

شبیه‌سازی جریان روزانه در حوضه‌های کوهستانی مناطق نیمه‌خشک با استفاده از برنامه شبیه‌سازی هیدرولوژیکی فورترن (HSPF)

- ❖ جعفر دستورانی*: استادیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، ایران.
- ❖ محمد مهدوی: استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.
- ❖ علی سلاجقه: استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.
- ❖ احمد فاخری فرد: استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران.

چکیده

برنامه شبیه‌سازی هیدرولوژیکی فورترن (HSPF) قدمت دیرینه‌ای در مدل‌سازی حوزه آبخیز دارد و در دنیا مطالعات زیادی درباره این مدل انجام شده است. حوضه حبله‌رود، با مساحتی بالغ بر ۳۲۰۰ کیلومترمربع، از زیر حوضه‌های مهم حوزه آبریز کویر نمک است که بخش زیادی از آب موردنیاز دشت گرمسار، به‌ویژه در بخش کشاورزی را تأمین می‌کند. مطالعات پیشین درباره هیدرولوژی و منابع آب در این حوضه، در گام زمانی روزانه، بیشتر محاسبه آماره‌های دبی‌های روزانه بوده، بنابراین، شبیه‌سازی دبی‌های روزانه بسیار درخور اهمیت است. در این تحقیق، ضمن برآورد پارامترهای مدل برای پیش‌بینی جریان، به نتایج مدل در شرایط فعلی دسترسی به حداقل داده‌ها و اطلاعات موردنیاز مدل پرداخته می‌شود. به‌طورکلی، نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که بسته نرم‌افزاری مدل (WinHSPF) به هنگام اجرا، با سیستم متریک، دارای خطای زیادی است و بهتر است سیستم انگلیسی انتخاب شود. همچنین، به دلیل نیازمندی مدل به داده‌های سری زمانی ساعتی، جزئیات بیشتر درباره مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و سایر اطلاعات زمینی و کمبود اطلاعات و دقت پایین این داده‌ها و نیز خطای خود مدل در برخی موارد، مانند استفاده میانگین پارامتر نفوذ برای قطعه مشخص کاربری اراضی و نبود معیار مشخص در ترسیم زیر حوضه‌ها، با مقادیری که برای ضریب کارایی مدل (۰/۷۷ و ۰/۱۸) و ضریب رگرسیون (۰/۴۶۸ و ۰/۴۹)، به ترتیب در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی به دست آمد، حاکی از نتایج ضعیف مدل در شبیه‌سازی جریان روزانه است؛ به‌گونه‌ای که مقادیر دبی شبیه‌سازی‌شده در اواخر فصل بهار بیشتر و در تابستان و پاییز کمتر از مقادیر مشاهداتی است. در پایان این پژوهش برای شبیه‌سازی بهتر با این مدل راه‌حلهایی ارائه می‌گردد.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی جریان روزانه، برنامه شبیه‌سازی هیدرولوژیکی فورترن (HSPF)، حوضه حبله‌رود

۱. مقدمه

شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان، در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی در بین هیدرولوژیست‌ها و مدل‌سازان حوضه آبخیز بسیار رایج است. برنامه شبیه‌سازی هیدرولوژیکی فورترن (HSPF) یکی از این مدل‌هاست که قدمتی دیرینه در مدل‌سازی حوضه آبخیز دارد و مطالعات زیادی در دنیا درباره این مدل انجام شده است و اگرچه راجع به شبیه‌سازی مطالعات زیادی صورت گرفته و مدل‌های زیادی نیز ارائه شده و حتی از این مدل برای اهداف دیگری نظیر بررسی منابع آلودگی، پایش کیفیت آب، روند یابی سیل و برآورد رسوب استفاده شده است؛ اما در این تحقیق فقط درباره نتایج این مدل در راستای اهداف شبیه‌سازی جریان رودخانه در گام زمانی روزانه بحث خواهد شد و البته نتایج متفاوتی در ارتباط با این مدل به دست آمده است. برای مثال، نتایج حاصل از شبیه‌سازی ساعتی و روزانه مدل HSPF حاکی از آن است که برازش مدل برای حوضه‌های کوچک‌تر ضعیف‌تر است [۱۵]. نتایج پیش‌بینی مدل در مناطق خشک، اعم از حوضه‌های توسعه‌یافته و توسعه‌نیافته شهری و در مقیاس‌های ماهانه یا سالانه و پیش‌بینی جریان روزانه طی دوره‌های مرطوب آب و هوایی خوب گزارش شده است، اما در شرایط آب و هوایی خشک خیلی ضعیف عمل می‌کند [۱]. در سال خشک، با بارش سالانه ۳۱٪ کمتر از میانگین، خطای مطلق حجم جریان سالانه به اندازه ۴۹٫۵٪ بیشتر است، اما پیش‌بینی جریان ماهانه رضایت‌بخش و شبیه‌سازی جریان روزانه بسیار خوب ارزیابی شده است [۱۷]. تهیه و ارزیابی مدل هیدرولوژیکی حوضه San Francisco Bay (SCR) با استفاده از HSPF، برای گام زمانی روزانه با نتایج ضعیف تا خیلی خوب همراه بوده است [۴]. شبیه‌سازی رواناب حاصل از برف که با استفاده از سه مدل - HSPF، WinSRM و SWAT - در حوضه تالار مازندران، با مساحت ۲۱۰۰ کیلومتر مربع، با پوشش گیاهی غالباً

جنگلی، مورد مقایسه قرار گرفته حاکی از آن بوده که هرچند هر سه مدل به‌طور معقول، مقدار رواناب حوضه تالار مازندران را همانند تغییرات سالانه آب معادل برف شبیه‌سازی کرده‌اند و رواناب شبیه‌سازی شده با مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری شیرگاه همبستگی خوبی داشته اما در مجموع، عملکرد WinSRM در شبیه‌سازی جریان بهتر از دو مدل دیگر بوده است [۱۴]. شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر رواناب سطحی، با استفاده از مدل HSPF و یک مدل مولد کمیت‌های هواشناسی PRECIS که در حوضه قره‌سو اردبیل مورد بررسی قرار گرفته با نتایج قابل قبول مدل HSPF همراه بوده است [۷]؛ اما در تحقیق مشابه و اثر تغییر اقلیم بر بیلان هیدرولوژی و دمایی دریاچه امریکای شمالی با مدل‌های HSPF و AQUATOX نتایج مختلفی از بد تا بسیار خوب حاصل شده است [۱۹]. حتی بررسی ساختار ارتقاء داده شده مدل HSPF برای شبیه‌سازی حوضه Chesapeake Bay (که بیش از دو دهه این مدل در آن حوضه بررسی شده) نشان داد که ارتقاءهای ترکیب قطعات، داده‌های ورودی و ادغام ساده تغییرات کاربری اراضی باعث بهبود نتایج معنی‌دار و اسنچی مدل نمی‌شود؛ بلکه فقط نرم‌افزار توسعه داده شده ابزارهایی برای نمایش عوامل کلیدی و مؤثر با جزئیات بیشتر و راهنمایی مباحث انعطاف‌پذیری فراهم می‌کند. باین‌حال، این جزئیات در کاربرد مرسوم HSPF مشکلاتی به وجود می‌آورد [۱۶]. علاوه بر بررسی کارایی مدل HSPF، تحلیل عدم قطعیت مدل در حوضه Contentnea Creek با مساحت ۲۶۰۰ کیلومتر مربع انجام شد است [۸].

