

تأثیر انتخاب ایستگاه در بهینه‌سازی پارامترهای مدل پالس مستطیلی بارتلت-لويس اصلاح شده (BLRPM) و عملکرد مدل هیدرولوژیکی HSPF

اسماعیل دودانگه^۱ - کاکا شاهی^{۲*} - کریم سلیمانی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۳۰

چکیده

در این پژوهش جهت مطالعه فرآیند بارش-رواناب در حوضه آبخیز طالقان از برنامه شبیه‌سازی هیدرولوژیکی فترن (HSPF) استفاده شده است. علیرغم دقت بالای مدل HSPF، مشکلات موجود در خصوص اندازه‌گیری بارش در مقیاس‌های زمانی کوتاه مدت (مقیاس ساعتی و کمتر از آن) در حوضه‌های آبخیز، استفاده از مدل مذکور مخصوصاً در شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی طولانی مدت را با مشکل مواجه ساخته است. بدین منظور از مدل پالس مستطیلی بارتلت - لويس با پارامتر تصادفی (BLRPM) جهت گسسته‌سازی داده‌های بارش و تبدیل بارش‌های روزانه به بارش‌های ساعتی مورد نیاز مدل استفاده گردید. پارامترهای مدل با استفاده از داده‌های بارش ساعتی، ۲۴ و ۴۸ ساعته ثبت شده در دوره آماری (۲۰۰۶-۲۰۰۹) در ایستگاه‌های باران‌نگار داخل (جوسان و زیدشت) و مجاور حوضه (کلک چال) برآورد گردید. سپس با استفاده از مدل واسنجی شده به گسسته‌سازی داده‌های بارش روزانه ثبت شده در درون حوضه، در دوره آماری ۱۹۹۵-۲۰۰۵ پرداخته شد. داده‌های بارش ساعتی حاصل از فرآیند گسسته‌سازی، جهت شبیه‌سازی دبی‌های روزانه توسط مدل HSPF به کار گرفته شد. نتایج نشان داد استفاده از داده‌های بارش ساعتی ثبت شده در ایستگاه کلک چال جهت برآورد پارامترهای مدل BLRPM، موجب تولید بارش‌های با شدت زیاد در فرآیند گسسته‌سازی بارش و برآورد بیشتر دبی‌های اوج توسط مدل هیدرولوژیکی می‌گردد. حذف ایستگاه مذکور از فرآیند بهینه‌سازی مدل BLRPM باعث بهبود عملکرد مدل HSPF با ضریب ناش - ساتکلیف ۰/۷۶، ضریب تبیین ۰/۷۹ و خطا (RMSE) ۷/۱۱ گردید. نتایج این مطالعه بیانگر حساسیت مدل HSPF به انتخاب ایستگاه و پارامتر شدت بارش می‌باشد.

کلمات کلیدی: بارش ساعتی، دبی اوج، گسسته‌سازی بارش، نفوذ

مقدمه

رطوبتی خاک) در حوضه آبخیز، پیش‌بینی مقادیر دبی و به ویژه دبی‌های سیلابی به عنوان یکی از چالش‌های پیش روی علم هیدرولوژی است (۲۰). در این راستا انتخاب مدل مناسب هیدرولوژیکی که بتواند پیچیدگی‌ها و روابط غیرخطی موجود در فرایندهای روابط بارش-رواناب این مناطق را به درستی شبیه‌سازی نماید حائز اهمیت است. انواع متفاوتی از مدل‌های هیدرولوژیکی با درجات مختلف پیچیدگی جمله مدل HEC-HMS (۱۶)، SWAT (۴)، IHACRES (۲۳)، HSPF (۱۲) و ... جهت شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در مناطق خشک و نیمه خشک ارائه گردیده است. برخی از این مدل‌ها از جمله مدل HSPF دارای پیچیدگی بیشتری نسبت به سایر مدل‌های می‌باشند و نیاز به داده‌های ورودی با جزئیات بیشتر می‌باشند. عدم کفایت زمانی و مکانی داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی در اکثر حوضه‌های آبخیز در کشورمان محققین را مجبور به استفاده از مدل‌های ساده‌تر یا نیازمندی‌های کمتر کرده است. محدودیت زمانی و مکانی در خصوص داده‌های بارش ساعتی

بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیکی با هدف برآورد دقیق از مقادیر سیل بسط و گسترش یافته‌اند (۴۵). برای دستیابی به این هدف مدل‌های هیدرولوژیکی متنوعی از جمله مدل‌های مفهومی ساده تا مدل‌های توزیعی فیزیکی و نیز مدل‌های مبتنی بر وقایع ایجاد و به طور گسترده در علم هیدرولوژی به کار گرفته شده‌اند (۴۱). در مناطق مرطوب اغلب این مدل‌ها می‌توانند فرایندهای هیدرولوژیکی را به طور مناسب شبیه‌سازی نمایند (۴۴). در حالیکه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل ناهمگنی‌های زمانی و مکانی شدید در متغیرهای هیدرولوژیکی (از جمله بارش، تولید رواناب، تبخیر و تعرق و تغییرات

۱، ۲ و ۳ - به ترتیب دانشجوی دوره دکتری، دانشیار و استاد گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
(*)-نویسنده مسئول: Email: kaka.shahedi@gmail.com
DOI: 10.22067/jsw.v31i3.62710

ساعتی مورد نیاز مدل از روش خطی ساده جهت گسسته‌سازی بارش‌های شش ساعته و تبدیل آن به بارش‌های ساعتی بهره گرفتند. علوی‌نیا و فرزین صالح (۲) از روش تقلیل ساده جهت گسسته‌سازی داده‌های بارش ۶ ساعته و تبدیل آن به بارش‌های ساعتی مورد نیاز مدل HSPF جهت شبیه‌سازی رسوب حوضه آبخیز ابرو (با مساحت ۲۲۰ کیلومتر مربع) در استان همدان بهره گرفتند. روش مذکور برای گسسته‌سازی بارش در مناطق مرطوب با بارشهای یکنواخت می‌تواند کاربرد داشته باشد. با این حال در مناطق خشک و نیمه خشک (از جمله در منطقه مطالعه) با تغییرات زمانی شدید شدت بارش استفاده از مدل مذکور نمی‌تواند نمایش صحیحی از الگوی بارش در منطقه را ایجاد نماید. اولین تلاش‌ها برای نمایش صحیح فرایندهای فیزیکی بارش با ارائه روش‌های پواسون خوشه آغاز شد. در این روش نمایش صحیحی از پدیده بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف از طریق یک رویکرد ساده ارائه می‌شود. کوتسویانیس و انف (۲۹) با توسعه روش‌های مبتنی بر پواسون خوشه، مدل پالس مستطیلی بارتلت-لوپس (BLRP) را ارائه نمودند. در این روش برای یک شباهت وقایع بارش مدل چندین بار اجرا می‌شود و توالی که بیشترین شباهت را با داده‌های واقعی داشته باشد انتخاب می‌گردد. استفاده از مدل مذکور مستلزم بهینه‌سازی صحیح پارامترهای مدل با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای می‌باشد. انواع مختلفی از مدل‌های بارتلت-لوپس وجود دارند: مدل پالس مستطیلی بارتلت - لوپس (BLRP) (مدل اولیه)، مدل پالس مستطیلی بارتلت-لوپس با پارامتر تصادفی BLRPM (مدل اصلاح شده) و مدل پالس مستطیلی بارتلت-لوپس با پارامتر تصادفی BLRPM و با همبستگی بین شدت و مدت. در نسخه اولیه مدل (BLRP) علیرغم شبیه‌سازی قابل قبول مشخصات آماری داده‌های بارش، ویژگی‌های زمانی مربوط به فرایندهای بارش در تمامی رخدادهای بارش ثابت در نظر گرفته می‌شد در نتیجه مدل توانایی شبیه‌سازی بارش‌های مختلف با تداوم و شدت‌های متفاوت و همچنین تغییرپذیری پارامترهای مربوط به بارش در درون هر رخداد را نداشت (۲۸). جهت غلبه بر این مشکل و به منظور افزایش توانایی مدل جهت شبیه‌سازی بارش‌های مختلف با ویژگی‌های آماری متفاوت، رودریگو و همکاران (۳۶) نسخه اصلاح شده مدل BLRPM را ارائه دادند که در آن مشخصات بارش از تابع توزیع گاما با دو پارامتر شکل و مقیاس تبعیت میکنند که از یک رخداد به رخداد دیگر متغیر بود. کاربردهای زیادی از مدل BLRPM در سال‌های اخیر در بین محققین در نقاط مختلف دنیا گزارش گردیده است (۳۹، ۱، ۳۴ و ۱۶) با اینحال تاکنون مطالعه‌ای در خصوص اثر انتخاب داده‌ها بر روی بهینه‌سازی پارامترهای مدل و استفاده عملی از خروجی آن گزارش نشده است. در این مطالعه سعی خواهد شد اثر استفاده از داده‌های ایستگاه‌های مختلف بارانسنجی با رژیم بارش متفاوت بر روی بهینه‌سازی پارامترهای مدل و خروجی آن بررسی شود. در همین

