و RE نسبت به دوره‌های کوتاه‌تر می‌شود و مخصوصاً جریان پیشینه را بهتر نشان می‌دهد. نتایج واسنجی مطالعه حاضر نشان می‌دهد دوره‌های کوتاه‌تر نتایج بهتری ارائه داده‌اند.

آن کمتر است که احتمالاً به علت وجود تعداد بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد. کمترین خطای دبی پایه در زیرحوضه قره‌سو و بیشترین خطا در زیرحوضه کشکان وجود دارد. مهم‌ترین عامل خطا در این حوضه می‌تواند ناشی از داده‌های ورودی به‌ویژه بارش روسلی و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه تحلیل حساسیت و

جدول ۳. مقادیر توابع هدف برای بررسی دبی شبیه‌سازی.

نام زیر حوضه/حوضه	دوره آماری	NSE	BIAS	RMSE	RSR
زیرحوضه گاماسیاب	۱۹۵۶	۰,۹۵	۰,۱۵	۱,۴	۰,۲۱
	۱۹۵۶-۱۹۶۰	۰,۷۳	۰,۲۵	۴,۵	۰,۵۲
	۱۹۵۶-۱۹۶۵	۰,۶۷	۰,۳	۴,۳۵	۰,۵۶
	۱۹۵۶-۱۹۸۰	۰,۷۳	۰,۲۲	۵,۶	۰,۵۱
زیرحوضه قره سو	۱۹۵۸	۰,۹۱	۰,۱۹	۲,۱	۰,۳
	۱۹۵۸-۱۹۶۲	۰,۸	۰,۲۳	۲,۹	۰,۴۴
	۱۹۵۸-۱۹۶۷	۰,۷۵	۰,۱۲	۳,۵	۰,۴۹
	۱۹۵۸-۱۹۸۲	۰,۷۶	۰,۰۱	۷,۷۵	۰,۴۸
زیرحوضه کشکان	۱۹۵۷	۰,۹۴	۰,۱۳	۳,۳۴	۰,۲۲
	۱۹۵۷-۱۹۶۱	۰,۷۳	۰,۳۴	۴,۸	۰,۵۱
	۱۹۵۷-۱۹۶۶	۰,۶۴	۰,۳۹	۵,۰۲	۰,۵۹
	۱۹۵۷-۱۹۸۱	۰,۷۷	۰,۲۳	۵,۸	۰,۴۸
زیرحوضه سیمره	۱۹۸۷	۰,۸	۰,۲۴	۷,۸	۰,۴۴
	۱۹۸۷-۱۹۹۱	۰,۸۴	۰,۱۴	۶,۷	۰,۳۹
	۱۹۸۷-۱۹۹۶	۰,۸۷	۰,۱۵	۶,۷	۰,۳۵
حوضه کرخه	۱۹۶۲	۰,۸۱	۰,۱۳	۵,۱۹	۰,۶۱
	۱۹۶۲-۱۹۶۶	۰,۷۵	۰,۱۳	۳,۱۱	۰,۴۹
	۱۹۶۲-۱۹۷۱	۰,۸	۰,۱۲	۴,۷۴	۰,۴۴
	۱۹۶۲-۱۹۸۰	۰,۷۵	۰,۰۹	۵,۸۶	۰,۴۹



شکل ۶. مقایسه دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده برای حوضه کرخه و زیرحوضه‌های آن در دوره آماری ۱۰ سال.

## ۴. نتیجه گیری

در این مطالعه با هدف ارزیابی عملکرد مدل مفهومی HBV برای حوضه کرخه و زیرحوضه‌های آن، تحلیل حساسیت پارامترهای مدل با چهار روش تحلیل حساسیت کلی در ۴ بازه زمانی مختلف انجام شده است. روش‌های تحلیل حساسیت کلی شامل Fast، RSA، Sobol و رگرسیون برای تعیین پارامترهای حساس و شناسایی پارامترها با هم مقایسه شده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد روش‌های Sobol و RSA به علت تغییرپذیری در بازه‌های زمانی و زیرحوضه‌های مختلف روش‌های مطمئن‌تری برای تعیین حساس‌ترین پارامترها هستند و در این مطالعه از نتایج آن‌ها برای شناسایی و تعیین حساس‌ترین پارامترها در حوضه کرخه و زیرحوضه‌های آن استفاده شده است. روش‌های Fast و رگرسیون در حوضه کرخه و زیرحوضه‌های آن و دوره‌های زمانی متفاوت نتایج را مشابه نشان می‌دهند که با توجه به تغییر شرایط هیدرواقليمی در این حوضه عملی نیست و نمی‌توان از نتایج این روش‌ها برای بررسی حساسیت پارامترها و شناسایی آن‌ها در حوضه مورد مطالعه استفاده کرد.