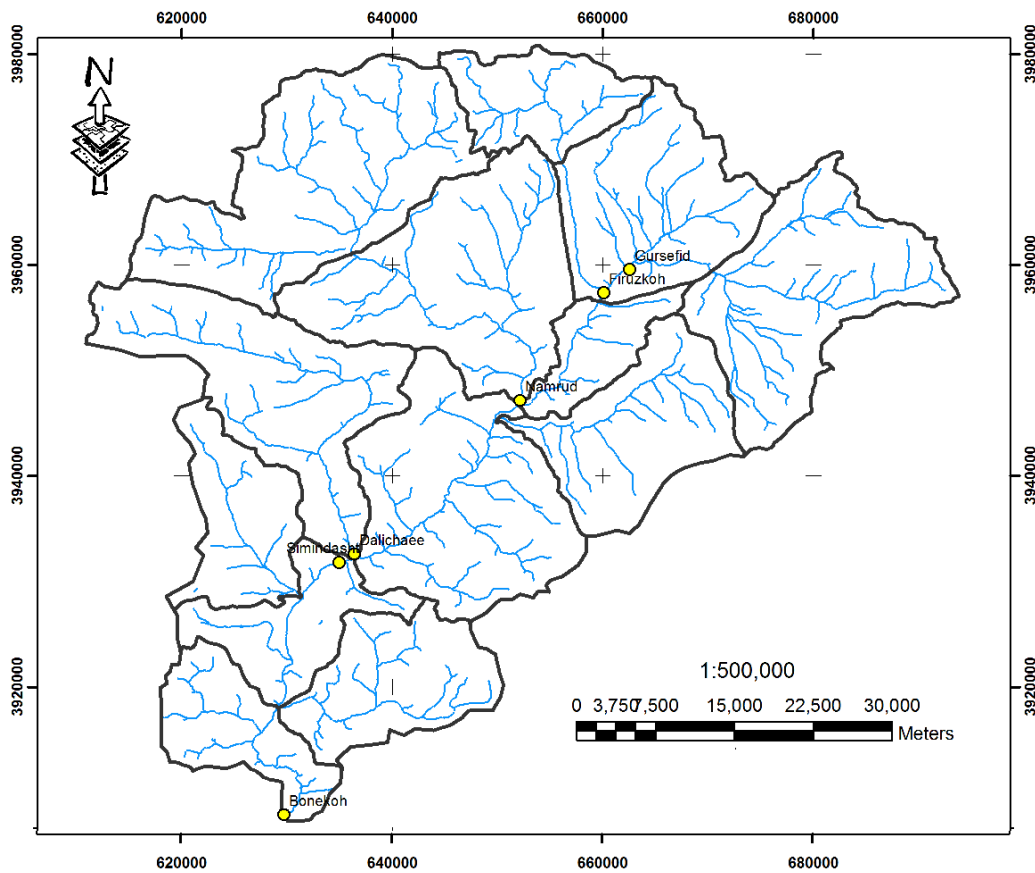
در این تحقیق نیز، به ارزیابی مدل در شبیه‌سازی جریان در گام زمانی روزانه در حوضه کوهستانی حبله‌رود دارای اقلیم نیمه‌خشک، بر اساس ساختار و نیازمندی‌های مدل HSPF و داده‌ها و اطلاعات ارائه شده سازمان‌های هواشناسی، آب منطقه‌ای و جنگل‌ها و مراتع و آبخیزداری پرداخته می‌شود.

۲. روش‌شناسی تحقیق

۱.۲. معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه حبله‌رود، با مساحتی حدود ۳۲۰۰ کیلومترمربع، در جنوب رشته‌کوه البرز مرکزی و در محدوده بین ۱۴ و ۵۲ تا ۱۰ و ۵۳ طول شرقی و ۱۸ و ۳۵ تا ۵۷ و ۳۵ عرض شمالی واقع گردیده است. شکل ۱

حوضه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. رودخانه حبله‌رود نیز یکی از رودخانه‌های مهم حوزه آبریز کویر نمک است و حوزه آبریز این رودخانه، که مناطقی از استان‌های تهران (فیروزکوه و دماوند) و استان سمنان (شهرستان سمنان و گرمسار) را شامل می‌شود، بخش زیادی از آب مورد نیاز دشت گرمسار را نیز تأمین می‌کند.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه آب‌سنجی بن‌کوه در خروجی حوضه حبله‌رود

توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰؛ نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰؛ نقشه کاربری اراضی از سایت گوگل، خاک‌شناسی و نفوذپذیری حوضه از سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری. همچنین، سال آبی ۱۳۷۴ - ۱۳۷۸، سال‌های مرطوب و خشک برای واسنجی و سال‌های ۱۳۷۸ - ۱۳۸۰ برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد.

محل اندازه‌گیری دبی جریان رودخانه حبله‌رود ایستگاه آب‌سنجی بن‌کوه در خروجی حوضه با مختصات ۱۸ و ۳۵ عرض شمالی و ۲۵ و ۵۲ طول شرقی و در ارتفاع ۱۰۴۰ متری از سطح دریاست. این ایستگاه در سال ۱۳۲۶ تأسیس شد و فعالیت آن ادامه دارد و مجهز به لیمنگراف-اشل و پل تلفریک است. نقشه‌های مورد استفاده در این تحقیق عبارت‌اند از: نقشه‌های رقومی

۲.۲. توصیف کلی مدل HSPF

مدل HSPF به عنوان کامل ترین مدل هیدرولوژیکی، در سال ۱۹۵۹ در قالب مدل SWM آغاز و در سال ۱۹۸۰ در قالب فورترن استاندارد ارائه گردید [۱۰]. این مدل مدلی جامع، مفهومی، پیوسته، دارای پارامتر یکپارچه و در مقیاس حوضه است که حرکت آب، رسوب، آفت کش ها، آلاینده ها و مواد غذایی را در سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر در پروفیل خاک، آبراهه و آبگیرهای مختلط شبیه سازی می کند [۲] و از نظر عددی، مجموعه ای است از کدهای رایانه ای الگوریتم هاست که برای شبیه سازی پاسخ هیدرولوژیکی اراضی به بارش و جریان در کانال های رودخانه یک حوضه استفاده می شود. اگرچه این مدل جزء مدل های یکپارچه است، اما می تواند تغییرپذیری مکانی را با تقسیم حوضه به قطعات همگن هیدرولوژیکی تولید نماید و رواناب هر بخش زمین را با استفاده از داده های ورودی مختلف و پارامترهای حوضه، شبیه سازی کند. همچنین، جزء مدل های ریاضی قطعی^۱ (یا جبرگرایانه) است و از مدل های بسیار پیچیده با تعداد پارامترهای زیاد است [۲۰].

