

شبیه‌سازی جریان روزانه حوضه آبریز در شرایط کمبود داده

محمد رضا خزائی^۱

m_r_khazae@yahoo.com

باقر ذهبیون^۲

بهرام ثقفیان^۳

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۸۸/۵/۲

چکیده

زمینه و هدف: شبیه‌سازی بارش- رواناب از محورهای اصلی هیدرولوژی علمی و مدیریت محیط زیست است. بنابراین محققان، پیوسته علاقه‌مند به یافتن روش‌های جدید برای این مسأله و اصلاح مدل‌ها یا روش‌های مدل‌سازی موجود هستند.

روش بررسی: در این تحقیق، جریان روزانه رودخانه در خروجی یک حوضه آبریز در جنوب غربی ایران، با استفاده از یک مدل بارش- رواناب پیوسته مفهومی شبیه‌سازی شد. در مواجهه با مشکل کفایت آمار حوضه، با استفاده از یک رهیافت ویژه نسبت به آماده‌سازی متغیرهای مورد نیاز مدل از قبیل جریان رواناب، بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه اقدام شد.

یافته‌ها: در مرحله واسنجی مدل، شاخص بازده برای داده‌های روزانه معادل $0/80$ و ضریب تعیین برابر $0/82$ به دست آمد. در مرحله اعتبارسنجی نیز مقادیر شاخص بازده برابر $0/82$ و ضریب تعیین برابر $0/83$ به دست آمد. ضمن آن که آماره‌های جریان مشاهداتی نیز با تقریب خوب در جریان شبیه‌سازی شده حفظ شد.

بحث و نتیجه‌گیری: نتایج حاکی از موفقیت این رهیافت برای شبیه‌سازی جریان روزانه با به کارگیری این مدل در شرایط کمبود داده است.

واژه‌های کلیدی: مدل پیوسته، بارش-رواناب، جریان روزانه، ARNO، تبخیر و تعرق پتانسیل.

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، ایران.

۲- استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استاد، دانشکده فنی مهندسی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی

مقدمه

شبیه‌سازی رایانه‌ای بارش- رواناب از اوایل دهه ۱۹۶۰ شروع شده است (۱) و هم اکنون یک فن‌آوری مهم برای مدیریت منابع آب و طراحی هیدرولوژیکی محسوب می‌شود (۲). شبیه‌سازی بارش- رواناب همچنین از محورهای اصلی هیدرولوژی علمی و مدیریت محیط زیست است. بنابراین محققان پیوسته علاقه‌مند به یافتن روش‌های جدید اصلاح مدل‌ها یا روش‌های مدل‌سازی موجود هستند (۳). به عنوان نمونه می‌توان به Boughton (۲۰۰۶)، Croke و همکاران (۲۰۰۶)، و Lin و Wang (۲۰۰۷) اشاره کرد. هم اکنون مدل‌های مختلفی برای استفاده وجود دارد. در صورت استفاده از داده‌های با کیفیت مناسب، هر یک از مدل‌های پیشرفته خوب نتایج خوبی خواهند داد. اما در صورتی که کیفیت داده‌ها مناسب نباشد، هیچ یک از این مدل‌ها نتایج خوبی نمی‌دهند. به عبارت دیگر، نتایج شبیه‌سازی بارش- رواناب، بیش‌تر از نوع مدل، به کیفیت داده‌های ورودی وابسته است (۲). به عنوان نمونه Nathan و McMahon (۱۹۹۹، a و b) مدل SFB را برای ۱۶۸ حوضه در استرالیا واسنجی^۱ کردند. ایشان مدل را در صورت استفاده از داده‌های با کیفیت، قدرتمند معرفی کردند، اما به علت مشکل کیفیت داده‌های ورودی (بارش و تبخیر و تعرق) در ۲۷٪ از موارد شبیه‌سازی بسیار ضعیف و غیر قابل استفاده معرفی شد. همچنین Boughton و Chiew (۲۰۰۳) مدل AWBM را بر داده‌های بارش و رواناب ۳۳۱ حوضه در استرالیا واسنجی کردند. در این مورد واسنجی تنها در ۲۲۱ حوضه قابل قبول انجام یافت. ایشان مشکل داده‌ها را علت رضایت بخش نبودن واسنجی در ۳۳٪ از حوضه‌ها گزارش کردند. لذا لازم است در شبیه‌سازی بارش- رواناب به کیفیت داده‌های ورودی مدل بیش‌تر توجه شود. این موضوع به معنای سرزنش اولیای امور تدارک داده‌ها نیست. بلکه این نشان می‌دهد که به دست آوردن داده‌های ورودی با کیفیت کافی که بتواند بیلان آبی حوضه آبریز را مدل کند، چقدر مشکل است.

Boughton (۲۰۰۶) به منظور بهبود نتایج مدل‌های بارش- رواناب در زمانی که کیفیت داده‌ها خوب نیست، به اصلاح واسنجی ۱۱۰ (۳۳٪ از ۳۳۱ حوضه) حوضه ناموفق مطالعه Boughton و Chiew (۲۰۰۳) پرداخت. وی با به کارگیری روش‌هایی از جمله اعمال ضریب مقیاس به سری داده‌های بارش و تبخیر و تعرق و حذف ماه‌های معدود با خطای زیاد از واسنجی، موفق شد ۶۸ حوضه را در حد قابل قبول واسنجی کند. ۸٪ از ۳۳۱ حوضه به علت کمبود اطلاعات واسنجی نشد و در نهایت، ۴٪ حوضه‌ها به علت کیفیت پایین داده واسنجی نشد. اصلاح داده‌ها با اعمال ضریب مقیاس به سری داده‌های بارش حاکی از دشواری اندازه‌گیری بارش در سطح حوضه‌های با مساحت چند صد کیلومتر مربع و همچنین مشکل تعمیم مکانی بارش (تخمین بارش سطح حوضه) است. این موضوع در خصوص تبخیر و تعرق نیز صادق است. بهبود داده‌های تبخیر و تعرق، همچنین می‌تواند به روش تخمین آن مربوط باشد (۲).

در این تحقیق، جریان روزانه رودخانه در خروجی حوضه پاتاوه، از زیر حوضه‌های کارون، با استفاده از یک مدل بارش- رواناب پیوسته مفهومی شبیه‌سازی شده است. لیکن به علت وجود مشکل کفایت آمار حوضه، توجه ویژه به آماده‌سازی داده‌های ورودی مدل معطوف شده است.