موجود در کشور مخصوصاً در مناطق خشک و نیمه خشک موجب شده است تا محققین از مدل‌های هیدرولوژیکی با داده‌های بارش روزانه به عنوان ورودی جهت شبیه‌سازی دبی استفاده کنند. مدل‌های هیدرولوژیکی از جمله مدل SWAT، HEC-HMS و IHACRES از جمله نمونه‌هایی از این قبیل مدل‌ها با داده‌های بارش روزانه به عنوان ورودی مدل می‌باشند که استفاده از آنها در بین محققین عمومیت دارد. گزارشات مختلفی در خصوص عدم کارایی برخی از این مدل‌ها در شبیه‌سازی دبی‌های حداکثر در مناطق خشک و نیمه خشک گزارش گردیده است. به عنوان مثال در خصوص مدل IHACRES، زارعی و همکاران (۴۶) در حوضه آبخیز کسلیان (با مساحت ۶۶/۷ کیلومتر مربع)، دوستی و همکاران در حوضه آبخیز تمر (با مساحت ۱۵۲۵ کیلومتر مربع) (۱۵)، آشفته و مساح بوانی (۵) در حوضه آبخیز آیدوغموش (با مساحت ۸۰ کیلومتر مربع) بر عدم توانایی مدل مذکور در شبیه‌سازی صحیح دبی‌های حداکثر تاکید داشتند که یکی از دلایل آن استفاده از داده‌های بارش روزانه جهت شبیه‌سازی رواناب می‌باشد. مدل هیدرولوژیکی HSPF یکی از مدل‌های هیدرولوژیکی با دقت زیاد و استفاده گسترده می‌باشد که از الگوریتم بارش مازاد بر نفوذ جهت شبیه‌سازی رواناب‌های سطحی بهره می‌گیرد (۲۵). مدل مذکور با پیچیدگی نسبتاً زیاد جهت شبیه‌سازی دبی روزانه به داده‌های بارش ساعتی به عنوان ورودی مدل نیاز دارد که باعث ایجاد محدودیت در استفاده از مدل مذکور در کشور گردیده است. مدل HSPF جهت مدلسازی هیدرولوژی حوضه‌های آبخیز در بسیاری از نقاط دنیا مورد استفاده قرار گرفته است (۸، ۲۱، ۲۲، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۷، ۳۸ و ۴۰) با این حال مطالعات کمی در خصوص استفاده از مدل مذکور در کشور گزارش گردیده (۲ و ۱۷) که دلیل آن محدودیت در داده‌های بارش ساعتی می‌باشد. اگرچه داده‌های بارش ساعتی در تعدادی از سال‌ها و برای تعدادی از ایستگاه ثبت گردیده است. اما داده‌های موجود فاقد پیوستگی و جامعیت آماری لازم می‌باشند و از طرفی در شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی نیاز به داده‌های پیوسته در مقطع زمانی طولانی مدت می‌باشد (۹). جهت غلبه بر این مشکل تکنیک‌های گسسته‌سازی بارش جهت تبدیل بارش از مقیاس‌های زمانی بزرگتر به مقادیر بارش در مقیاس‌های زمانی کوچکتر (مقیاس ساعتی و یا کمتر از آن) ارائه گردید که مورد نیاز بسیاری از کاربردهای هیدرولوژیکی از جمله مدلسازی فرسایش (۲۴)، شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه در مدلسازی سیل و طراحی سرریزها (۱۱، ۳۹ و ۷) می‌باشد. در روش گسسته‌سازی خطی (۳۰) فرض بر این است که واقعه بارش در تمام طول روز ادامه داشته است و از همین رو هر واقعه بارش به طور تصادفی به ۲۴ بخش تقسیم می‌شود. فرزند و همکاران (۱۷) از مدل هیدرولوژیکی HSPF جهت شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه آبخیز بالخلی (با مساحت ۱۲۱۴ کیلومتر مربع) در مناطق مرطوب اردبیل سود جستند. آنها جهت فراهم کردن داده‌های بارش