۳.۲. فرایند شبیه سازی در HSPF

ساختار کلی مدل تخصیص داده های سری های زمانی (هواشناسی، جریان رودخانه)، بازه های رودخانه، مشخصه های کانال و پارامترهای پاسخ هیدرولوژیکی در قالب فایل ورودی تحت کنترل کاربر است. کل جریان رودخانه شامل مجموع جریان پایه (تخلیه آب زیرزمینی به رودخانه ها)، جریان زیر قشری و رواناب سطحی بوده و پس از شبیه سازی جریان، با مقادیر مشاهداتی، برای برآورد پارامترهای حوزه آبخیز تطبیق داده می شود. در پایان، بر اساس مقادیر مشاهداتی یک دوره آماری جداگانه، اعتبار مدل بررسی می شود.

۴.۲. نرم افزار BASINS

نرم افزار BASINS در سپتامبر ۱۹۹۶ ارائه شد. با استفاده از این بسته نرم افزاری می توان گزینه های مدیریت نقطه ای و غیر نقطه ای را ارزیابی و چارچوبی برای مدل سازی جامع حوضه فراهم کرد. همچنین سیستمی یکپارچه از GIS، آنالیز داده و مدل سازی است که برای آنالیز حوزه آبخیز و توسعه حداکثر مجموع بار رسوبی روزانه طراحی می شود. نسخه های قبلی آن به صورت برنامه ای جانبی در Arcview و نسخه ای از آن در ArcGIS اجرا می شد. اما نسخه 4.0 BASINS از سال ۲۰۱۰ به صورت مستقل درآمده و بر روی سیستم عامل ویندوز XP قابل اجراست. مدل هایی که در آن گنجانده شده عبارت اند از: HSPF، AQUATOX، PLOAD، SWMM و SWAT.

۵.۲. نیازمندی های مدل

این مدل در مرحله اول به نقشه های کاربری اراضی، بازه رودخانه، زیر حوضه ها و داده های هواشناسی با فرمت قابل پردازش توسط نرم افزار (مدیریت داده های آبخیز؛ WDM) نیاز دارد. در مرحله بعد، چهار نوع فایل داده شامل فایل حوزه آبخیز (*.wds)، بازه رودخانه (*.rch)، شکل هندسی کانال (*.prf) و منابع نقطه ای (*.psr) هنگام ایجاد یک فایل جدید (*.uci) از روی داده های GIS ایجاد می شوند.

۱.۵.۲. مجموعه داده ها از نوع مدیریت داده های

آبخیز (WDM)

فرمت WDM فرمتی استاندارد برای ورودی و خروجی HSPF است. به این مجموعه داده می توان با برنامه رایانه ای ANNIE [۶] یا برنامه رایانه ای Gensen (ایجاد و آنالیز سناریوهای شبیه سازی مدل) [۱۱] دسترسی پیدا کرد. همچنین، از برنامه های رایانه ای IOWDM [۱۲]، METCMP (مطالعات USGS) و

برف در فصول سرد و فرایند تجمع و ذوب برف، در میزان جریان رودخانه تأثیرگذار است. در فرایند شبیه‌سازی تجمع و ذوب برف، علاوه بر داده‌های بارش، از سری‌های زمانی درجه حرارت ساعتی و روش ساده‌شده شبیه‌سازی برف تحت عنوان «درجه - روز» استفاده می‌شود. از دما در تعیین تبخیر و تعرق نیز استفاده خواهد شد. در صورتی که داده‌های ساعتی درجه حرارت هوا وجود نداشته باشد، مدل قادر است از روی مقادیر حداقل و حداکثر درجه حرارت روزانه این مقادیر را ایجاد کند.

۳.۲.۵.۲. محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل

برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل می‌توان از مجموعه داده تبخیر تشک (EVAP) و یا مجموعه داده محاسبه‌شده تبخیر و تعرق پتانسیل (PEVT) استفاده کرد. سپس مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل (PEVT) روزانه، به مقادیر ساعتی آن‌ها تبدیل می‌گردد.

۳.۵.۲. قطعه‌بندی حوزه آبخیز

قطعه‌بندی سطح زمین به مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر بر اساس ویژگی‌های توپوگرافیکی، کاربری اراضی، پوشش زمین، نوع خاک، زمین‌شناسی سطحی و یا سایر فاکتورهای مهم در هیدرولوژی حوزه آبخیز است [۵].

۱.۳.۵.۲. قطعه‌بندی و ویرایش بازه رودخانه

روندیابی بر اساس موج جنبشی یا روش‌های روندیابی ذخیره انجام می‌شود. برای هر بازه رابطه بین عمق، مساحت سطحی، حجم و جریان خروجی در یک F-TABLE مشخص می‌شود. در تحقیق حاضر، ترسیم زیر حوضه‌ها و قطعه‌بندی‌های بازه رودخانه حاصل از نقشه‌های رقومی ارتفاع با فواصل ارتفاعی ده متر در مرحله ترسیم زیر حوضه، با شناختی که از منطقه وجود داشت، پذیرفته شد.

WDMutil [۲۰] در پردازش داده‌های سری زمانی WDM استفاده شده است. در این تحقیق از WDMutil ارائه‌شده توسط USEPA برای منظور فوق استفاده شد.

۲.۵.۲. گام‌های زمانی و داده‌های هواشناسی

داده‌های سری زمانی می‌تواند گام‌های زمانی از یک ثانیه تا یک سال داشته باشد. در شبیه‌سازی میانگین روزانه جریان رودخانه با HSPF در شرایط بارش به صورت باران حداقل به ورودی‌های بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل و در شرایط بارش برف به درجه حرارت (ساعتی) نیز نیاز است. هر مجموعه داده با شماره مجموعه داده (DSN) در متن فایل wdm مشخص می‌شود و باید الگوی خاص برای جلوگیری از سردرگمی و خطا در محاسبات استفاده شود. از آنجاکه الگوریتم‌های HSPF مقادیر ساعتی داده‌های هواشناسی را به کار می‌گیرند؛ بنابراین، داده‌های روزانه باید با روش‌هایی که از این برنامه به کار گرفته شده به صورت ساعتی درآیند.

۱.۲.۵.۲. داده‌های بارش

در این تحقیق از داده‌های بارش ۱۲ ایستگاه سازمان آب منطقه‌ای و سازمان هواشناسی که در داخل حوضه قرار دارند، استفاده شد؛ اما از آنجاکه داده‌های بارش روزانه، با حذف روزهای فاقد بارش ارائه می‌شود و برای تبدیل بارش روزانه به ساعتی، به ایستگاه‌های باران‌سنجی ساعتی در مجاور ایستگاه نیاز است و در منطقه چنین داده‌هایی وجود ندارد، برنامه از تبدیل آن‌ها ناتوان بود و همه این داده‌ها با شیوه دستی در نرم‌افزار اکسل و بر اساس الگوی ارائه‌شده در مدل، انجام شد؛ اما انجام دادن آن در سطح گسترده زمان‌بر است.