مواد و روش‌ها

۱. مدل بارش- رواناب

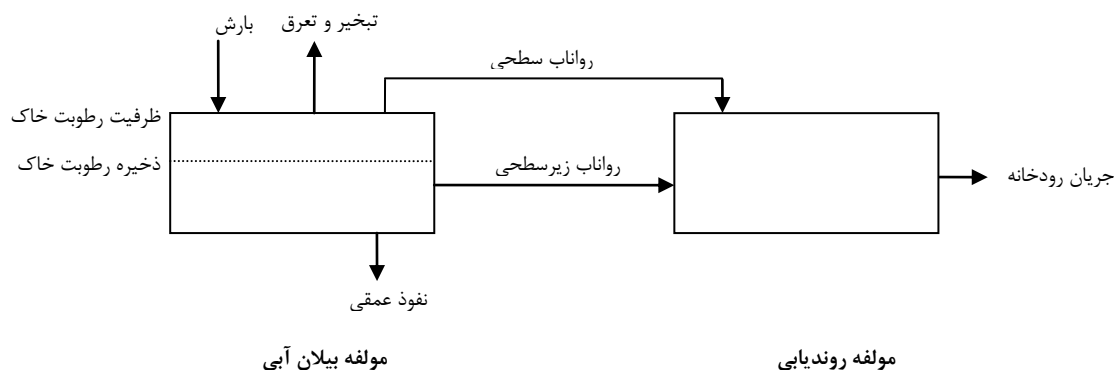
مدل بارش- رواناب مورد استفاده مدل ARNO است. ARNO یک مدل پیوسته نیمه توزیعی بارش- رواناب است که به صورت گسترده‌ای در مطالعاتی همچون برنامه‌ریزی آب، تحلیل جریان‌های کم، تحلیل سیل‌های حدی، پیش‌بینی زمان واقعی سیل و مطالعات اثرات تغییر اقلیم در مناطق مختلف دنیا مورد استفاده قرار گرفته است (۹ و ۱۰).

این مدل دارای دو مؤلفه جدا از هم است: مؤلفه بیلان آبی یا تابع تولید رواناب که تعادل آبی را بین مقدار آب در خاک، ریزش (ورودی آب)، تبخیر و تعرق و رواناب (خروجی

آب) تشریح می‌کند و مؤلفه روندیابی که انتقال رواناب را به خروجی حوضه مدل می‌نماید.

مؤلفه اول رابطه بین بارش - رواناب را تعریف می‌کند. در این جا مهم‌ترین مساله مفهوم تشکیل رواناب است که در آن تولید رواناب تا تامین مقدار رطوبت منطقه خاک تا حد ظرفیت مزرعه^۱ آن به تعویق می‌افتد. نکته مهم در این مدل این است که این مفهوم در حد کوچک‌ترین مساحت حوضه یا سطح جزء^۲ اعمال می‌گردد. توزیع مکانی ظرفیت اشباع خاک به عنوان یک متغیر مکانی در داخل حوضه به توسط یک تابع توزیع تبیین می‌شود. مؤلفه دوم نیز بیان کننده روشی است که رواناب ایجاد شده را جمع آوری نموده و در طول شیب‌های تپه‌ها به سمت کانال‌های زهکش و در نهایت از طریق شبکه کانال‌ها به سمت خروجی حوضه منتقل می‌نماید.

فرآیندهای اصلی که در مدل ARNO در نظر گرفته می‌شوند عبارتند از: موازنه رطوبت خاک، زهکشی به عنوان یک تابع غیر خطی از رطوبت خاک، نفوذ عمقی، تبخیر و تعرق، روندیابی روی سطحی و روندیابی رودخانه. ارتباط شماتیک این فرایندها در شکل ۱ آمده است.



مؤلفه بیلان آبی

مؤلفه روندیابی

شکل ۱ - نمایش کلی مؤلفه‌های مدل ARNO

واسنجی^۱ برآورد شوند. این مدل در گام زمانی روزانه شبیه‌سازی می‌کند. داده‌های مورد نیاز مدل، داده‌های اقلیمی بارش روزانه، تبخیر و تعرق پتانسیل و مشخصات حوضه از جمله مساحت، کاربری اراضی و شیب متوسط است. داده‌های جریان روزانه رودخانه نیز در خروجی حوضه برای واسنجی مدل مورد نیاز است. همچنین، باید دوره زمانی سری‌های جریان با داده‌های اقلیمی مطابقت داشته باشد.

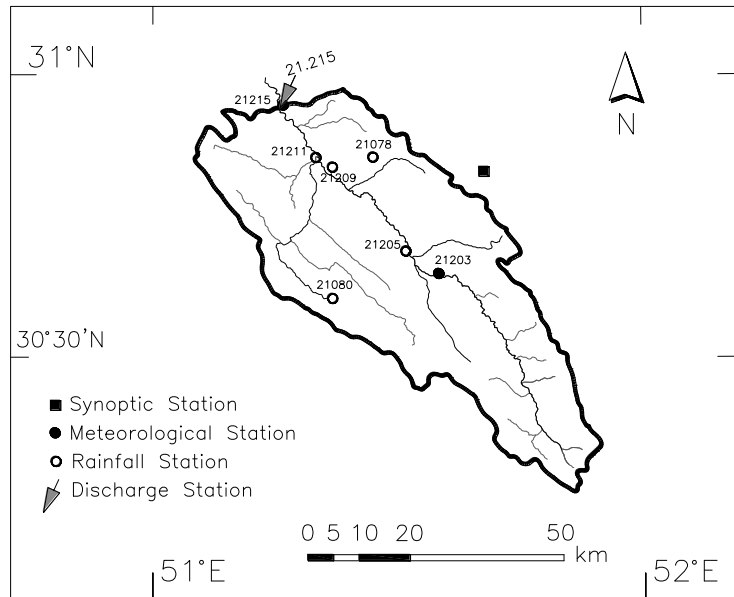
۲- حوضه تحقیق

حوضه مورد مطالعه، حوضه رودخانه بشار از سرشاخه‌های رودخانه کارون در محل ایستگاه پاتاوه است. این حوضه در محدوده جغرافیایی 51° تا 52° طول شرقی و 30° تا 31° عرض شمالی در جنوب غربی ایران واقع است. مساحت حوضه 2800 کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط آن 2277 متر از سطح دریا است. موقعیت جغرافیایی و ایستگاه‌های اندازه‌گیری حوضه در شکل ۲ ارائه شده است.