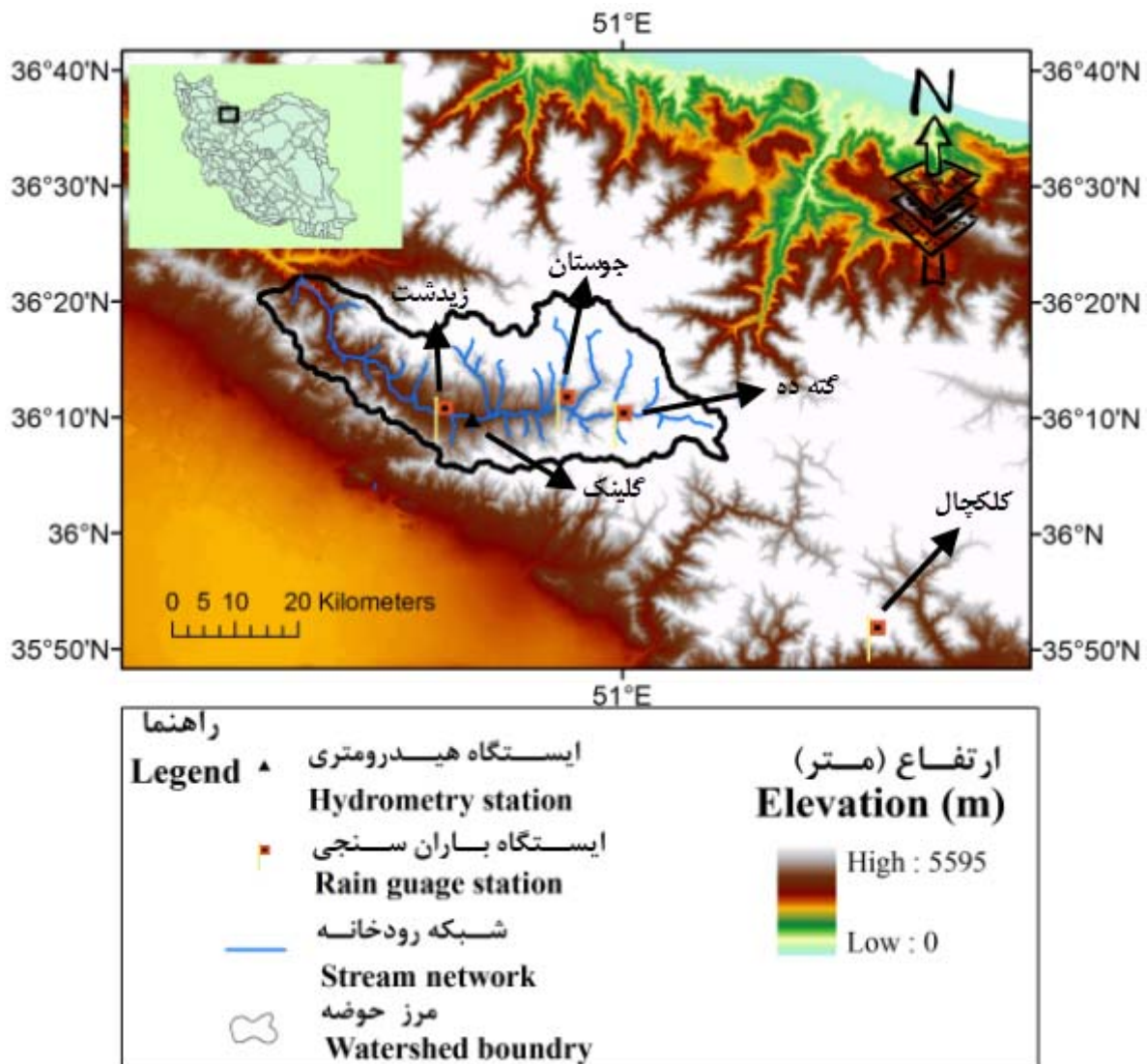
الموت، از جنوب به منطقه زیاران، از شرق به بخشی از حوضه آبخیز کرج و از غرب به حوضه آبخیز شاهرود محدود گردیده است (۲۷). میانگین سالانه بارندگی در ایستگاه گلینک ۴۴۶ میلیمتر و میانگین درجه حرارت سالیانه در حدود ۹+ درجه سانتی‌گراد است. متوسط حداکثر دما ۲۷+ و متوسط حداقل دما ۱۱- درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. کاربری فعلی در منطقه شامل مراتع، اراضی زراعی دیم، اراضی زارعی آبی (باغ) و اراضی صخره‌ای فاقد پوشش گیاهی می‌باشد. بخش اعظم منطقه شامل مراتع فقیر تا خوب است. اراضی زراعی باغی به ویژه باغات متمرکز در مناطق کم شیب در حاشیه رودخانه‌های فرعی و رودخانه اصلی است و اراضی دیم نیز در مناطقی با شیب ۲۰-۸۰ درصد گسترش دارند (۳۵).

راستا تاثیر نتایج حاصل از گسسته‌سازی با استفاده از مقادیر بهینه شده پارامترها بر روی عملکرد مدل HSPF مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه

حوضه آبخیز طالقان از نظر مختصات جغرافیایی بین ۳۶ درجه و ۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۳ دقیقه شمالی و ۵۰ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). حوضه آبخیز طالقان با مساحتی برابر با ۱۳۲۰۰۰ هکتار یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبخیز سفیدرود است که از شمال به حوضه



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز طالقان و ایستگاه‌های مورد استفاده در تحقیق
Figure 1- Location of Taleghan watershed and stations used in this study.

ایستگاه گلینک در خروجی حوضه آبخیز طالقان در دوره پنج ساله ۱۹۹۵/۹/۲۳ تا ۲۰۰۰/۹/۲۳ جهت واسنجی مدل استفاده گردید و سپس مدل واسنجی شده جهت تخمین مقادیر دبی روزانه در آبراهه شماره ۲۷ (محل قرارگیری ایستگاه هیدرومتری گلینک در خروجی حوضه آبخیز طالقان) در دوره ۵ ساله ۲۰۰۰/۹/۲۳ تا ۲۰۰۵/۹/۲۳ بکار گرفته شد و به منظور صحت سنجی مدل، نتایج با داده‌های ثبت شده ایستگاه گلینک در دوره آماری مذکور مورد مقایسه قرار گرفت.

مدل گسسته سازی بارتلت-لویس (BLRP)

مدل گسسته‌سازی بارش BLRP متعلق به طبقه مدل‌های خوشه‌ای پواسون می‌باشد که جهت شبیه‌سازی وقایع بارش از طریق خوشه‌هایی از پالس‌های مستطیلی که در یک زمان پیوسته اتفاق می‌افتند (۲۸)، مفروضات اصلی مدل BLRP به شرح زیر است (۳۶):
شروع وقایع بارش t_i از فرایند پواسون با نرخ λ تبعیت می‌کند.
شروع هر سلول بارش t_{ij} از فرایند پواسون با نرخ β تبعیت می‌کند.

خاتمه هر واقعه بارش بعد از زمان v_i اتفاق می‌افتد که از توزیع نمایی با پارامتر γ تبعیت می‌کند.

هر سلول بارش تداوم برابر با w_{ij} دارد که از توزیع نمایی با پارامتر η تبعیت می‌کند.

هر سلول دارای شدت یکنواخت با مقدار X_{ij} می‌باشد که از یک توزیع معین تبعیت می‌کند.

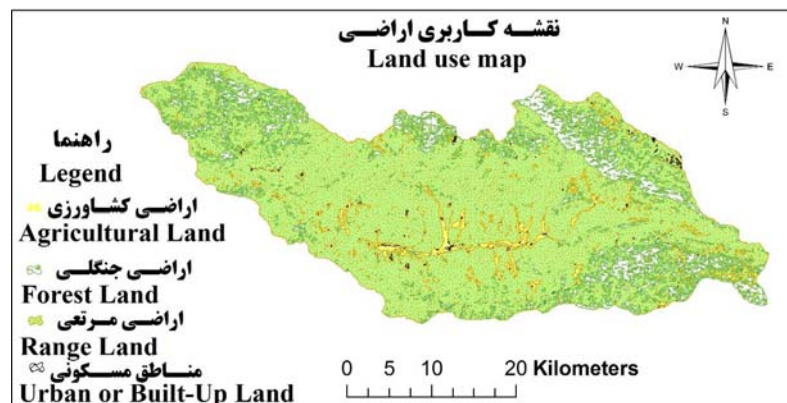
در نسخه اصلاح شده (BLRPM) که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است پارامتر η به طور تصادفی از یک واقعه به واقعه دیگر براساس توزیع گاما با پارامترهای شکل α و مقیاس ν تغییر می‌کند. در نتیجه پارامترهای β و γ طوری تغییر می‌کنند که نسبت $k = \beta/\eta$ و $\phi = \gamma/\eta$ ثابت بمانند. توزیع شدت سلول‌ها X_{ij} فرض می‌شود که از توزیع گاما دو پارامتری با میانگین μ_X و انحراف معیار $1/\sigma_X$ (sx) تبعیت می‌کند. شکل ۴ نمایشی از مدل بارتلت-لویس می‌باشد. پارامترهای (mx) و (sx) دارای واحد میلیمتر و پارامترهای λ و ν دارای واحد روز می‌باشند. در این مدل‌ها فرض بر این است که وقایع بارش بر اساس فرایند پواسون اتفاق می‌افتند به طوری که هر واقعه بارش متشکل از گروهی از سلول‌ها می‌باشد که از نظر زمانی با شروع وقایع بارش ارتباط دارند. در این فرایند فرض می‌شود که تداوم سلول‌های بارش از یک توزیع نمایی با شدت ثابت تبعیت می‌کند که منجر به ایجاد پالس‌های مستطیلی شکل می‌شود (شکل ۴). مزیت اصلی این مدل توانایی آن در تولید سری‌های زمانی بارش می‌باشد که قابلیت شبیه‌سازی بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف را مقدور می‌سازد و قابلیت نمایش فرایندهای فیزیکی بارش را دارا می‌باشد (۲۸).