۲.۲.۵.۲. داده‌های درجه حرارت

یکی از مشخصه‌های حوضه‌های کوهستانی وقوع بارش به صورت برف و باران در فصول مختلف سال است. در این بین دما، علاوه بر ایفای نقش مهم در شکل‌گیری

۲.۳.۵.۲. تعیین درصد مناطق نفوذناپذیر

مدل HSPF هیچ نفوذی را در مناطق نفوذناپذیر شبیه‌سازی نمی‌کند و رواناب چنین مناطق از مناطق نفوذپذیر مجاور به خاک‌ها و سیستم آب‌های زیرزمینی نفوذ نمی‌کند؛ بنابراین، مقدار منطقه مؤثر نفوذناپذیر کمتر از مناطق نفوذناپذیر برآورد شده از طریق نقشه‌های کاربری اراضی است. برای مدل، مقدار زمین نفوذناپذیر که از طریق نقشه‌های کاربری اراضی برآورد شده، به‌اندازه نفوذ آب در مناطق نفوذپذیر مجاور کاهش یافت و این مقادیر کاهش یافته از سطح نفوذناپذیر، به‌عنوان سطح نفوذناپذیر مؤثر در نظر گرفته شد. در این تحقیق، پس از تطبیق نقشه‌های کاربری اراضی و نفوذپذیری و به دست آوردن مقدار اولیه به ترتیب ۳۰ و ۷ درصد مناطق شهری و بایر نفوذناپذیر در نظر گرفته شد و همه مناطق مراتع و اراضی کشاورزی نفوذپذیر لحاظ گردید.

۳.۳.۵.۲. تأثیر نوع پوشش گیاهی و کاربری اراضی

این مدل پارامترهایی برای رشد محصول، نظیر تولید بیوماس، پوشش زمین، شاخص سطح برگ، رشد ریشه و ... ندارد. همچنین، فاقد روش‌های مدیریت کشاورزی، نظیر انواع آبیاری، عملیات شخم‌زنی، نوارهای حائل، آبراهه‌های پوشیده از گراست، تراس‌ها و ... است. چون در این مدل مؤلفه‌ای برای رشد گیاه در نظر گرفته نشده، تأثیر نوع پوشش گیاهی، تراکم، رشد ریشه و مرحله تکامل به همراه ویژگی‌های رطوبتی لایه خاک در هر کاربری اراضی در پارامتری که تبخیر و تعرق واقعی از ذخیره زون تحتانی را کنترل می‌کند، ادغام و یکپارچه می‌شود.

۴.۳.۵.۲. تأثیر نوع خاک و نفوذپذیری

در HSPF هر زیر حوضه بر اساس استفاده از زمین، مانند شهری، کشاورزی، جنگل، بایر و آب/تالاب، به مناطق نفوذپذیر/نفوذناپذیر تفکیک می‌شود. در این مدل نمی‌توان قطعاتی مبتنی بر نوع خاک و نفوذپذیری ایجاد

کرد. بلکه به‌طور غیرمستقیم، گروه هیدرولوژیکی غالب خاک در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق نیز پس از تعیین کاربری اراضی مساحت هر یک از گروه‌های هیدرولوژیکی کاربری‌ها مشخص و در تعیین مقادیر پارامترهای هر یک از قطعات همگن به کار گرفته شد.

۵.۳.۵.۲. تأثیر شیب

به‌جز هنگام ترسیم زیر حوضه‌ها و تعیین مقدار یکپارچه شیب برای کل آن زیر حوضه، این عامل نیز همانند نفوذپذیری، در تهیه قطعات همگن نقشی ندارد و فقط باید آن را به‌طور ضمنی در مقادیر پارامترها لحاظ کرد. در این تحقیق، برای تعیین شیب زیر حوضه‌ها از لایه‌های رقومی ارتفاع (DGN) با فواصل ارتفاعی ده متر استفاده شد.

۶.۲. اجرای اولیه مدل

پس از تهیه پنج نوع داده مکانی رقومی شده شامل داده‌های ارتفاع، داده‌های کاربری اراضی، نقاطی به‌عنوان خروجی، برآورد نفوذپذیری قطعات با کاربری‌های مختلف و اندازه مساحت آستانه در ترسیم زیر حوضه‌ها، فایل حاوی داده‌های هواشناسی با فرمت wdm مدل اجرا می‌شود و در ادامه، با تعیین پارامترها، شبیه‌سازی صورت می‌گیرد. در اجرای مدل، نخست سیستم متریک انتخاب گردید، اما با خطاهای بسیار بالا همراه بود؛ به‌گونه‌ای که در بخشی از مدل و برای نمونه میزان تبخیر و تعرق پتانسیل بسیار کمتر از مقادیر تشتک برآورد می‌شد و مقادیر شبیه‌سازی شده جریان صدها هزار برابر مشاهداتی بود؛ بنابراین، سیستم انگلیسی انتخاب شد.

۷.۲. مؤلفه‌های هیدرولوژیکی مدل

مؤلفه‌های مدل همه موارد بررسی بیلان آبی را شامل می‌شوند و عبارت‌اند از: ذخیره گیرش گیاهی، تقسیم جریان در سطح زمین، زیر سطح زمین، ذخیره زون فوقانی خاک، ذخیره زون تحتانی خاک، ذخیره آب

آب زیرزمینی غیرفعال جریان می‌یابد؛ Basetp و AGWETP بخشی از تبخیر و تعرق پتانسیل باقی‌مانده که به ترتیب، می‌توانند از جریان پایه و ذخیره آب زیرزمینی فعال اتفاق بیفتند (سخنرانی kate Flynn سازمان مطالعه زمین‌شناسی امریکا 2004 [به نقل از منبع ۴])

۳.۷.۲. تعیین مقادیر پارامترهای مدل

انتخاب مقادیر پارامترها بر اساس مطالعات پیشین انجام‌شده در مناطق مجاور حوضه و یا در سایر نقاط صورت می‌گیرد. از آنجاکه چنین مطالعه‌ای در نزدیکی حوضه مورد مطالعه صورت نگرفته، نخست می‌توان از مطالعات دیگر نقاط دنیا استفاده کرد. همچنین، پارامترها دامنه‌ای دارند که بر اساس نوع کاربری و خاک مناطق مختلف است و باید رعایت شود. تعیین مقادیر پارامترها به‌گونه‌ای است که معمولاً هر یک بخشی از هیدروگراف رواناب را تحت کنترل دارند. مثلاً AGWS پارامتری است که مقدار جریان را در ابتدای دوره واسنجی که آغاز سال آبی است، کنترل می‌کند. پارامترهای تجمع و ذوب برف، نفوذ، نسبت جریان امروز به دیروز در زمان‌های جریان پایه و یا جریان زیر قشری تحت کنترل پارامترهای خاص هر بخش است، یا تبخیر و تعرق از هر یک از مؤلفه‌های هیدرولوژیکی مدل تحت کنترل پنج پارامتر (CEPSC، LZETP و... در شکل ۲) است. برخی از پارامترهای HSPF را نمی‌توان از داده‌های صحرایی به دست آورد. مثلاً زبری سطحی و ظرفیت نفوذ را به‌آسانی نمی‌توان از داده‌های GIS استنباط یا اندازه‌گیری کرد، بنابراین، غالباً فرض بر این است که این پارامترها در کل منطقه با مشخصات کاربری اراضی مشابه یکنواخت است و بر اساس خصوصیات کاربری اراضی، شیب، خصوصیات زمین‌شناسی، خاک‌شناسی و ویژگی‌های اقلیمی پارامترهای متناظر برآورد می‌شوند و باید از طریق کالیبره کردن مدل به دست آورد. در این مدل برخی پارامترها ماهانه و برخی سالانه تعیین می‌شوند، حتی می‌توان برای

زیرزمینی فعال و آب زیرزمینی عمیق یا غیرفعال. شکل ۲ طرح کلی از این مدل را نشان می‌دهد.