برای آماده‌سازی مدل بارش-رواناب لازم است از داده‌های با کیفیت مناسب استفاده شود. وجود خطا در داده‌های اقلیمی ورودی مدل می‌تواند از عوامل مهم خطا در پارامترهای تخمینی مدل و جریان شبیه‌سازی شده باشد. در این مطالعه قبل از تخمین پارامترهای مدل و شبیه‌سازی جریان، توجه ویژه به بررسی و آماده‌سازی داده‌های ورودی مدل معطوف شد.

فرضیات مبنای مؤلفه تعادل رطوبت خاک در این مدل به شرح زیر است:

- بارندگی که به خاک وارد می‌شود به صورت یکنواخت بر سطح حوضه در نظر گرفته می‌شود.
 - حوضه از عناصر نامحدودی تشکیل شده است که برای هر کدام می‌توان موازنه جرمی را نوشت.
 - تمام بارندگی که بر سطح حوضه نازل می‌شود در حوضه نفوذ می‌کند به غیر از نواحی نفوذ ناپذیر و نواحی که اشباع شده است. نسبت نواحی اشباع شده در هر زمان توسط یک تابع توزیع مکانی معلوم می‌شود. این تابع، دینامیک مشارکت نواحی را در تولید رواناب سطحی تشریح می‌نماید.
 - رواناب حوضه از انتگرال مکانی رواناب مساحت‌های جزئی حوضه به دست می‌آید.
 - ذخیره رطوبت خاک با تبخیر و تعرق، جریان زیر سطحی تأخیری (زهکشی) که به شبکه زهکشی رودخانه می‌ریزد، و نفوذ عمقی به لایه‌های زیرین تخلیه می‌شود.
 - زهکشی و نفوذ عمقی توسط روابط ساده تجربی تشریح می‌شوند.
- مؤلفه تعادل رطوبت خاک ARNO دارای ۸ پارامتر است که باید برای استفاده در هر حوضه خاص ابتدا از طریق



شکل ۲ - موقعیت حوضه تا ایستگاه پاتاوه و مکان ایستگاه‌های آب‌سنجی و هواشناسی موجود.

۳- بارش

سنجش کیفیت داده‌های بارش ایستگاه تبخیرسنجی یاسوج، از داده‌های ایستگاه سینوپتیک یاسوج، در سال‌های آماری مشترک استفاده شد. بارش ایستگاه تبخیرسنجی یاسوج همبستگی مناسبی با بارش ایستگاه سینوپتیک یاسوج دارد.

۴- تبخیر و تعرق پتانسیل

آمار اقلیمی حوضه پاتاوه تنها مربوط به دو ایستگاه تبخیرسنجی یاسوج (۲۰۳-۲۱) و ایستگاه سینوپتیک یاسوج است. این دو ایستگاه از موقعیت جغرافیایی و تراز ارتفاعی نزدیک به هم و شرایط اقلیمی مشابه برخوردارند. مشخصات این دو ایستگاه در جدول ۱ با هم مقایسه شده است.

ایستگاه‌های باران‌سنجی و هواشناسی حوضه و نواحی اطراف حوضه برای تخمین بارش حوضه در شکل ۲ نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی بهتر جریان رودخانه، باید از داده‌های معتبر بارش که نماینده کل حوضه باشد، استفاده شود. روش‌های مختلفی برای تخمین بارندگی در سطح حوضه با استفاده از داده‌های ایستگاهی وجود دارد. به علت توزیع مکانی نامناسب ایستگاه‌ها در حوضه پاتاوه، استفاده از روش‌های درون‌یابی، نتایج مناسبی را به دنبال ندارد. این موضوع در واسنجی مدل نیز مورد آزمون قرار گرفت. روش‌هایی که از همبستگی بارش و ارتفاع استفاده می‌کنند نیز مورد بررسی قرار گرفت. با وجود آن که در این حوضه بارش ماهانه و سالانه همبستگی زیادی به ارتفاع دارد، بارش روزانه همبستگی قابل توجهی به ارتفاع ندارد ($R^2 \approx 0.44$). در بسیاری از مطالعات دیگر نیز همبستگی کم بارش روزانه به ارتفاع ذکر شده است (۱۱).

لذا بارش ایستگاه تبخیرسنجی یاسوج (۲۰۳-۲۱)، که از نظر جغرافیایی و راقومی موقعیت نزدیک‌تری به مرکز ثقل حوضه دارد، مبنای شبیه‌سازی بارش-روناب قرار گرفت. در این ایستگاه بارش سال‌های ۸۰-۱۳۵۱ در دسترس است. در این دوره میانگین بارش ایستگاه ۸۶۵ میلی‌متر در سال است. برای

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی حوضه پاتاوه

ارتفاع (متر)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	میانگین بارش سالانه* (mm)	میانگین دمای سالانه* (°C)
۱۸۳۱	۳۰°، ۵۰'	۵۱°، ۴۱'	۸۴۵	۱۴/۶
۱۸۲۱	۳۰°، ۳۹'	۵۱°، ۳۶'	۸۲۵	۱۵/۲

* میانگین دما و بارش، مربوط به دوره آماری مشترک ۸۰-۱۳۶۵ است.

تغرق بر مبنای دما تعیین شد و تابع تبدیل مقادیر آن به مقادیر پنمن-مانتیس به دست آمد. سپس با استفاده از روش برگزیده و تابع تبدیل بالا، مقادیر تبخیر و تعرق معادل ایستگاه ۲۰۳-۲۱ برای ۲۹ سال بر مبنای دما محاسبه و به مقادیر معادل پنمن-مانتیس تبدیل شد.

از روش های برآورد تبخیر و تعرق بر مبنای دما، روش های بلانی-کریدل (۱۴)، تورنت وایت (۱۵) و هارگریوز-سامانی (۱۶) انتخاب شدند. در این دسته از روش‌ها، روش های بلانی-کریدل و تورنت وایت به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۷)؛ ضمن آن که روش بلانی-کریدل در نشریه FAO-24 به عنوان روش استاندارد، در شرایطی که تنها داده‌های دما موجود است و امکان واسنجی روش وجود ندارد، معرفی شده است (۱۸). روش هارگریوز-سامانی نیز در نشریه FAO-56 به عنوان جایگزینی برای روش فائو پنمن-مانتیس (با واسنجی در منطقه) در چنین شرایطی معرفی شده است. نتایج این روش‌ها با روش پنمن-مانتیس برای ۱۷ سال (۲۰۴ ماه) آمار ایستگاه سینوپتیک یاسوج در جدول ۲ مقایسه شده است. بر این مبنای روش هارگریوز-سامانی بیش-ترین همبستگی را با روش پنمن-مانتیس نشان می‌دهد.