جمع‌آوری داده‌ها (داده‌های مکانی و اطلاعات اقلیمی)

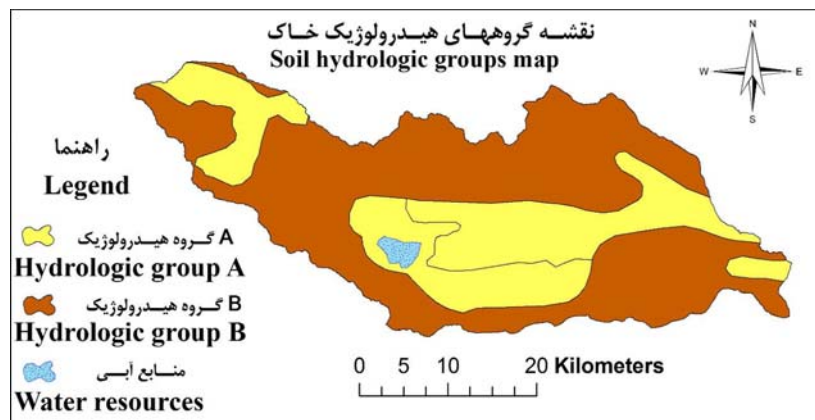
داده‌های مورد نیاز مدل HSPF در دو گروه داده‌های مکانی (نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک و مدل رقومی ارتفاعی، شبکه هیدروگرافی و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد استفاده) و داده‌های اقلیمی جمع‌آوری گردید. نقشه کاربری اراضی با بکارگیری الگوریتم طبقه‌بندی نظارت شده فازی در محیط نرم افزار Idrisi تهیه گردید. ابتدا تصاویر ماهواره لندست ۷ از منطقه مورد مطالعه مربوط به سال ۱۹۹۹ از سایت زمین شناسی ایالات متحده (<http://earthexplorer.usgs.gov>) اخذ گردید. تصویر رنگی کاذب (FCC) با ترکیب باندهای ۳، ۴، ۷ جهت تشخیص بهتر پوشش کاربری اراضی ایجاد گردید. با استفاده از نمونه‌های واقعی، لایه نمونه‌های تعلیمی بر روی تصویر رنگی ساخته شده ایجاد گردید. سپس از الگوریتم طبقه بندی فازی ARTMAP جهت طبقه‌بندی پوشش کاربری اراضی حوضه آبخیز در چهار گروه اصلی اراضی کشاورزی، اراضی مرتعی، مناطق مسکونی یا ساخته شده و اراضی جنگلی استفاده گردید (شکل ۲). نقشه خاک منطقه مطالعه نیز که برای واسنجی پارامتر نفوذ در مدل HSPF مورد نیاز است از سایت سازمان خوار و بار جهانی - فائو (www.FAO.org) اخذ گردید (شکل ۳). مدل رقومی ارتفاعی منطقه مطالعه با بزرگ نمایی ۳۰ در ۳۰ متر از سایت زمین شناسی ایالات متحده اخذ گردید. مشخصات هیدروژئومورفیک منطقه مطالعه از جمله مساحت حوضه، میانگین شیب حوضه، طول آبراهه‌ها، ارتفاع حداکثر، حداقل و شیب آبراهه‌ها، عرض میانگین آبراهه‌ها، عمق میانگین آبراهه‌ها، مساحت بالادست و پایین‌دست هر آبراهه با استفاده از ابزار تعیین خودکار در محیط نرم افزار BASINS41 از روی مدل رقومی ارتفاعی منطقه ایجاد گردید. داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیک مورد نیاز مدل شامل داده‌های بارش، تبخیر و تعرق، سرعت باد، تابش آفتاب دمای نقطه شبنم و پوشش ابر می‌باشد که در قالب فایل مدیریت آبخیز (WDM²) ذخیر می‌شود و به عنوان ورودی مدل جهت شبیه‌سازی داده‌های دبی روزانه با استفاده از پارامترهای واسنجی شده مدل از طریق داده‌های مکانی (کاربری اراضی و خاک و شیب) به کار می‌رود. جهت تهیه داده‌های ساعتی بارش مورد نیاز مدل HSPF از مدل گسسته‌سازی بارش BLRPM استفاده گردید. بدین منظور داده‌های بارندگی ساعتی ثبت شده در ایستگاه‌های بارانسنجی در دوره آماری ۲۰۰۶-۲۰۰۹ جهت برآورد پارامترهای مدل BLRPM مورد استفاده قرار گرفت. سپس مدل واسنجی شده جهت گسسته‌سازی داده‌های بارش روزانه در دوره آماری ده سال ۱۹۹۵-۲۰۰۵ به کار گرفته شد. داده‌های دبی روزانه

1 -False Color Composite

2 -Watershed Data Management



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی منطقه مطالعه
Figure 2- Land use map of the study region



شکل ۳- نقشه گروه‌های هیدرولوژیک خاک در منطقه مطالعه
Figure 3- Map of soil hydrologic groups in the study regions

پارامترهای مدل از طریق برازش‌های متوالی مدل به داده‌های مورد نظر با استفاده از روش گرادینان کاهشی تعمیم یافته^۱ (GRG) (۱۰) به نحوی انجام شد که بیشترین شباهت بین آماره‌های واقعی و شبیه‌سازی شده و کمترین میانگین خطای وزنی حاصل شود. باتوجه به اهمیت میانگین بارش نسبت به بقیه پارامترها، در محاسبه خطای وزنی با ضریب ۱۰ در نظر گرفته شد. برای بقیه پارامترها ضریب ۱ لحاظ گردید.

برنامه شبیه‌سازی هیدرولوژیکی فترن (HSPF)

برنامه شبیه‌سازی هیدرولوژیکی فترن (HSPF) یک برنامه مفهومی شبیه‌سازی کیفیت آب و هیدرولوژی حوضه آبخیز می‌باشد که کاربردهای وسیعی در دنیا داشته است. مدل مذکور در یک قالب آماری تحت حمایت سازمان حفاظت محیط زیست (EPA^۲) جهت