برای یک زیرحوضه مشخص حساسیت پارامترها در دوره‌های زمانی مختلف کاملاً پایدار نبوده و تغییرپذیری کمی در دوره‌های مختلف مشاهده شده است. اما حساس‌ترین پارامترها (h11 و Fcap) تقریباً در همه بازه‌های زمانی پایداری خود را حفظ کرده‌اند. پارامترهای روال‌های پاسخ و خاک حساسیت بیشتری نسبت به پارامترهای روال‌های برف و روندیابی نشان داده‌اند. پارامترهای روال برف در دو زیرحوضه قره‌سو و کشکان تنها در بازه زمانی کوتاه‌مدت حساسیت نشان داده‌اند.

نتایج برهم کنش بین پارامترها با استفاده از روش Sobol

resources of Hindukush-Karakorum-Himalaya region under different glacier coverage scenarios, Journal of hydrology, 355(1), 148-163.

Ascough II, J. C., Green, T. R., Fischer, C., Kralisch, S., Lighthart, N. and David, O., 2015, The Model Optimization, Uncertainty,

در زیرحوضه‌های مختلف نشان می‌دهد قوی‌ترین برهم کنش‌ها بین پارامترهای روال خاک به ویژه Fcap با پارامترهای روال پاسخ و همچنین پارامترهای روال پاسخ با همدیگر است.

تغییرپذیری زمانی پارامترها نشان می‌دهد که پارامترهای روال خاک و پاسخ در دبی‌های کمینه بیشترین حساسیت را نشان می‌دهند. سایر پارامترها هم بیشتر در فصول خشک حوضه (تابستان و پاییز) حساسیت نشان داده‌اند. مدل HBV توانایی شبیه‌سازی رواناب در حوضه کرخه و زیرحوضه‌های آن با دقت بالا دارد. در بازه زمانی ۱ و ۵ سال نتایج شبیه‌سازی بهتر از سایر بازه‌های زمانی است. یافته‌ها نشان می‌دهد توابع هدف در دوره‌های زمانی کوتاه‌تر نتایج بهتری نشان داده‌اند. بهترین ضریب کارایی نش-ساتکلیف در همه زیرحوضه‌ها و حوضه کرخه به جز زیرحوضه سیمره مربوط به بازه زمانی یک سال بوده است. توابع هدف RSR و RMSE هم در همه زیرحوضه‌ها به جز زیرحوضه سیمره و حوضه کرخه برای دوره آماری یک سال بهترین نتیجه را ارائه داده‌اند. در بازه زمانی یک سال بهترین ضریب NSE، RSR و RMSE مربوط به زیرحوضه گاماسیاب به ترتیب به مقدار ۰/۹۵، ۰/۲۱ و ۱/۴ و بهترین BIAS مربوط به زیرحوضه کشکان و حوضه کرخه به مقدار ۰/۱۳ است.

## مراجع

یعقوبی، م. و مساح بوانی، ع.، ۱۳۹۳، تحلیل حساسیت و مقایسه عملکرد سه مدل مفهومی HBV، IHARCES و HEC-HMS در شبیه‌سازی بارش-رواناب پیوسته در حوضه‌های نیمه‌خشک (بررسی موردی: حوضه اعظم هرات-یزد)، مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۰ (۲)، ۱۷۲-۱۵۳.

Abebe, N. A., Ogden, F. L. and Pradhan, N. R., 2010, Sensitivity and uncertainty analysis of the conceptual HBV rainfall-runoff model: Implications for parameter estimation, Journal of Hydrology, 389(3), 301-310.

Akhtar, M., Ahmad, N. and Booi, M., 2008, The impact of climate change on the water