در ایستگاه سینوپتیک ۱۷ سال آمار سال های ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۳ در دسترس است و در ایستگاه تبخیرسنجی ۲۹ سال آمار بارش، تبخیر از تشتک و دمای حداقل، میانگین و حداکثر در سال های ۸۰-۱۳۵۱ در دسترس می‌باشد.

رابطه پنمن-مانتیس به عنوان بهترین رابطه برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل معرفی شده است (۱۲ و ۱۳). لیکن این رابطه به داده‌های اقلیمی زیادی نیاز دارد. با توجه به آمار موجود، می‌توان تبخیر و تعرق پتانسیل را برای ۱۷ سال به روش فائو پنمن-مانتیس محاسبه کرد. همچنین می‌توان با استفاده از روش های بر مبنای دما، تبخیر و تعرق پتانسیل را برای ۲۹ سال محاسبه کرد. مزیت روش اول دقت محاسبه است و مشکل آن کوتاه بودن طول دوره و موقعیت مکانی ایستگاه است. روش دوم با مشکل اطمینان به دقت داده‌های محاسباتی مواجه است، لیکن از طول آماری مناسب برخوردار می‌باشد.

در مواجهه با این مشکل، تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از روش های مختلف بر مبنای دما، و روش پنمن-مانتیس برای ۱۷ سال آمار موجود ایستگاه سینوپتیک محاسبه شد. سپس از مقایسه همبستگی نتایج روش های مختلف بر مبنای دما با روش فائو پنمن-مانتیس، روش تولید تبخیر و

جدول ۲- مقایسه تبخیر و تعرق محاسباتی روش های بر مبنای دما با روش فائو پنمن-مانتیس برای دوره ۲۰۰۳-۱۹۸۷ در

ایستگاه سینوپتیک یاسوج

پنمن-مانتیس	هارگریوز-سامانی	تورنت وایت	بلانی-کریدل	روش
۱۳۴۰	۳۵۵۳	۸۳۶	۱۵۴۵	تبخیر و تعرق پتانسیل متوسط (mm/year)
۱	۰/۹۶	۰/۸۹	۰/۹۴	ضریب تعیین (R^2) با روش فائو پنمن-مانتیس در مقیاس ماهانه

۱۳۷۳، ۱۳۷۴-۷۵، ۱۳۷۵-۷۶، ۱۳۷۷-۷۸، ۱۳۸۰-۸۱، برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده شد. ۵ سال اول، سال های واسنجی و ۴ سال دوم سال های اعتبارسنجی مدل است. در این دوره میانگین جریان ایستگاه ۵۳/۷ متر مکعب بر ثانیه است و با تغییرات میانگین سالانه ۲۳/۲ تا ۸۵/۳ مکعب بر ثانیه، سال های کم آبی و پرآبی را در بر می گیرد. این در حالی است که مراجع استفاده از حداقل ۲ تا ۳ سال داده برای واسنجی مدل را کافی می دانند (۹).

با استفاده از رابطه بین مقادیر تبخیر و تعرق دو روش هارگریوز- سامانی و فائو پنمن- مانتیس در ایستگاه سینوپتیک یاسوج (رابطه زیر)، مقادیر تبخیر و تعرق معادل روش فائو پنمن- مانتیس از مقادیر روش هارگریوز- سامانی در محل ایستگاه تبخیرسنجی ۲۰۳-۲۱ تولید شد.

$$ET_{O_{P-M}} = 0.3827 \times ET_{O_{H-S}} - 0.0535 \quad (1)$$

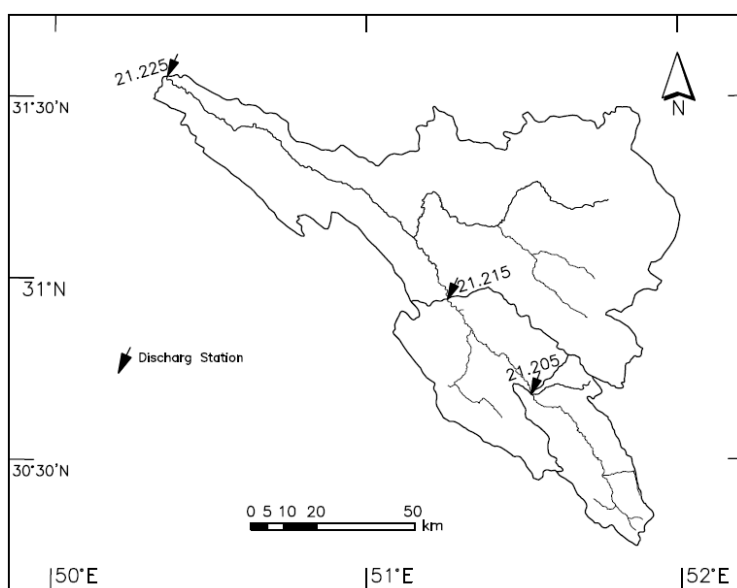
در رابطه بالا، $ET_{O_{P-M}}$ تبخیر و تعرق گیاه مرجع معادل روش پنمن- مانتیس و $ET_{O_{H-S}}$ تبخیر و تعرق محاسباتی به روش هارگریوز- سامانی به میلی متر در روز است. مقدار متوسط سالانه نتایج برای دوره ۸۰-۱۳۶۵، برابر ۱۳۸۰ میلی متر و برای دوره ۸۰-۱۳۵۲ برابر ۱۳۸۸ است.