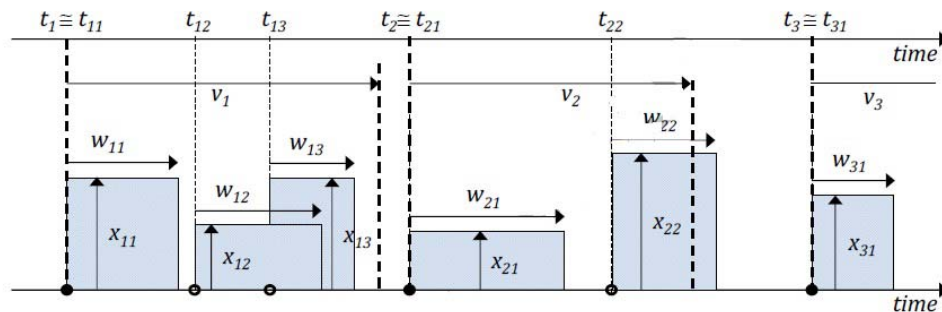
جهت گسسته‌سازی داده‌های بارش نسخه اصلاح شده نسخه اصلاح شده مدل BLRPM با هفت پارامتر λ ، ϕ ، k ، a ، v ، μx و σx جهت برازش به داده‌های ساعتی حوضه در دو حالت همگن از جهت مشخصات شدت و مدت بارش (داده‌های بارش ساعتی داخل حوضه) و ناهمگن (در حالت استفاده از داده‌های بارش ساعتی ایستگاه کلک چال در بیرون از حوضه) به کار گرفته شد. به منظور بهینه‌سازی پارامترهای مدل، داده‌های بارش ساعتی مربوط به دوره زمانی ۲۰۰۶-۲۰۰۹ در ایستگاه‌های بارانسنجی جویستان و زیدشت (داخل حوضه) و کلک چال (خارج حوضه) استفاده گردید. برآورد پارامتر مدل BLRPM با استفاده از مشخصات آماری داده‌های بارش ساعتی، ۲۴ و ۴۸ ساعته از جمله میانگین، واریانس، اتوکواریانس در تاخیر ۱ (میزان خودهمبستگی داده‌ها در تاخیر اول) و نسبت خشکی (نسبت دوره‌های خشک یا بدون بارش به مجموع دوره‌های خشک و مرطوب) انجام شد. ابتدا کلیه ایستگاه‌های باران سنجی داخل و مجاور حوضه در نظر گرفته شد و مشخصات آماری داده‌ها محاسبه گردید. بهینه‌سازی

1-Generalized Reduced Gradient (GRG)

2-Environmental Protection Agency

غیرنقطه‌ای (NPS) (۱۳) و ۳- برنامه شبیه‌سازی هیدرولوژیک (HSP) (۱۲) می باشد.

شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه آبخیز توسعه یافته است (۳). مدل مذکور حالت بسط یافته سه مدل ۱- مدل مدیریت رواناب کشاورزی EPA (ARM) (۱۴) ۲- مدل رواناب منابع



شکل ۴- نمایشی از فرایند خوشه‌بندی در مدل بارتلت-لوپس. نقاط پر نشان دهنده شروع وقایع بارش و نقاط توخالی نشان دهنده شروع سلول‌های بارش می‌باشند (۲۸).

Figure 4- Schematic representation of the Bartlett-Lewis clustering mechanism. Filled circles denote storm origins while open circles denotes cell arrivals (28)

گام زمانی فصلی، دو فصل زمستان و تابستان در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای دیگر از جمله پارامتر DEEPR (بخشی از آب زیرزمینی که به آب زیرزمینی غیرفعال جریان پیدا می‌کند) نیز بر روی حجم رواناب سالانه اثر می‌گذارند. واسنجی پارامترها در مقیاس فصلی نیز بر اساس پارامترهای LZSN و UZSN صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه ذخیره زون فوقانی (UZSN) در فصل زمستان نزدیک به اشباع است و میزان تبخیر حداقل است بنابراین تغییر مقدار ذخیره اسمی (UZSN) در زمستان کمترین تأثیر و در تابستان بیشترین تأثیر را دارد. زیرا در فصل تابستان هدر رفت‌ها از ذخیره زون فوقانی به دلیل مقادیر بالای تبخیر و تعرق 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 اکثر مواقع حتی در زمان رگبارهای تابستانی خالی است. در مرحله بعد پارامترهای مدل در گام زمانی ماهانه مورد واسنجی قرار می‌گیرد. در گام زمانی ماهانه امکان واسنجی همه پارامترها وجود دارد و می‌توان مقادیر پارامترها را در هر ماه به طور جداگانه مورد واسنجی قرار داد. و در مرحله آخر نیز واسنجی پارامترها به منظور نزدیک‌تر شدن مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مقادیر حدی از جمله جریان‌های حداکثر و حداقل انجام می‌شود که تحت کنترل پارامترهایی نظیر نفوذ (INFILT) و پارامتر تبخیر و تعرق ناحیه تحتانی (LZETP) است. پارامترهای UZSN، LZSN، AGWRC (میزان خشکیدگی آب پایه) و IRC (پارامتر خشکیدگی جریان آب پایه) ارتباط دارد زیرا مقدار INFILT، تخصیص آب را در پروفیل خاک تعیین خواهد کرد. LZETP (شاخص تبخیر و تعرق از ناحیه تحتانی) ضریبی است که برای تعیین تبخیر و تعرق استفاده می‌شود و بر مقدار تبخیر و تعرق از

مدل مذکور شامل سه زیربخش یا مدول می‌باشد که جهت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی حوضه آبخیز به کار می‌روند. شکل ۵ نشان دهنده ساختار مدل و پارامترهای کلیدی مدل می‌باشد که در طول فرایند واسنجی مدل بهینه می‌شوند. مدول PERLAND جهت شبیه‌سازی رواناب در مناطق نفوذپذیر در حوضه به کار گرفته می‌شود که اصلی‌ترین بخش مدل HSPF می‌باشد که جهت شبیه‌سازی رواناب‌های سطحی، زیرسطحی و زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدول IMPLAND جهت شبیه‌سازی رواناب در مناطق غیر قابل نفوذ به کار می‌رود. این بخش جهت شبیه‌سازی رواناب در مناطق شهری که مقادیر نفوذ کم و یا غیرقابل نفوذ می‌باشند به کار می‌رود. مدول REACHS جهت شبیه‌سازی حرکت رواناب در داخل آبرهاها و کانال‌ها و مخازن ذخیره آب به کار می‌رود (۳).

واسنجی مدل HSPF

واسنجی پارامترهای مدل با استفاده از رهنمودهای ارائه شده در یادداشت فنی BASINS41 (۶) و بر اساس محدوده مقادیر پیشنهاد شده در جدول ۱ انجام شد. در این روش مراحل فرایند واسنجی، از گام زمانی بزرگ به کوچک به ترتیب برای دوره‌های زمانی سالانه، فصلی، ماهانه و وقایع حدی انجام می‌شود. در گام زمانی سالانه، پارامترهای ظرفیت اسمی ذخیره ناحیه فوقانی (LZSN) و ظرفیت اسمی ذخیره ناحیه تحتانی (UZSN) جهت شبیه‌سازی صحیح حجم کلی رواناب با در نظر گرفتن هدر رفت‌های حوضه از جمله انحراف‌های جریان، تبخیر و تعرق و هدر رفت ناشی از تراوش عمیق واسنجی می‌گردد. در این مرحله واسنجی پارامترهای پارامترهای ذکر شده به گونه‌ای انجام می‌شود که مجموع حجم رواناب سالانه شبیه‌سازی شده به مقادیر مشاهده‌ای نزدیک گردد. در مرحله بعد و