۱.۷.۲. منابع تبخیر و تعرق واقعی

تبخیر و تعرق در این مدل، بر اساس منبع آن، برای هر قطعه از حوضه محاسبه شدنی است و در این راستا تبخیر و تعرق از گیرش گیاهی، جریان ورقه‌ای، تبخیر و تعرق از زون فوقانی، زون تحتانی، آب زیرزمینی فعال و جریان پایه بر اساس شکل ۲ و با ترتیبی که در سمت چپ شکل بیان شده اتفاق می‌افتد. به‌طور کلی، برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی، از داده‌های درجه حرارت ماکزیمم و مینیمم روزانه و شرایط رطوبتی خاک منابع رطوبتی استفاده می‌شود.

۲.۷.۲.۲. پارامترهای مدل HSPF

یک مدل پیچیده HSPF از صدها و حتی هزاران پارامتر در معادلات برای شبیه‌سازی حرکت آب در محیط هیدرولوژیک استفاده می‌کند. برای محاسبه هر یک از اجزاء ممکن است یک یا چند پارامتر وجود داشته باشد. پارامترهای شکل ۲ تعدادی از پارامترهای مدل برای حوضه‌های دارای بارش به‌صورت باران است و در حوضه‌های با بارش به‌صورت برف باید پارامترهای تجمع و ذوب برف و در صورتی که سطح اراضی کشاورزی و آبیاری قابل توجه است پارامترهای آن‌ها را نیز باید اضافه کرد. بر اساس شکل ۲، CEPSC ظرفیت ذخیره گیرش گیاهی است؛ LSUR و SLSUR به ترتیب طول و شیب جریان روی زمین؛ NSUR زبری مانینگ سطح زمین؛ INTFW جریان ورودی جریان زیر قشری؛ INFILT ظرفیت نفوذ خاک؛ UZSN ظرفیت اسمی ذخیره زون فوقانی؛ IRC ثابت خشکیدگی جریان زیر قشری؛ LZSN ظرفیت اسمی ذخیره زون تحتانی؛ LZETP تبخیر و تعرق زون تحتانی؛ AGWRC میزان خشکیدگی آب زیرزمینی پایه؛ KVARY رفتار جریان خشکیدگی آب زیرزمینی؛ DEEPPFR بخشی از جریان ورودی آب زیرزمینی که به

بالا نزدیک به حالت حداکثر است. در چنین شرایطی، جریان‌های تابستانی تحت کنترل جریان پایه بوده و ذخیره زون فوقانی (که با UZSN کنترل می‌شود) در بیشتر مواقع، حتی در زمان رگبارهای تابستانی، خالی است. در مرحله بعد گام زمانی ماهانه نیز پارامترهای خاص هر فصل بر جریان تأثیر بیشتری دارند و بعد از آن جریان‌های بالا و کم روزانه است که تحت کنترل پارامترهایی نظیر INFILT و LZETP است. پارامتر INFILT با پارامترهای AGWRC، UZSN، LZSN، IRC و KVARV ارتباط دارد؛ زیرا مقدار INFILT تخصیص آب را در پروفیل خاک تعیین خواهد کرد. LZETP (شاخصی برای تبخیر و تعرق زون تحتانی) ضریبی است که برای تعیین تبخیر و تعرق استفاده می‌شود و بر مقدار تبخیر و تعرق از زون تحتانی - که ذخیره عمده رطوبت خاک و منطقه ریشه پروفیل خاک را نشان می‌دهد - اثر می‌گذارد. تعدیل مقادیر INFILT توزیع آبی را که از طریق زون بالا جاری خواهد شد تغییر می‌دهد و مقدار این پارامتر با پارامترهای دیگر (LZSN، UZSN، AGWRC، KVARV و IRC) تخصیص و زمان رواناب سطحی، جریان زیر قشری و آب زیرزمینی رودخانه را تعیین می‌کنند. بعد از تعیین مقادیر پارامتر، فایل خروجی مدل که به صورت عددی مقادیر بیلان آبی را ارائه می‌دهد، بررسی گردید تا با شرایط طبیعی همخوانی داشته باشد. مثلاً در شبیه‌سازی برف، شرایط منطقه به گونه‌ای است که تا اردیبهشت‌ماه در پایین دست حوضه برفی وجود ندارد و مقدار پارامتر KMELT نباید خیلی کوچک و یا بزرگ انتخاب شود.

۵.۷.۲. دامنه تغییرات پارامترها

بر اساس مطالب بالا و راهنمای مدل و مطالعات پیشین، پارامترهای مدل با پیشنهادها برنامه واسنجی برای این مدل، یعنی HSPEXP، تعیین گردید که در جدول ۱ و ۲ پارامترهای مدل در قطعات همگن نفوذپذیر و نفوذناپذیر ارائه شده است.

برخی کاربری‌ها یک پارامتر را ماهانه و برای سایر کاربری‌ها سالانه لحاظ نمود؛ تا جایی که میسر بود بیشتر مقادیر پارامترها ماهانه در نظر گرفته شد. از طرفی، با توجه به اینکه در این مدل قطعات زمین به صورت مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر لحاظ می‌شوند، بررسی بیلان آبی در قطعات مختلف متفاوت است و پارامترها را بر اساس مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر تعیین می‌کنند. حوضه حبله‌رود از ریزش جوی به صورت برف برخوردار است، از این رو، پارامترهای تجمع و ذوب برف نیز انتخاب و فرایند برف به روش درجه - روز شبیه‌سازی شد؛ اما در مورد آبیاری به دلیل اینکه سطح اراضی کشاورزی و باغ‌ها نسبت به کل حوضه ناچیز بود در اجرای مدل گنجانده نشد.

۴.۷.۲. واسنجی مدل

جنبه مهم مدل‌سازی، واسنجی مدل و اطمینان از کیفیت و دقت مدل در شبیه‌سازی شرایط حوضه است، بنابراین، باید خروجی مدل با داده‌های مشاهداتی مقایسه شود. برای ترسیم و مشاهده جریان‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده از برنامه GenScn استفاده گردید. بهترین روش برای شروع فرایند واسنجی از گام زمانی بزرگ به کوچک است. این نوع آنالیز باید به ترتیب برای دوره‌های زمانی سالانه، فصلی، ماهانه و رگباری انجام شود. در گام زمانی سالانه، پارامترهای LZSN و UZSN و هدررفت‌های حوضه را می‌توان با شناسایی انحراف‌های جریان، تبخیر و تعرق و هدررفت ناشی از تراوش عمیق محاسبه کرد. پارامترهای دیگری که ممکن است بر کل رواناب تأثیرگذارند FOREST، PETMAX، PETMIN و DEEPFR است. در مرحله بعد و گام زمانی فصلی، دو فصل زمستان و تابستان در نظر گرفته می‌شود. با عنایت به اینکه ذخیره زون فوقانی (UZSN) ظرفیت نزدیک برای زمستان است و تبخیر و تعرق کمتر اتفاق می‌افتد، مقدار ذخیره اسمی (UZSN) در زمستان کمترین تأثیر و در تابستان بیشترین تأثیر را دارد؛ زیرا هدررفت‌ها از ذخیره زون فوقانی به دلیل مقادیر بالای تبخیر و تعرق