۵.۲. داده های جریان رودخانه

آمار جریان روزانه ایستگاه پاتاوه برای سال های ۸۰-۱۳۵۲ در دسترس است. در این دوره میانگین جریان ایستگاه ۵۲/۵ متر مکعب بر ثانیه و تغییرات میانگین سالانه آن از ۱۸/۵ تا ۱۰۶/۵ متر مکعب بر ثانیه است. برای بررسی کیفیت داده های جریان این ایستگاه، از داده های ایستگاه های آب سنجی شاه مختار (۲۰۵-۲۱) و بارز (۲۱-۲۲۵) استفاده شد. این ایستگاه ها به ترتیب در بالادست و پایین دست ایستگاه پاتاوه واقعند. موقعیت این ایستگاه ها و حوضه های آن ها در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین مشخصات فیزیوگرافی این حوضه ها در جدول ۳ ارائه شده است. از مقایسه گرافیکی سری های استاندارد شده جریان روزانه، مقایسه مقادیر سالانه استاندارد شده، تعیین ضریب همبستگی داده های روزانه ایستگاه مورد نظر با ایستگاه های شاهد در هر سال و حذف سال های با آمار مفقود، سال های با آمار مطمئن برای واسنجی و اعتبارسنجی^۱ مدل شناسایی شد. شکل های ۴ و ۵ نمونه هایی از مقایسه سری جریان استاندارد شده ایستگاه مورد مطالعه با ایستگاه های بالادست و پایین دست را به ترتیب برای یک سال با آمار قابل تردید و یک سال با آمار قابل اطمینان نشان می دهند. به این ترتیب، از آمار ۹- سال آبی ۵۹-۱۳۵۸، ۶۱-۱۳۶۰، ۶۳-۱۳۶۲، ۶۵-۱۳۶۴، ۷۴-

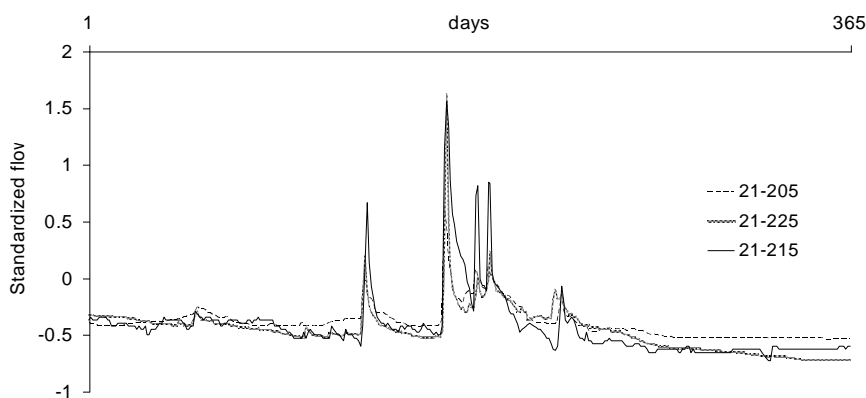
جدول ۳- مشخصات فیزیوگرافی حوضه پاتاوه و حوضه‌های آبریز مینا برای بررسی کیفیت آمار جریان

نام حوضه	کد ایستگاه	مساحت (km ²)	طول رودخانه (km)	ارتفاع متوسط (m)	شیب رودخانه (%)	شیب حوضه (%)	محیط حوضه (km)
پاتاوه	۲۱-۲۱۵	۲۸۰۰	۱۲۷	۲۲۷۷	۰.۶	۲۰	۳۱۱
شاه مختار	۲۱-۲۰۵	۱۱۸۷	۸۵	۲۳۷۶	۱	۱۸/۱	۲۷۳
بارز	۲۱-۲۲۵	۸۹۰۰	۲۵۳	۲۳۰۶	۰/۵۴	۱۹	۷۱۰



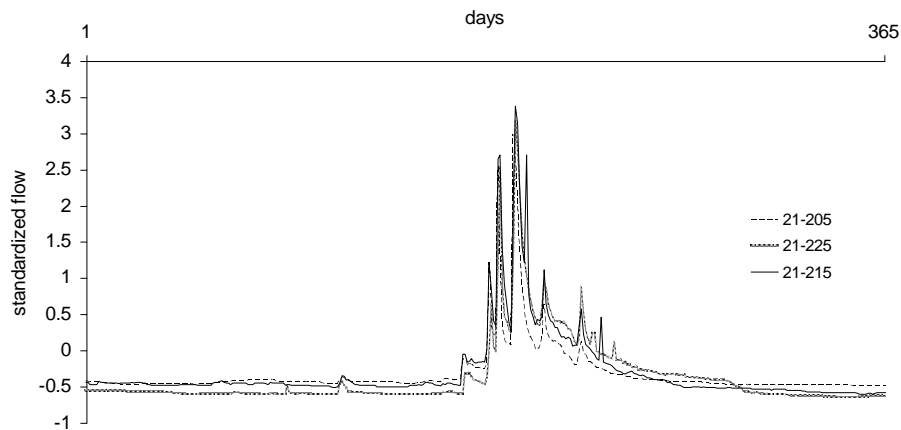
شکل ۳ - موقعیت ایستگاه‌های آبرسنجی و حوضه‌های شاه مختار (۲۱-۲۰۵) و بارز (۲۱-۲۲۵)

نسبت به ایستگاه و حوضه پاتاوه (۲۱-۲۱۵)



شکل ۴ - مقایسه جریان اندازه گیری استاندارد شده ایستگاه ۲۱-۲۱۵ با ایستگاه‌های ۲۱-۲۰۵ و ۲۱-۲۲۵

در سال آبی ۷۳-۱۳۷۲ (به عنوان نمونه‌ای از سال‌های با جریان ثبت شده مشکوک)



شکل ۵ - مقایسه جریان اندازه گیری استاندارد شده ایستگاه ۲۱-۲۱۵ با ایستگاه‌های ۲۱-۲۰۵ و ۲۱-۲۲۵ در سال آبی ۷۶-۱۳۷۵ (به عنوان نمونه سال های با جریان ثبت شده قابل اطمینان)

آمده در مرحله واسنجی، با استفاده از داده‌های مشاهداتی که در مرحله واسنجی مورد استفاده قرار نگرفته است، سنجیده می‌شود. در صورت شبیه‌سازی قابل قبول، مدل برای کاربرد آماده است (۱۹).