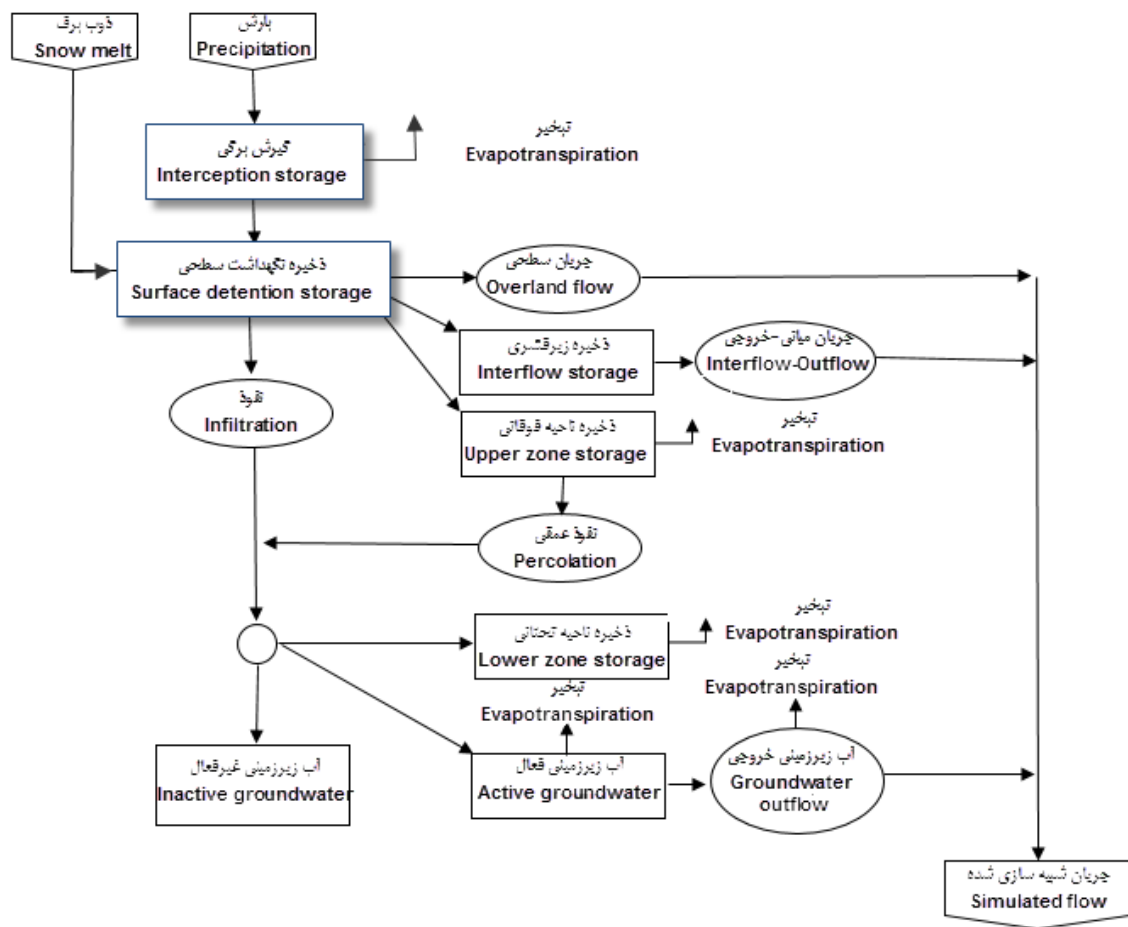
گرفتند، میانگین خطای وزنی برابر با ۱/۰۳ حاصل گردید. در این حالت بیشترین خطای وزنی مربوط به اتوکواریانس تاخیر ۱ در داده‌های روزانه برابر با ۰/۷ به دست آمد. سپس جهت همگن‌سازی داده‌های ورودی از جهت مشخصه‌های شدت و مدت بارش، داده‌های ایستگاه کلک چال از انجام محاسبات حذف گردید و آماره‌های مربوط به داده‌ها مجدداً محاسبه گردید که مقادیر مربوط به پارامترها در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی آماره‌ها با استفاده از مدل BLRPM در جدول ۲ نشان دهنده بهبود عملکرد مدل پس از حذف ایستگاه کلک چال می‌باشد. به طوریکه میانگین خطای وزنی مدل در شبیه‌سازی به مقدار ۰/۳۶ تقلیل یافت. میزان خطای وزنی برآورد برای تمامی پارامترها در حالت عدم استفاده از داده‌های ایستگاه کلک چال نسبت به حالت استفاده از آن کاهش یافته است. به عنوان مثال خطای وزنی محاسبه اتوکواریانس تاخیر ۱ به میزان ۰/۷ در حالت استفاده از داده‌های ایستگاه کلک چال، به مقدار ۰/۰۷ در حالت عدم استفاده از داده‌های مربوط به ایستگاه مذکور کاهش یافته است.

ناحیه تحتانی که ذخیره عمده رطوبت خاک و منطقه ریشه در پروفیل خاک را نشان می‌دهد، اثر می‌گذارد. شیب هیدروگراف بوسیله پارامترهای INFILTR (شاخص ظرفیت نفوذ) و IRC تعیین می‌گردد. شبیه‌سازی جریان‌های حداقل و همچنین بیلان آب سالانه تحت کنترل پارامتر BASET (بخشی از تبخیر و تعرق پتانسیل که از جریان آب پایه صورت می‌گیرد) می‌باشد. مقادیر پیشنهادی برای مقادیر پارامترهای مدل در جدول ۱ ارائه گردیده است. واسنجی مقادیر پارامترها در محدوده‌های پیشنهادی در محیط برنامه WinHSPF3 متعلق به برنامه BASINS41 (۳) انجام شد.

نتایج و بحث

گسسته سازی بارش

نتایج محاسبه آماره‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده میانگین، واریانس، اتوکواریانس تاخیر ۱ و نسبت خشکی در جدول ۲ آمده است. با توجه به نتایج جدول ۲ در حالتی که داده‌های کلیه ایستگاه‌های بارانسنجی جهت برآورد پارامترهای مدل BLRPM مورد استفاده قرار



شکل ۵- نمایش تصویری فرایندها در مدل هیدرولوژیکی HSPF (۳)
Figure 5- graphical illustration of the process in HSPF model (3)

جدول ۱- پارامترهای اصلی مدل HSPF جهت شبیه‌سازی دبی روزانه (۶)
 Table 1- The main parameters of the HSPF model for daily stream flow simulation (6)

پارامتر Parameter	واحد Unit	مقادیر پیشنهادی Suggested values		توضیح Description
		حداکثر Max	حداقل Min	
INFILT	In/hr	0.5	0.001	شاخص ظرفیت نفوذ Index of infiltration capacity
AGWRC	none	0.999	0.85	میزان خشکیدگی آب پایه Base groundwater recession
LZSN	inches	15	2	ظرفیت اسمی ذخیره ناحیه تحتانی Lower zone nominal soil moisture storage
UZSN	inches	2	0.05	ظرفیت اسمی ذخیره ناحیه فوقانی Upper zone nominal soil moisture storage
DEEPR	none	0.5	0	بخشی از آب زیرزمینی که به آب زیر زمینی غیر فعال جریان می‌یابد Fraction of groundwater inflow to deep recharge
INTFW	none	10	1	پارامتر ورودی جریان زیرقشری Interflow inflow parameter
IRC	none	0.85	0.3	پارامتر ثابت خشکیدگی جریان زیرقشری Interflow recession parameter
BASETP	none	0.2	0	بخشی از تبخیر و تعرق پتانسیل که از جریان پایه صورت می‌گیرد Fraction of remaining ET from base flow
LZETP	none	0.9	0.1	پارامتر تبخیر و تعرق زون تحتانی Lower zone ET parameter

ایستگاه مذکور افزایش داشته است که دلیل آن افزایش دامنه تغییرات مقادیر شدت بارش و تغییر فراوانی آنها در نتیجه افزایش ناهمگنی داده‌ها می‌باشد به طوری که دامنه تغییرات شدت بارش در حالت استفاده از داده‌های بارش ایستگاه کلک چال ۲۳ میلیمتر بر ساعت و در حالت عدم استفاده از آن در حدود ۸/۸ میلیمتر بر ساعت بوده است. این امر موجب پهن‌تر شدن تابع چگالی احتمال تابع گاما و در نتیجه افزایش میزان پارامتر مورد نظر گردیده است. ایستگاه کلک چال به دلیل موقعیت جغرافیایی دورتر در خارج از حوضه آبخیز مورد مطالعه (شکل ۱) دارای رژیم بارش متفاوت از جهت بارش‌های با شدت بیشتر می‌باشد. به طوری که متوسط بارش ثبت شده در ایستگاه مورد نظر در طول دوره آماری مورد مطالعه ۳ میلیمتر بر ساعت با ضریب تغییرات ۱/۳ می‌باشد که بالاتر از متوسط بارش ثبت شده در داخل حوضه (۲/۲ میلیمتر) و با ضریب تغییرات ۰/۷ می‌باشد. به همین دلیل زمانی که از داده‌های ایستگاه مذکور جهت برآورد پارامترهای مدل BLRPM استفاده می‌شود با تحت تاثیر قرار دادن پارامترهای کنترل کننده تداوم بارش ϕ و v ، باعث تولید بارش‌های با تداوم کم و شدت بیشتر در فرایند گسسته‌سازی بارش روزانه می‌شود.