جدول ۱. دامنه تغییرات پارامترهای مهم مدل در قطعات همگن نفوذپذیر

دامنه	واحد	علامت اختصاری	دامنه	واحد	علامت اختصاری
۰/۰۰۱-۰/۲۵۲	بی‌بعد	LZETP	۰/۰۰۱-۰/۱۱۸	mm	CEPSC
۰/۲۵-۱۲۷	بی‌بعد	AGWETP	۰/۰۹-۱	mm	UZSN
۲/۵-۳۵۸	بی‌بعد	BASETP	۵۵/۸۸-۱۰۴/۱۴	mm	LZSN
۱/۷	سلسیوس	PETMIN	۱/۲۷-۴/۰۶۴	mmh ⁻¹	INFILT
۵/۵۵	سلسیوس	PETMAX	۲	mm	INFILD
۴۵	متر	LSUR	۰/۶-۱/۵	بی‌بعد	INTFW
۰/۱۵۱-۰/۴۹۹	بی‌بعد	SLSUR	۲	بی‌بعد	INFEXP
۰/۰۰۵-۰/۰۲۳	بی‌بعد	NSUR	۰	mm ⁻¹	KVARY
۰/۰۵	بی‌بعد	DEEPPFR	۰/۸۶-۰/۹	day ⁻¹	IRC
۰/۰۲-۰/۰۵	mm/day. ⁰ c	KMELT	۰/۹۸	day ⁻¹	AGWRC

جدول ۲. دامنه تغییرات پارامترهای مدل برای قطعات همگن نفوذناپذیر

مشخصات پارامتر		
واحد	دامنه	علامت اختصاری
سلسیوس	۱/۷	PETMIN
سلسیوس	۵/۵۵	PETMAX
متر	۴۵	LSUR
بی‌بعد	۰/۱۵۱-۰/۴۹۹	SLSUR
بی‌بعد	۰/۰۰۸-۰/۰۴	NSUR

کارایی مدل، مقادیر مشاهداتی، مقادیر شبیه‌سازی شده و میانگین مقادیر مشاهداتی است.

۳. نتایج تحقیق

هدف از این تحقیق بررسی قابلیت مدل در شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه در حوضه آبخیز حبله‌رود، با شرایط حداقل داده‌های موردنیاز برای این مدل بود که این شرایط در مورد داده‌های قابل دسترس در بیشتر حوضه‌های آبخیز صدق می‌کند؛ بنابراین، فقط به نتایج حاصل در این گام زمانی پرداخته می‌شود.

۳.۱. نتایج واسنجی مدل

چهار سال آماری که در این تحقیق برای واسنجی مدل در نظر گرفته شد، به‌گونه‌ای است که ضمن

۲.۸. کارایی مدل

پس از تعیین مقادیر پارامترهای مدل و تهیه بهترین خروجی ممکن توسط مدل، ضریب کارایی مدل با استفاده از معادله ناش-سوتکلیف (۱۹۷۰) (معادله ۱)، روابط رگرسیونی و ضریب همبستگی (r)، ضریب رگرسیون (R^۲) بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی محاسبه گردید [۱۳].

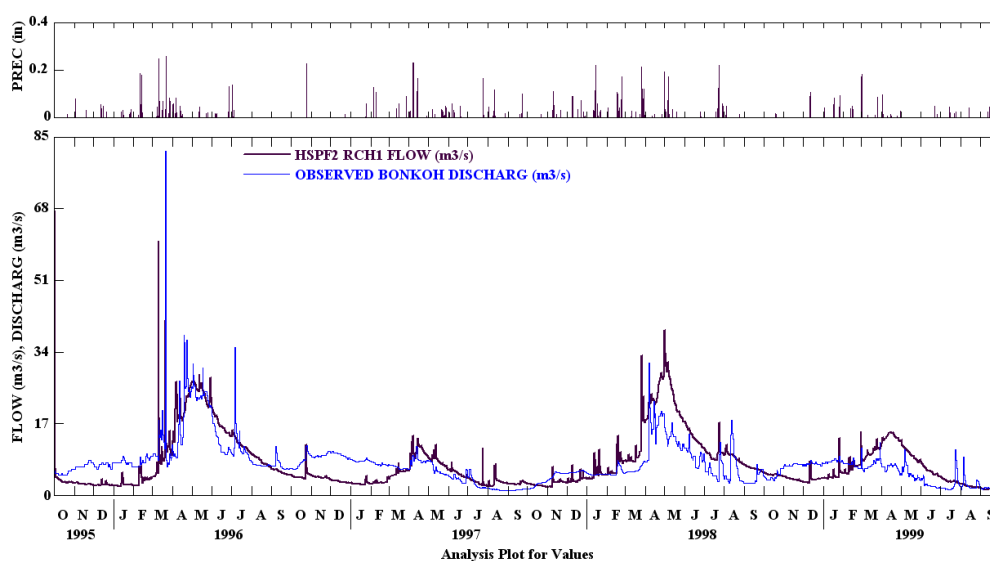
$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{mi} - X_{ci})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{mi} - \bar{X}_m)^2}$$

معادله ۱

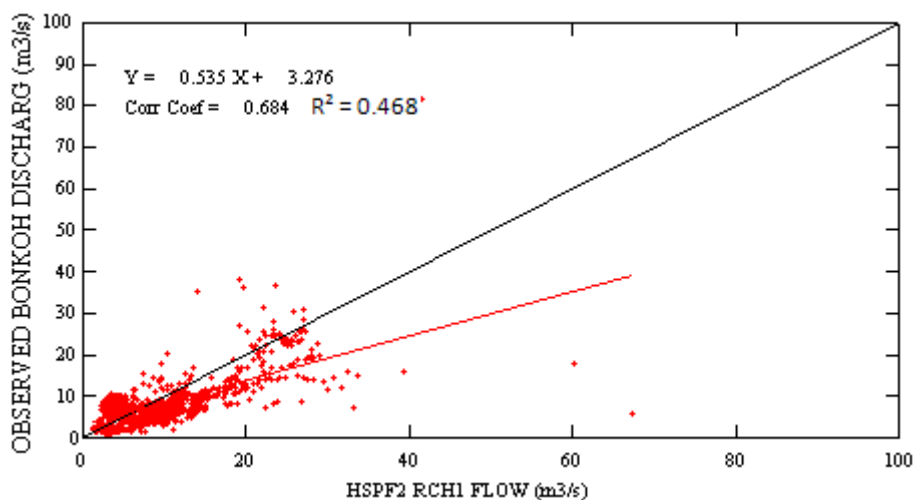
که در آن E، X_{mi}، X_{ci} و \bar{X}_m به ترتیب، ضریب

مشاهداتی و در پاییز (سه ماه آخر هر سال میلادی در شکل) کمتر از مشاهداتی برآورد می‌کند. شکل ۴ نیز مقادیر مشاهداتی در برابر شبیه‌سازی شده مدل در دوره واسنجی را به همراه ضرایب همبستگی، رگرسیون و خط ۴۵ درجه (خط حداکثر انطباق بین دو مقادیر) نشان می‌دهد. آنچه از این شکل برمی‌آید اختلاف بین دو مقادیر داده‌ها خصوصاً برای جریان‌های بالا زیاد بوده و در مجموع، مقادیر شبیه‌سازی کمتر از مشاهداتی است.