در مراجع گزینه‌های زیادی برای تابع هدف مدل های بارش- رواناب پیشنهاد شده است. تابع هدف انتخابی، مقدار پارامترها و عملکرد مدل را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در هر مورد شبیه‌سازی، یک تصمیم شخصی است (۱۰). در میان توابع هدف مدل های بارش- رواناب، شاخص بازده (۲۰) توسط محققان زیادی مورد استفاده قرار گرفته است. این معیار حالتی استاندارد شده از تابع حداقل مربعات خطاهاست. Servat و Dezetter (۱۹۹۱) پنج تابع هدف مختلف را برای واسنجی یک مدل بارش رواناب به کار بردند و شاخص بازده را بهترین معیار معرفی کردند. Rao و Han (۱۹۸۷) در واسنجی یک مدل بارش- رواناب شهری، چندین تابع هدف را تحلیل کردند و معیار حداقل مربعات را بهترین تابع هدف یافتند. شاخص بازده به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (2)$$

که در آن Q_{obs_i} جریان مشاهداتی در روز i ، Q_{sim_i} جریان شبیه‌سازی شده در روز i و $\overline{Q_{obs}}$ میانگین جریان

۶- برآورد پارامترهای مدل

مهم ترین پارامترهای مدل ARNO مربوط به مؤلفه تعادل رطوبت خاک است که اغلب برای هر حوضه از طریق واسنجی به دست می‌آیند. این پارامترها عبارتند از: W_{max} (ظرفیت متوسط ذخیره رطوبت در خاک به mm)، b (ضریب شکل در منحنی سطح اشباع، که مبین درجه همگنی مشخصات خاک است)، D_{max} (بیشینه زهکشی که در مواقعی که خاک اشباع است به وقوع می‌پیوندد به mm)، SOL (پارامتر آستانه‌ای رطوبت خاک در فرایند زهکشی)، $D1$ (نسبتی از حداکثر زهکشی در حالتی که مقدار رطوبت خاک در یک حد آستانه‌ای است)، CESP (توان در رابطه زهکشی)، SOL1 (مقدار آستانه‌ای رطوبت خاک در فرایند نفوذ عمقی) و PERC (بیشینه نفوذ عمقی که در حالت اشباع خاک اتفاق می‌افتد).

برای واسنجی مدل قسمتی از داده‌های اقلیمی و آبی مشاهداتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این ترتیب پس از ورود داده‌های اقلیمی به مدل، جریان شبیه‌سازی شده با جریان مشاهداتی رودخانه مقایسه می‌گردد. در این مرحله مقادیر پارامترها به روشی هدفمند آن قدر تغییر داده می‌شود که جریان شبیه‌سازی شده تا حد مطلوب به جریان مشاهداتی نزدیک گردد. اجرای مدل هنگامی موافقت آمیز تلقی می‌شود که مقدار تابع هدف به عنوان معیار اندازه گیری کارایی مدل، بهینه شود. پس از واسنجی، اعتبار مدل با پارامترهای به دست

که در آن $(V_{sim})_i$ و $(V_{obs})_i$ به ترتیب حجم جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در سال i ، و $(Eff)_i$ شاخص بازده برای سال i ، و n تعداد سال‌های واسنجی است. در این تحقیق از ۵ سال داده برای برآورد پارامترهای مدل و از ۴ سال داده برای تست مدل استفاده شد.

نتایج

در مرحله واسنجی مدل ARNO برای حوضه پاتاوه، شاخص بازده برای داده‌های روزانه معادل ۰/۸۰ و ضریب تعیین برابر ۰/۸۲ به دست آمد. در مرحله اعتبارسنجی نیز مقادیر شاخص بازده برابر ۰/۸۲ و ضریب تعیین برابر ۰/۸۳ به دست آمد. مقادیر این شاخص‌ها در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، به مقادیر ایده‌آل آنها به میزان قابل توجهی نزدیک است. ضمن آن که آماره‌های جریان مشاهداتی (شامل میانگین (\bar{Q}) ، انحراف معیار (Sd)، و چولگی (Skew) جریان روزانه) که به طور مستقیم در تابع هدف وارد نشده است نیز به خوبی در جریان شبیه‌سازی شده حفظ شده است (جدول ۴).

مشاهداتی دوره شبیه‌سازی است. تغییرات این معیار از $-\infty$ تا $+\infty$ بوده و هر چه شبیه‌سازی بهتر انجام گرفته باشد، مقدار آن به یک نزدیک‌تر است. مقدار صفر برای شاخص بازده به این معنی است که شبیه‌سازی بهتر از مقدار میانگین داده‌های مشاهداتی رواناب نیست.

Loukas و همکاران (۲۰۰۲) برای شبیه‌سازی بهتر

حجم‌ها، تابع هدف زیر را به کار بردند.

$$EOPT = Eff - \left| 1 - \frac{V_{sim}}{V_{obs}} \right| \quad (3)$$

در این تحقیق مشاهده شد با استفاده از تابع هدف بالا، جریان‌های پیک سال‌های خشک خوب شبیه‌سازی نمی‌شوند، زیرا این تابع با به کارگیری توان دوم خطاها، وزن بیشتری به شبیه‌سازی ترسالی‌ها می‌دهد. لذا برای خوب مدل شدن همه سال‌ها اعم از خشک و تر، و نیز برای شبیه‌سازی بهتر حجم‌ها، تابع هدف به صورت زیر تعریف شده است.

$$Obj.Fun = \sum_{i=1}^n EOPT_i \quad (4)$$

جدول ۴- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل ARNO برای شبیه‌سازی جریان روزانه حوضه پاتاوه

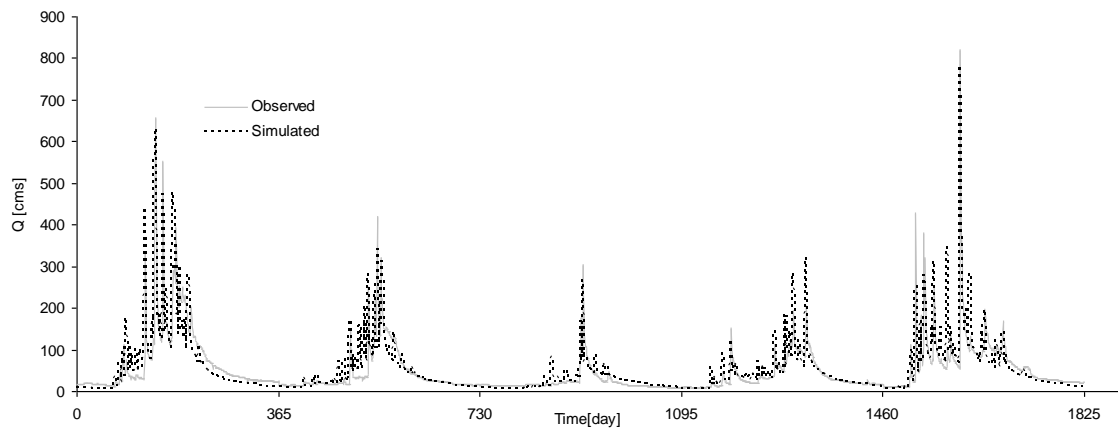
	Eff	R ²	$\bar{Q}_{obs} [m^3/s]$	$\bar{Q}_{sim} [m^3/s]$	Sd _{obs}	Sd _{sim}	Skew _{obs}	Skew _{sim}
Calibration	0.80	0.82	50.5	50.5	62.9	67.3	4.1	3.8
Validation	0.82	0.83	58.2	55.3	79.9	83.1	3.7	4.0