مقادیر پارامترهای مدل بر اساس آماره‌های ذکر شده در جدول ۲ برای حالت‌های استفاده از آمار ایستگاه کلک چال و عدم استفاده از آن در جدول ۳ خلاصه گردیده است. نتایج نشان داد مقادیر پارامترهای λ ، ϕ و v در حالت عدم استفاده از آمار ایستگاه کلک چال نسبت به حالتی که از آمار ایستگاه مذکور استفاده می‌گردد کاهش پیدا می‌کند. مقدار پارامتر k افزایش و بقیه پارامترها بدون تغییر باقی ماندند. بیشترین مقدار تغییر در پارامتر v مقیاس توزیع گاما از مقدار ۲/۷۴ به مقدار ۰/۳۳ می‌باشد. خلیق و کونان (۲۶) نیز در مطالعه خود در برازش مدل با پارامترهای مذکور به داده‌های ساعتی بارش در ماه‌های مختلف سال نشان دادند از بین پارامترهای ذکر شده، پارامتر v بیشترین تغییرپذیری را نشان می‌دهد (۰/۳۱ - ۲/۵). مقدار تغییرپذیری پارامتر v در مطالعه آنها بین ۰/۳۱ تا ۲/۵ برآورد گردید. کلاودیا و همکاران (۱۰) نیز در برازش مدل به داده‌های بارش نشان دادند پارامتر v بیشترین تغییرپذیری (بین ۰/۵ تا ۳) را در بین پارامترهای دیگر دارد. پارامتر v پارامتر مقیاس تابع گاما می‌باشد که جهت شبیه‌سازی پارامتر η به کار رفته است که تعیین کننده تداوم سلولهای بارش w_{ij} می‌باشد. میزان پارامتر در حالت استفاده از داده‌های ایستگاه کلک چال نسبت به عدم استفاده از داده‌های

جدول ۲- نتایج برازش مدل BLRPM به داده‌های ساعتی بارش
Table 2- Result of BLRPM model fit to the hourly rainfall data.

آماره Statistic	واحد Unit	مقیاس (روز) Scale (day)	مشاهده‌ای Observed	برآوردی Simulated	خطای نسبی Relative error	وزن Weight	خطای وزنی Weighted square	میانگین خطای وزنی Average squared error
میانگین Mean	mm	0.041666667	0.012	0.012	0	10	0	
واریانس Variance	mm ²	0.041666667	0.06	0.07	0.2	1	0.04	
اتوکواریانس تاخیر ۱ Lag 1 autocovariance	mm ²	0.041666667	0.031	0.035	0.13	1	0.01	
نسبت خشکی Proportion dry	(-)	0.041666667	0.99	0.99	0	1	0	
میانگین Mean	mm	1	0.31	0.31	0	10	0	
واریانس Variance	mm ²	1	6.16	4.07	-0.33	1	0.11	1.03
اتوکواریانس تاخیر ۱ Lag1 autocovariance	mm ²	1	0.41	0.06	-0.83	1	0.7	
نسبت خشکی Proportion dry	(-)	1	0.97	0.92	-0.05	1	0.003	
میانگین Mean	[mm]	2	0.62	0.62	0	10	0	
واریانس Variance	mm ²	2	13.3	8.27	-0.37	1	0.14	
اتوکواریانس تاخیر ۱ Lag1 autocovariance	mm ²	2	0.05	0.06	0.2	1	0.04	
نسبت خشکی Proportion dry	(-)	2	0.95	0.85	-0.11	1	0.01	
میانگین Mean	mm	0.041666667	0.008	0.008	0	10	0	
واریانس Variance	mm ²	0.041666667	0.03	0.03	0	1	0	
اتوکواریانس تاخیر ۱ Lag1 Autocovariance	mm ²	0.041666667	0.016	0.017	0.07	1	0.005	
نسبت خشکی Proportion dry	(-)	0.041666667	0.99	0.99	0	1	0	
میانگین Mean	mm	1	0.21	0.21	0	10	0	
واریانس Variance	mm ²	1	3.87	3.63	-0.06	1	0.003	
اتوکواریانس تاخیر ۱ Lag1 autocovariance	mm ²	1	0.44	0.32	-0.27	1	0.07	0.36
نسبت خشکی Proportion dry	(-)	1	0.97	0.97	0	1	0	
میانگین Mean	[mm]	2	0.42	0.42	0	10	0	
واریانس Variance	mm ²	2	8.73	7.92	-0.09	1	0.008	
اتوکواریانس تاخیر ۱ Lag1 autocovariance	mm ²	2	0.27	0.32	0.2	1	0.04	
نسبت خشکی Proportion dry	(-)	2	0.96	0.95	-0.01	1	0.0002	

حوضه با استفاده از مدل BLRPM در حالت استفاده و عدم استفاده از

گسسته سازی وقایع بارش برای چند نمونه شاخص از بارش‌های

می‌باشد. با این حال در حالت استفاده از داده‌های بارش ایستگاه کلک چال جهت بهینه‌سازی پارامترهای مدل BLRPM حداکثر شدت بارش برابر با ۰/۶۵ اینچ و تداوم بارش به مدت ۳ ساعت برآورد گردیده است که شدت بیشتر و تداوم کمتری نسبت به داده‌های بارش مشاهده‌ای دارد. اهمیت این موضوع زمانی آشکار می‌شود که از داده‌های گسسته‌سازی شده جهت اجرای مدل هیدرولوژیکی HSPF جهت شبیه‌سازی دبی روزانه حوضه استفاده گردد که در بخش‌های بعدی به آن پرداخته خواهد شد. پس از بهینه‌سازی پارامترهای مدل با استفاده از ایستگاه‌های درون حوضه، مدل مذکور جهت گسسته‌سازی داده‌های بارش روزانه حوضه در دوره آماری ۱۹۹۵-۲۰۰۵ به کار گرفته شد.

داده‌های ساعتی بارش ایستگاه کلک چال جهت بهینه‌سازی پارامترهای مدل مذکور، به همراه داده‌های مشاهده‌ای بارش ساعتی در شکل ۶ نشان داده شده است. باتوجه به هایتوگرافهای بارش در شکل ۶، در حالتی که از داده‌های ایستگاه کلک چال جهت برآورد پارامتر مدل BLRPM استفاده شده است منجر به تولید بارش‌های کوتاه مدت با شدت زیاد گردیده است. به عنوان مثال نتایج گسسته‌سازی بارش روز ۱۸ آوریل ۲۰۰۶ در شکل ۶ نشان داده دهنده این است که در حالت عدم استفاده از داده‌های بارش ایستگاه کلک چال برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل BLRPM حداکثر شدت بارش گسسته‌سازی شده برابر با ۰/۴ اینچ بر ساعت و تداوم بارش به مدت ۱۰ ساعت بوده است که نزدیک به مقدار حداکثر شدت بارش ساعتی مشاهده‌ای به میزان ۰/۳۵ اینچ و تداوم بارش به مدت ۱۲ ساعت

جدول ۳- مقادیر بهینه پارامترهای مدل BLRPM
Table 3- Optimized values of the BLRPM model.