- and Sensitivity analysis (MOUSE) toolbox: overview and application Annual Hydrology Days Conference Proceedings, March 23-25, Fort Collins, Colorado, Colorado State University, 17-28.
- Baroni, G. and Tarantola, S., 2014, A General Probabilistic Framework for uncertainty and global sensitivity analysis of deterministic models: A hydrological case study. *Environmental Modelling & Software*, 51, 26-34.
- Bennett, D. A., Wade, G. A. and Armstrong, M. P., 1999, Exploring the solution space of semi-structured geographical problems using genetic algorithms, *Transactions in GIS*, 3(1), 51-71.
- Bergstrom, S., 1995, The HBV model. *Computer models of watershed hydrology*.
- Beven, K. and Binley, A., 1992, The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, *Hydrological processes*, 6(3), 279-298.
- Bronstert, A., Niehoff, D. and Bürger, G., 2002, Effects of climate and land use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities, *Hydrological processes*, 16(2), 509-529.
- Coello, C. C., Lamont, G. B. and Van Veldhuizen, D. A., 2007, *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*, Springer Science & Business Media.
- Driessen, T. L. A., Hurkmans, R. T. W. L., Terink, W., Hazenberg, P., Torfs, P. J. J. F. and Uijlenhoet, R., 2010, The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modelled by the HBV model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14: 651-665.
- Fischer, C., Kralisch, S. and Flügel, W., 2012, An integrated, fast and easily useable software toolbox which allows comparative and complementary application of various parameter sensitivity analysis methods, Proc. International Congress on Environ, Modell. & Soft., Sixth Biennial Meeting. Leipzig, Germany.
- Gan, Y., Duan, Q., Gong, W., Tong, C., Sun, Y., Chu, W., Ye, A., Miao C. and Di, Z. 2014, "A comprehensive evaluation of various sensitivity analysis methods: A case study with a hydrological model ".*Environmental modelling & software*. 51, 269-285.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S. and Yapo, P. O., 1999, Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration, *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135-143.
- Hamby, D., 1994, A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models, *Environmental monitoring and assessment*, 32(2), 135-154.
- Helton, J.C. and Davis, F., 2002, Illustration of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis, *Risk analysis*, 22(3), 591-622.
- Herman, J., Reed, P. and Wagener, T., 2013, Time-varying sensitivity analysis clarifies the effects of watershed model formulation on model behavior, *Water Resources Research*, 49(3), 1400-1414.
- Hornberger, G. M. and Spear, R. C., 1981, Approach to the preliminary analysis of environmental systems, *J. Environ. Mgmt.*, 12(1), 7-18.
- Massmann, C. and Holzmann, H., 2012, Analysis of the behavior of a rainfall-runoff model using three global sensitivity analysis methods evaluated at different temporal scales, *Journal of Hydrology*, 475, 97-110.
- Merz, R. and Blöschl, G., 2004, Regionalisation of catchment model parameters, *Journal of hydrology*, 287(1), 95-123.
- Moradkhani, H. and Sorooshian, S., 2008, General review of rainfall-runoff modeling: model calibration, data assimilation, and uncertainty analysis, *Hydrological modelling and the water cycle*, 1-24.
- Moriasi, D. N., Arnold, G. J., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. and Veith, T. L., 2007, Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Muleta, M. K. and Nicklow, J. W., 2005, Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model, *Journal of Hydrology*, 306(1), 127-145.
- Nützman, G. and Mey, S., 2007, Model-based estimation of runoff changes in a small lowland watershed of north-eastern Germany, *Journal of Hydrology*, 334(3), 467-476.
- Ouyang, S., Puhmann, H., Wang, S., von Wilpert, K. and Sun, O. J., 2014, Parameter uncertainty and identifiability of a conceptual semi-distributed model to simulate hydrological processes in a small headwater catchment in Northwest China, *Ecological Processes*, 3, 14, <https://doi.org/10.1186/s13717-014-0014-9>.
- Pappenberger, F., Beven, K. J., Ratto, M. and Matgen, P., 2008, Multi-method global sensitivity analysis of flood inundation models, *Advances in water resources*, 31(1), 1-14.
- Razavi, S., Tolson, B. A. and Burn, D. H., 2012, Review of surrogate modeling in water



- resources, *Water Resources Research*, 48, W07401.
- Rusli, S.R., Yudianto, D. and Liu, J.-t., 2015, Effects of temporal variability on HBV model calibration, *Water Science and Engineering*, 8(4), 291-300.
- Saltelli, A., 2002, Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices, *Computer Physics Communications*, 145(2), 280-297.
- Saltelli, A., Ratto, M., Tarantola, S. and Campolongo, F., 2012, Update 1 of: Sensitivity analysis for chemical models, *Chemical Reviews*, 112(5), PR1-PR21.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F. and Ratto, M., 2004, Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models, John Wiley & Sons.
- Saltelli, A., Tarantola, S. and Chan, K.-S., 1999, A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output, *Technometrics*, 41(1), 39-56.
- Seibert, J. and Vis, M., 2012, Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3315-3325.
- Sobol, I. M., 2001, Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates, *Mathematics and computers in simulation*, 55(1), 271-280.
- Song, X., Zhan, C., Xia, J. and Zhang, Y., 2014, Methodology and application of parameter uncertainty quantification in watershed hydrological models, China Water Power Press, Beijing.
- Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M. and Xu, C., 2015, Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of hydrology*, 523, 739-757.
- Spear, R. and Hornberger, G., 1980, Eutrophication in Peel Inlet—II. Identification of critical uncertainties via generalized sensitivity analysis, *Water Research*, 14(1), 43-49.
- Tang, T., Reed, P., Wagener, T. and Van Werkhoven, K., 2007, Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3(6), 3333-3395.
- Uhlenbrook, S., Seibert, J., Leibundgut, C. and Rodhe, A., 1999, Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure, *Hydrological Sciences Journal*, 44(5), 779-797.
- Van Pelt, S., Kabat, P., Ter Maat, H., Van den Hurk, B. and Weerts, A., 2009, Discharge simulations performed with a hydrological model using bias corrected regional climate model input, *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(12), 2387-2397.
- Vis, M., Knight, R., Pool, S., Wolfe, W. and Seibert, J., 2015, Model calibration criteria for estimating ecological flow characteristics, *Water*, 7(5), 2358-2381.
- Wang, S., McGrath, R., Semmler, T., Sweeney, C. and Nolan, P., 2006, The impact of the climate change on discharge of Suir River Catchment (Ireland) under different climate scenarios, *Natural Hazards and Earth System Science*, 6(3), 387-395.
- Yang, J., 2011, Convergence and uncertainty analyses in Monte-Carlo based sensitivity analysis, *Environmental Modelling & Software*, 26(4), 444-457.
- Ye, M., Meyer, P. D. and Neuman, S. P., 2008, On model selection criteria in multimodel analysis, *Water Resources Research*, 44, W03428.
- Zhan, C.-S., Song, X.-M., Xia, J. and Tong, C., 2013, An efficient integrated approach for global sensitivity analysis of hydrological model parameters, *Environmental Modelling & Software*, 41, 39-52.
- Zhang, A., Zhang, C., Fu, G., Wang, B., Bao, Z. and Zheng, H., 2012, "Assessments of impacts of climate change and human activities on runoff with SWAT for the Huifua River Basin, Northeast China". *Water resources management* 26(8), 2199-2217.