در کانادا با استفاده از ۲۰ سال داده مشاهداتی واسنجی کردند. در این مطالعه شاخص بازده ۰/۹۳ به دست آمد. Zhang و Savenije (۲۰۰۵) با استفاده از مدل REWASH جریان یک حوضه در بلژیک را شبیه‌سازی کردند. در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از ۲ دوره ۲ ساله انجام و شاخص بازده به ترتیب ۰/۶۸ و ۰/۶۵ به دست آمد. Shafii و Smedt (۲۰۰۹) در واسنجی مدل WetSpa برای یک حوضه در اسلواکی، مقادیر شاخص بازده را برای دوره‌های ۵ ساله واسنجی و اعتبارسنجی، به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۷۰ به دست آوردند.

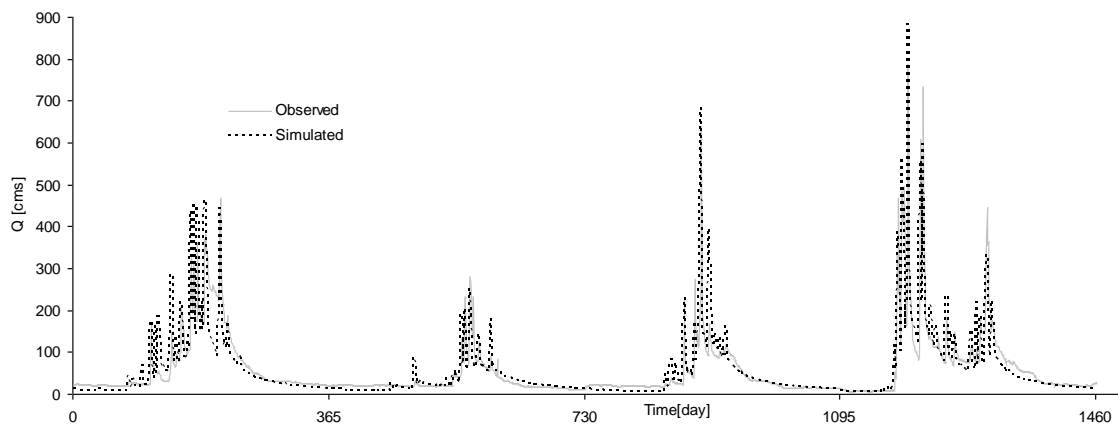
در مقایسه با دیگر مطالعات شبیه‌سازی بارش- رواناب روزانه، Zhang و Savenije (۲۰۰۵)، معیار شبیه‌سازی خوب را شاخص بازده بزرگ‌تر از ۰/۶ برگزیدند. در حالی که Kamali و همکاران (۲۰۰۷) در واسنجی مدل هیدرولوژیکی روزانه WATCLASS برای حوضه رودخانه Smokey- در کانادا، مقادیر شاخص بازده بزرگتر از ۰/۷ را قابل قبول دانستند. Evans و Schreider (۲۰۰۲) در شبیه‌سازی جریان روزانه ۶ حوضه در استرالیا با استفاده از مدل بارش- رواناب CMD- IHACRES از ۴ سال داده مشاهداتی برای واسنجی استفاده کردند و شاخص بازده را بین ۰/۶۷ تا ۰/۷۸ به دست آوردند. Loukas و همکاران (۲۰۰۴) مدل UBC را برای یک حوضه

شده است. همچنین نمودار ۷ نتیجه آزمایش مدل را نشان می‌دهد.

از دیگر معیارهای عملکرد مدل، توافق چشمی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی است (۲۳). در نمودار ۶ جریان شبیه‌سازی شده با جریان مشاهداتی در مرحله واسنجی مقایسه



شکل ۶ - نتایج واسنجی مدل ARNO برای شبیه‌سازی جریان روزانه حوضه پاتاوه



شکل ۷ - نتایج اعتبارسنجی مدل ARNO برای شبیه‌سازی جریان روزانه حوضه پاتاوه

نتیجه گیری

روش پنمن-مانتیس، از رابطه همبستگی مناسب یک روش بر مبنای دما و روش پنمن-مانتیس در یک ایستگاه سینوپتیک مجاور حوضه، با خصوصیات اقلیمی مشابه، استفاده شد. سپس با بسط این رابطه به ایستگاه تبخیرسنجی حوضه، داده‌های تبخیر و تعرق پتانسیل معادل پنمن-مانتیس برای حوضه، از داده‌های دما تولید شد. به علت توزیع مکانی نامناسب ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه، استفاده از روش‌های معمول میانگین‌گیری بارش حوضه موثر نبود و آمار یک ایستگاه نزدیک به مرکز ثقل حوضه به عنوان بارش حوضه منظور شد. در

در این تحقیق با استفاده از مدل بارش-رواناب مفهومی ARNO جریان روزانه آب حوضه پاتاوه، از زیر حوضه‌های کارون، شبیه‌سازی شد. ۸ پارامتر این مدل از طریق واسنجی، با استفاده از داده‌های مشاهداتی حوضه به دست آمد. در این مقاله با تاکید بر کیفیت داده‌های لازم برای تخمین پارامترها و شبیه‌سازی رواناب، توجه ویژه به آماده‌سازی داده‌های ورودی مدل معطوف شد. در این خصوص با توجه به آن که اطلاعات هواشناسی داخلی حوضه محدود به یک ایستگاه تبخیرسنجی است، برای تولید داده‌های تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه به