دسترسی به داده‌های هواشناسی و جریان رودخانه، دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی را شامل می‌شود و می‌توان گفت شرایط هواشناسی متغیری، از جریان‌های پیک تا جریان‌های کم در این دوره حاکم بوده است. شکل ۳ بهترین هیدروگراف ممکن مرحله واسنجی را نشان می‌دهد که با نرم‌افزار HSPEXP حاصل شد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مدل جریان‌های شبیه‌سازی را در اواخر بهار بزرگ‌تر از



شکل ۲. هیدروگراف جریان روزانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی مدل ۱۳۷۴ - ۱۳۷۸ به همراه داده‌های بارش

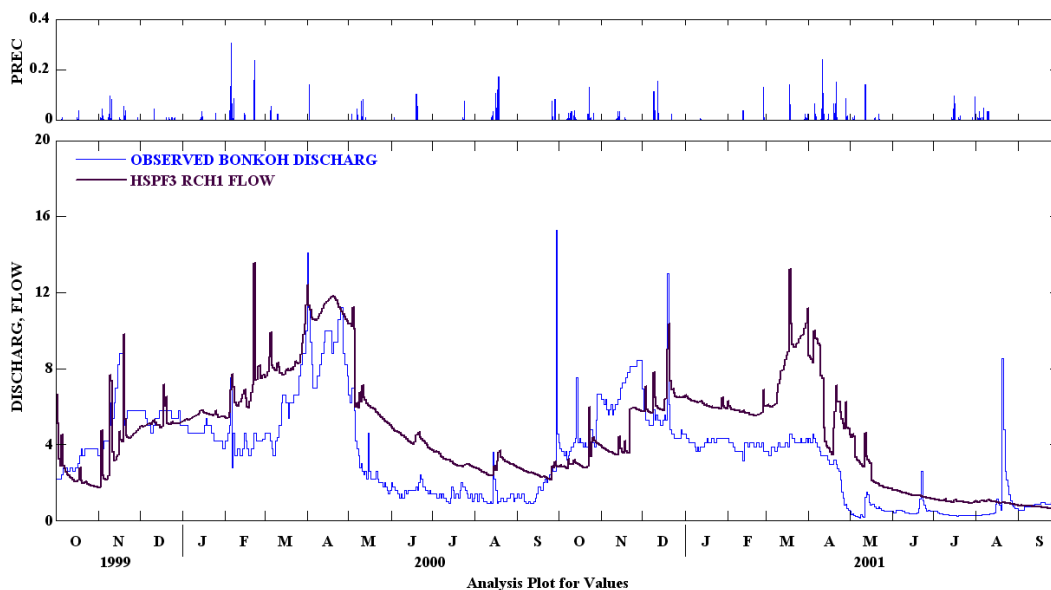


شکل ۴. نمودار پراکنندگی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده جریان روزانه در دوره واسنجی مدل ۱۳۷۴ - ۱۳۷۸

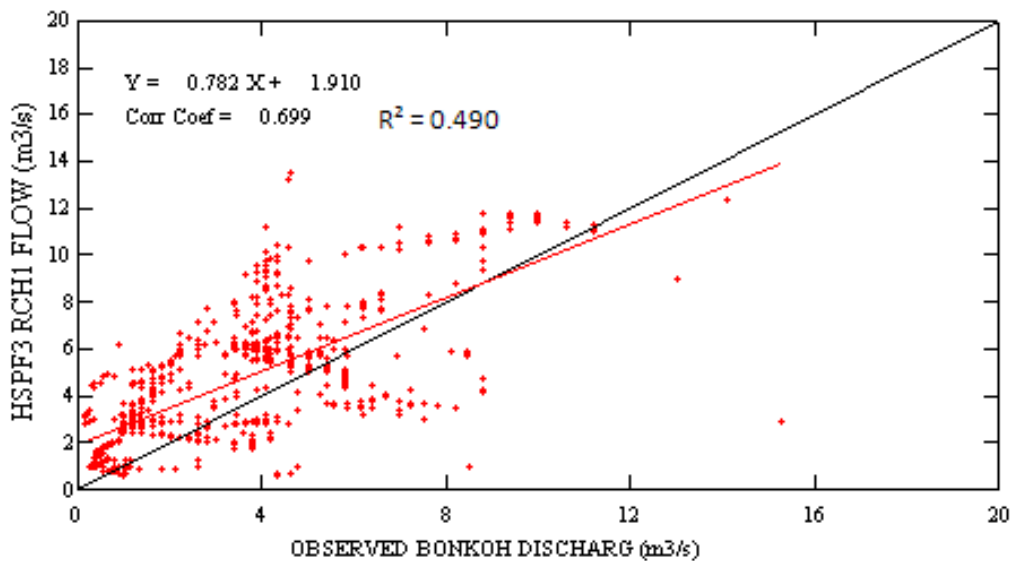
۲.۳. نتایج اعتبارسنجی مدل

برای بررسی میزان اعتماد به نتایج مدل در مرحله واسنجی، دو سال بعد دوره واسنجی، یعنی سال‌های ۱۳۷۸ - ۱۳۸۰، دوره اعتبارسنجی انتخاب شد. شکل ۵

هیدروگراف این دوره و شکل ۶ نمودار پراکندگی داده‌های شبیه‌سازی شده مدل با مشاهداتی را نشان می‌دهد.



شکل ۵. هیدروگراف جریان روزانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره اعتبارسنجی مدل ۱۳۷۸ - ۱۳۸۰ به همراه داده‌های بارش



شکل ۶. نمودار پراکندگی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده جریان روزانه در دوره واسنجی مدل ۱۳۷۴ - ۱۳۷۸

۳.۳. ارزیابی کلی شبیه‌سازی جریان

به منظور ارزیابی کلی مدل، ضریب کارایی مدل با استفاده از معادله ناش و سوتکلیف (۱۹۷۰)، ضریب رگرسیون (R^2) و ضریب همبستگی (r) در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی مدل در جدول ۳ ارائه گردید. با تلاشی که در دوره واسنجی صورت گرفت تا بیشترین انطباق بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی جریان وجود داشته باشد؛ اما نمودار پراکندگی نشان داد که

مقادیر شبیه‌سازی شده از طریق مدل در دوره واسنجی همواره کمتر از مشاهداتی است. حال اگر نتایج و شکل نمودار پراکندگی دوره اعتبارسنجی نیز مانند دوره واسنجی بود، باید مقادیر پارامترهای مدل دوباره تعدیل می‌شدند؛ اما این عمل اتفاق نیفتاد و در واقع می‌توان گفت اختلاف دو شکل ۴ و ۶ خطای بیشتر داده‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مقادیر معیارهای ارزیابی مدل در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل

معیار	دوره واسنجی	دوره اعتبارسنجی
ضریب کارایی مدل	۰٫۷۷	۰٫۱۸
ضریب رگرسیون (R^2)	۰٫۴۶۸	۰٫۴۹
ضریب همبستگی (r)	۰٫۶۸۴	۰٫۶۹۹