## Comparison of four Sensitivity Analysis Methods of HBV Conceptual Model Parameters in Karkheh Basin and its Sub-basins

Shafiei, M.<sup>1</sup>, Bazrafshan, J.<sup>2\*</sup> and Irannejad, P.<sup>3</sup>

1. Ph.D. Graduated, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Natural Resources and Agricultural Campus, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Natural Resources and Agricultural Campus, University of Tehran, Karaj, Iran

3. Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 26 Feb 2018, Accepted: 1 Jan 2019)

### Summary

The HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) is a conceptual model widely used for hydrological forecasting and water resource studies. In this study, sensitivity analysis of parameters of the HBV model is investigated for Karkhe basin and its sub-basins for four different periods 1, 5, 10 and 25 years with four methods including FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test), RSA (Regional Sensitivity Analysis), Sobol and regression. After determining the most sensitive parameters, the model is calibrated using Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) method. In all statistical periods, one year has been used for warm-up to eliminate the effects of initial conditions. In this study, the MOUSE Toolbox is used to analyze the sensitivity of the HBV model parameters. This software is based on Java programming language. To analyze the sensitivity of the HBV model parameters based on the Monte Carlo sampling method and the Halton sequence method for each of the samples (time periods) in each sub-basin separately, 1000 samples are taken for the set of input parameters with a specified range for each parameter taken. Objective functions for evaluating performance of model are NSE, RMSE, RSR and BIAS. The results of sensitivity analysis of the parameters show that Sobol and RSA are more reliable methods because of variability in time intervals and different sub-basins. Fast and regression methods in the Karkheh basin and its sub-basins for different time periods show similar results that considering the change in hydroclimate conditions in this basin, isn't practical and the results of these methods can not be used for investigating sensitivity of parameters and their identification in the studied basin. The most sensitive parameters of HBV model for Karkheh basin and its sub-basins in soil routine is maximum soil moisture content (Fcap) and in the response routine is the storage of soil surface moisture content (h1). These parameters have shown the most sensitive factor in minimum fluxes. The snow routine parameters, especially the threshold temperature for ice freezing (tlim), are sensitive in the sub-basins of Ghare Sou and Kashkan in short periods (1 and 5 years). For a specific sub-basin, the sensitivity of the parameters in different time periods is not completely stable and a little variability has been observed in different periods. But the most sensitive parameters (h1 and fcap) have maintained their sustainability almost in all periods. Parameters of response and soil routines are more sensitive to the parameters of snow and routing routines. The results of the interaction between the parameters using the Sobol method in different sub-basins indicate that the strongest interactions are between the soil routine parameters, especially Fcap, with the response routine parameters and also the response routine parameters with each other. The time variability of parameters indicates that the soil routine and response parameters in the minimum discharge show the most sensitivity. Other parameters are more sensitive in the dry season of the basin (summer and autumn). The HBV model has the ability to simulate runoff in the Karkhe basin and its sub-basins with high precision. This study shows that selection of shorter period of calibration gives better simulation results. For one year's period the best NSE, RSR and RMSE are in Gamasyab sub-basin respectively 0.95, 0.21 and 1.4 and the best BIAS is in Kashkan sub-basin and Karkhe basin with 0.13.

**Keywords:** HBV conceptual model, sensitivity analysis, calibration, Karkhe basin.

\* Corresponding author:

jbazr@ut.ac.ir