- using rainfall forecasts, a simple loss module and unit hydrographs: Two Brazilian catchments. *Environmental Modelling & Software*, 22, 1229-1239.
4. Croke, B.F.W., Andrews, F., Jakeman, A.J., Cuddy, S.M., Luddy, A., (2006), IHACRES Classic Plus: a redesign of the IHACRES rainfall-runoff model. *Environmental Modelling and Software*, 21, 426-427.
 5. Lin, G.F., Wang, C. M., (2007), A nonlinear rainfall-runoff model embedded with an automated calibration method – Part 2: The automated calibration method., *Journal of Hydrology*, 341, 196– 206.
 6. Nathan, R.J., McMahon, T.A., (1990a), The SFB model part I-validation of fixed model parameters. *Civil Engineering Transactions CE32* (3), 157-161 (Institution of Engineers, Australia).
 7. Nathan, R.J., McMahon, T.A., (1990b), The SFB model part II-operational considerations. *Civil Engineering Transactions CE32* (3), 162e166 (Institution of Engineers, Australia).
 8. Boughton, W., Chiew, F., (2003), Calibrations of the AWBM for Use on Ungauged Catchments. Technical Report 03/15. CRC for Catchment Hydrology, Monash University, 37 pp.
 9. Todini, E., (1996), The ARNO rainfall-runoff model. *Journal of Hydrol*, 175: 339-382.
 10. Abdulla, F.A., Lettenmaier, D.P., Liang, Xu, (1999), Estimation of the ARNO model baseflow parameters using daily streamflow data. *Journal of Hydrology*, 222: 37–54.
- شبیه‌سازی بارش- رواناب، معمولاً برای برآورد پارامترها و ارزیابی مدل، تنها داده‌های رواناب کل حوضه در دسترس است. وجود خطا در داده‌های مشاهداتی منجر به انحراف پارامترهای برآورد شده و خطا در شبیه‌سازی می‌شود. لذا با هدف استفاده از داده‌های معتبرتر، آمار مشاهداتی ایستگاه‌های حوضه با آمار ایستگاه‌های مجاور مقایسه شد و تنها از سال‌های با آمار مطمئن در تخمین پارامترهای مدل استفاده شد. بر این مبنا از ۵ سال داده‌های مشاهداتی حوضه برای تخمین پارامترهای مدل و از ۴ سال داده‌های مشاهداتی برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. مراجع استفاده از حداقل ۲ تا ۳ سال داده برای واسنجی مدل را کافی می‌دانند.
- در مرحله واسنجی مدل، شاخص بازده برای داده‌های روزانه معادل ۰/۸۰ و ضریب تعیین برابر ۰/۸۲ به دست آمد. در مرحله اعتبارسنجی نیز شاخص بازده برابر ۰/۸۲ و ضریب تعیین برابر ۰/۸۳ به دست آمد. در مراجع اغلب مقدار شاخص بازده بزرگتر از ۰/۶ مبنای شبیه‌سازی خوب بارش رواناب در مقیاس روزانه قرار می‌گیرد. در بعضی مراجع نیز به صورت سخت‌گیرانه مقدار ۰/۷ مبنای قرار گرفته است. در این تحقیق ضمن دستیابی به شاخص بازده بزرگتر از ۰/۸، آماره‌های جریان مشاهداتی نیز با تقریب خوب در جریان شبیه‌سازی شده حفظ شد. این نتایج حاکی از موفقیت روش در شبیه‌سازی جریان روزانه حوضه پاتاوه در شرایط ناکافی بودن آمار است.

منابع

1. Boughton, W.C., (2005), Catchment water balance modelling in Australia 1960-2004. *Agricultural Water Management*, 71 (2), 91-116.
2. Boughton, W., (2006), Calibrations of a daily rainfall-runoff model with poor quality data. *Environmental Modelling and Software*, 21, 1114-1128.
3. Littlewood, I.G., Clarke, R.T., Collischonn, W., Croke, B.F.W., (2007), Predicting daily streamflow

20. Nash JE, Sutcliffe JV (1970), River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion on principles. *J Hydrol* 10:282–290.
21. Servat, E., and Dezetter, A., (1991), Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modeling in a Sudanese savannah area. *Hydrol. Sci. J.*, 36(4/8), 307–330.
22. Rao, A. R., and Han, J. (1987), Analysis of objective functions used in urban runoff models. *Adv. Water Resour.*, 10, 205–211.
23. Loukas, A., Vasiliades, L., Dalezios, N. R., (2002), Potential Climate change on flood Producing mechanisms in southern British Columbia, Canada using the CGCMA1 simulation results. *Journal of Hydrology*, 259, 163-188.
24. Zhang, G. P. and Savenije, H. H. G., (2005), Rainfall-runoff modelling in a catchment with a complex groundwater flow system: application of the Representative Elementary Watershed (REW) approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 243–261.
25. Kamali, M., Ponnambalam, K., and Soulis, E. D., (2007), Computationally efficient calibration of WATCLASS Hydrologic models using surrogate optimization. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 4, 2307–2321.
26. Evans, J and Schreider, S., (2002), Hydrological impacts of climate change on inflows to Perth, Australia. *Climatic Change*, 55, 361–393.
27. Loukas, A., Vasiliades, L., Dalezios, N., R., (2004), Climate change implication on flood response of a
11. Carrera-Hernández, J.J., Gaskin, S.J., (2007), Spatio temporal analysis of daily precipitation and temperature in the Basin of Mexico. *Journal of Hydrology*, 336, 231– 249.
۱۲. خيرابى، ج.، (۱۳۸۱)، بررسى و مقايسه تطبيقى روش پنمن-مانتيس با روش فائو ۲۴ در ايران. انتشارات كميته ملي آبيارى و زهكشى ايران.
13. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998), Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56, Rome.
14. Blaney, H.F. and Criddle, W.D. (1950), Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data, *USDA Soil Conserv. Serv. SCS-TP96*. 44 pp.
15. Thornthwaite, C.W., (1948), An approach toward a rational classification of climate. *Geograph. Rev.*, 38, 55-94.
16. Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., (1985), Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.* 1 (2), 96–99.
17. Serrano, S. E., (1997), *Hydrology for Engineers, Geologists and Environmental professionals*. Hydroscievcce Inc., 101-103.
18. Doorenbos, J. and Pruitt, W. O., (1977), Crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 24*, (rev.) FAO, Rome, Italy. 144 p.
19. Reynard, N.S., (2003), Impact of climate change on flood flows in river catchments. Interim report for Defra / EA, R&D Technical Report W5-032/TR, 49pp.

(WetSpa) using a genetic algorithm,”
Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 6,
243–271.

mountainous watershed. Water, Air,
and Soil Pollution: Focus 4, 331–347.
28. Shafii, M., Smedt, F., D., (2009)
“Multi-objective calibration of a
distributed hydrological model