۴. بحث و نتیجه‌گیری

مدل HSPF برای شبیه‌سازی جریان به انواع داده‌ها نیاز دارد؛ در صورت دسترسی به مجموعه کامل نتایج بهتری حاصل می‌شود. در سایر کشورها با مجموعه کامل داده‌های هواشناسی و اطلاعات زمینی شبیه‌سازی انجام می‌شود؛ اما در شرایط فعلی کشور، داده‌های سازمان‌های هواشناسی و آب منطقه حداقل نیازهای این مدل را برآورده می‌کند. همچنین داده‌های آب منطقه‌ای نیاز به آماده‌سازی به صورت سری زمانی وقوع آن‌ها دارد. از طرفی، تبدیل مقادیر روزانه به مقادیر ساعتی باید با نرم‌افزار و در مورد بارش دستی انجام شود و این مسئله خطای مهمی را در نتایج به دنبال دارد. میزان دقت نقشه‌های تهیه‌شده در نتایج مدل نیز تأثیر بسیار زیاد دارد و باید به اهمیت این نقشه‌ها در تحقیقات به هنگام تهیه بیشتر توجه شود. از نظر تئوری، ساختار مدل آن چیزی است که در مورد بیلان آبی صدق می‌کند، اما در شرایطی نظیر کشورمان و با وجود کمبود تحقیقات و نیز

تعداد پارامتر زیاد که برخی باید ماهانه برای قطعات مختلف تعیین شوند کاربرد این مدل بسیار سخت است. معیارهای ترسیم زیر حوضه‌ها و قطعات همگن و ایجاد زیر حوضه‌های بزرگ و طویل از پایین دست تا بالادست که از نظر جوئی شرایط مختلفی دارند، نیز از عوامل مؤثر در ایجاد خطا در این مدل هستند. این وضعیت در مورد نفوذپذیری قطعات همگن بزرگ که میانگین نفوذپذیری لحاظ می‌شود، نیز صدق می‌کند؛ بنابراین، پیشنهاد می‌شود به جای نقشه کاربری اراضی از تلفیق آن با نقشه نفوذپذیری تحقیقی انجام شود؛ اما باید توجه داشت که مساحت قطعات خیلی کم نباشد و در نهایت، گرچه دوره شبیه‌سازی ۳ - ۵ سال [۳] و حداقل پنج سال متوالی [۷] را برای کالیبره کردن مدل HSPF ایده آل می‌دانند؛ اما شکل به دست آمده برای هیدروگراف جریان نشان می‌دهد در شرایطی مانند شرایط کشورمان حداقل چهار سال کافی نیست.

سپاسگزاری

سایر کاربران مدل در سایت اختصاصی مدل تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

در پایان از راهنمایی‌ها و کمک‌های ارزنده ارائه‌دهندگان مدل آقایان دونوگیان و به‌ویژه جوبس و

References

- [1] Ackerman, D., Schiff, K.C. and Weisberg, S.B. (2005). Evaluating HSPF in an Arid, Urbanized Watershed, *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 41(2): 477-486.
- [2] Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Jobes, T.H. and Donigian A.S. (2001). Hydrological Simulation Program FORTRAN HSPF, Version 12, HSPF User's Manual, EPA.
- [3] Donigian, A.S., Imhoff, J.C., and Bicknell, B.R. (1983). Predicting Water Quality Resulting from Agricultural Nonpoint Source Pollution via Simulation- HSPF In Agricultural Management and Water Quality, 200- F. W. Schaller and G.W. Bailey, eds., Iowa State University Press, Ames, Iowa, 200- 249.
- [4] Donigian J.A., Brian S., Bicknell, R., and Rosselot, K.S. (2009). Watershed Modeling of Copper Runoff to San Francisco Bay from Brake Pad Wear Debris, Water Environment Federation.
- [5] Filoso S., Vallino J., Hopkinson C., Rastetter E. and Claessens L. (2004). Modeling Nitrogen Transport in the Ipswich River Basin, Massachusetts, Using a HSPF, *AWRA*, 1365-1384.
- [6] Flynn, K.M., Hummel, P.R., Lumb, A.M., and Kittle, J.L. (1995). User's Manual for ANNIE, version 2, a Computer Program for Interactive Hydrologic Data Management: *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 4085*, 211p.
- [7] Fontaine, T.A., and Jacomino, V.M.F. (1997). Sensitivity Analysis of Simulated Contaminated Sediment Transport. *American Water Resources Association (JAWRA)*, 33(2), 1458-1467.
- [8] Gallagher, M., Doherty, J. (2007). Parameter Estimation and Uncertainty Analysis for a Watershed Model, *Environmental Modelling and Software 22*: 1000-1020.
- [9] Javan, K. (2010). Investigation of Climate Change on Surface Runoff Using HSPF and PRECIS (case study: Gharasou River Basin in Ardabil Province, *M.Sc. thesis in civil eng. Tarbiat Modarres University, Iran*.
- [10] John, T.A., Wiley, J.B. and Katherine, S.P. (2005). Calibration Parameters Used to Simulate Streamflow from Application of the Hydrologic Simulation Program-FORTRAN Model (HSPF) to Mountainous Basins Containing Coal Mines in West Virginia.
- [11] Kittle, J.L., Jr., Lumb, A.M., Hummel, P.R., Duda, P.B., and Gray, M.H. (1998). A Tool for the Generation and Analysis of Model Simulation Scenarios for Watersheds (GenScn): U.S. Geological Survey *Water-Resources Investigations Report*: 98-4134, 152 p.
- [12] Lumb, A.M., Kittle, J.L. and Flynn, K.M. (1990). User's Manual for ANNIE, a Computer Program for Interactive Hydrologic Analyses and Data Management: *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report*, 4080, 236 p.
- [13] Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). River Flow Forecasting through Conceptual Models, Part I - A discussion of Principles, *Hydrology*, 10: 282-290.
- [14] Nazari, M.A., (2009). Estimation of Snow Melt Runoff Using HSPF, SRM and SWAT (case study: Talar Watershed in Mazandaran Province, *M.Sc. thesis in civil eng. Tarbiat Modarres University, Iran*.
- [15] Senior, L.A. and Edward H.K. (2003). Simulation of Streamflow and Water Quality in the White Clay Creek Subbasin of the Christina River Basin, Pennsylvania and Delaware, 1994-1998, *USGS, Water-Resources Investigations Report 3*, 4031.



- [16] Shenk, G., Wu, J. and Linker, L. (2012). Enhanced HSPF Model Structure for Chesapeake Bay Watershed Simulation. *Environ. Eng.*, 138(9), 949–957.
- [17] Singh, J., Knapp, H.V. and Demissie M. (2008). Hydrologic Modeling of the Iroquois River Watershed Using HSPF and SWAT, *project of Illinois Department of Natural Resources and the Illinois State Geological Survey*.
- [18] Staley, N., Bright, T., Zeckoski, R.W., Benham, B.L. and Brannan, K.M. (2006). Comparison of HSPF Outputs Using FTABLES Generated With Field Survey and Digital Data. *American Water Resources Association (JAWRA)* 42(5):1153-1162.
- [19] Ümit, T.M., Carleton, J.N. and Wellman, M. (2011). Integrated Model Projections of Climate Change Impacts on a North American lake, *Ecological Modelling*, 222: 3380– 3393.
- [20] U.S. Environmental Protection Agency (1999). WDMUtil Version 1.0 (BETA) A tool for managing watershed modeling time-series data user's manual (DRAFT): *U.S. Environmental Protection Agency EPA-823-C-99-001*, 120 p.