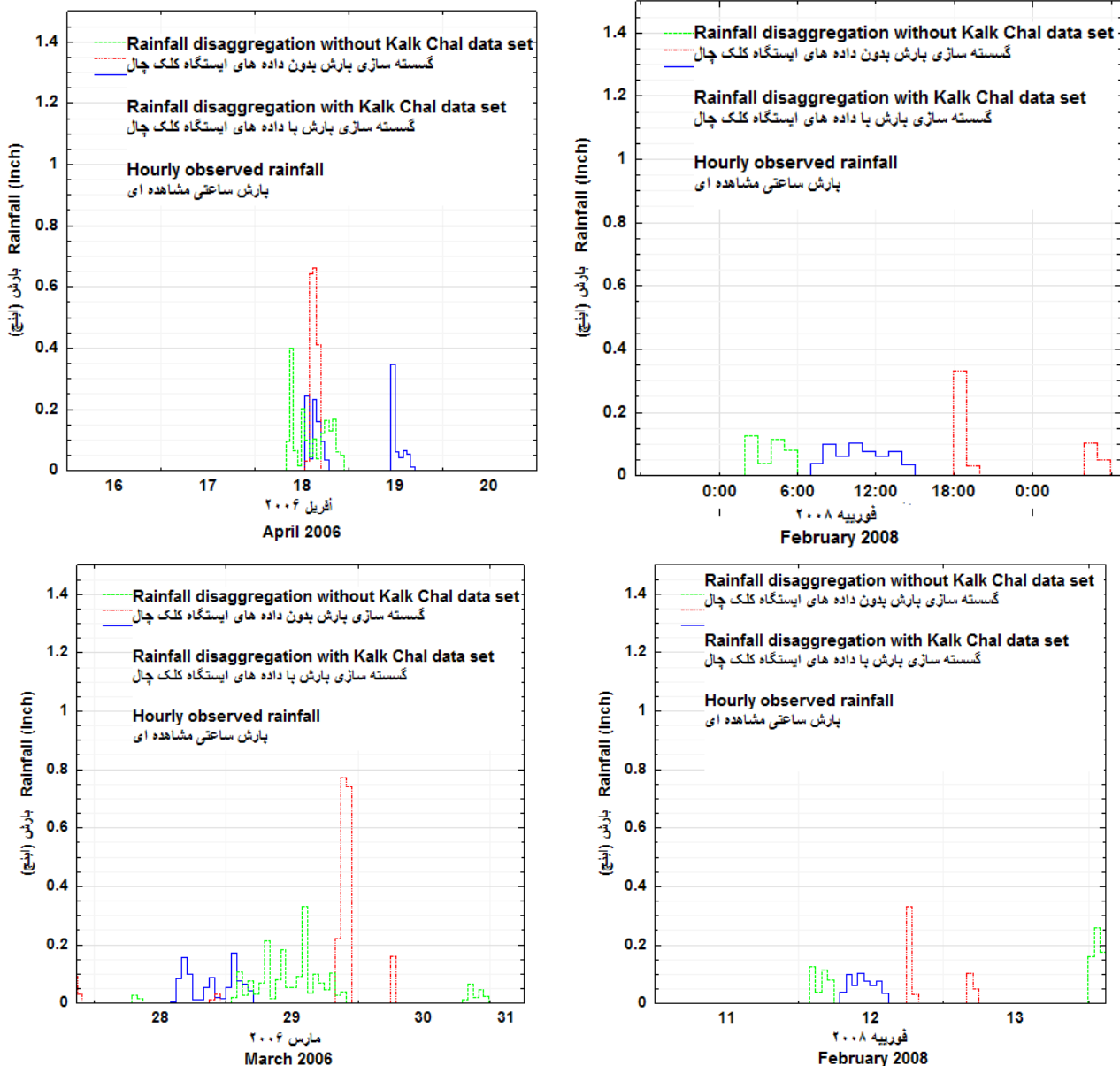
پارامتر Parameter	واحد Unit	مقادیر بهینه بدون در نظر گرفتن ایستگاه کلک چال	
		مقادیر بهینه با در نظر گرفتن ایستگاه کلک چال	Optimized values without Kalk Chal station
λ	d-1	0.07	0.02
$k = \beta/\eta$	-	0.30	0.59
$\phi = \gamma/\eta$	-	0.75	0.02
α	-	0.99	0.99
v	d	2.74	0.33
μ_x	mmd-1	98.9	98.9
σ_x	mmd-1	98.9	98.9

* d به معنای روز و mm به معنی میلی‌متر می‌باشد.

حالت یکسان در نظر گرفته شود. بدین منظور ابتدا واسنجی مدل در حالت استفاده از داده‌های همگن از جهت شدت و تداوم بارش (ایستگاه‌های داخل حوضه) انجام شد و پارامترهای مدل HSPF تعیین گردید و سپس در حالت استفاده از داده‌های ایستگاه کلک چال نیز همان مقادیر پارامترها استفاده شد. مدل در دوره آماری ۱۹۹۵-۲۰۰۰ با استفاده از داده‌های دبی روزانه ثبت شده در ایستگاه گلینک واسنجی گردید و جهت شبیه‌سازی دبی روزانه در آبراه شماره ۲۷ (محل قرارگیری ایستگاه گلینک) در طول دوره آماری ۵ ساله ۲۰۰۰-۲۰۰۵ به کار گرفته شد. نتایج واسنجی در دوره (۱۹۹۵-۲۰۰۰) و صحت سنجی در دوره (۲۰۰۰-۲۰۰۵) جهت شبیه‌سازی دبی روزانه آبراه شماره ۲۷ در مقابل داده‌های دبی مشاهده‌ای روزانه ثبت شده در ایستگاه گلینک در حالت استفاده از داده‌های همگن، در شکل ۷ نشان داده شده است. باتوجه به اینکه تمامی یکاها در برنامه نرم افزاری WinHSPF3 به صورت انگلیسی می‌باشد لذا کمیتهای اشاره شده در شکل ۷ به صورت فوت مکعب بر ثانیه (متغیر دبی) و اینچ (متغیر بارش) می‌باشند.

شبیه‌سازی دبی روزانه با استفاده از مدل HSPF

واسنجی مدل HSPF با استفاده از داده‌های ساعتی بارش، گسسته‌سازی شده توسط مدل BLRPM و بقیه پارامترهای اقلیمی از جمله تبخیر و تعرق و حداکثر دمای هوا و بر اساس داده‌های مکانی (نقشه خاک و نقشه کاربری اراضی حوضه) انجام شد. باتوجه به اینکه فرآیند بهینه‌سازی پارامترهای مدل BLRPM و گسسته‌سازی داده‌های روزانه بارش حوضه در دو حالت با در نظر گرفتن داده‌های ایستگاه کلک چال و بدون در نظر گرفتن آن انجام شد لذا دو گروه از داده‌های ساعتی بارش جهت اجرای مدل HSPF در اختیار می‌باشد. بنابراین واسنجی و صحت سنجی مدل هیدرولوژیکی HSPF در دو مرحله با استفاده از داده‌های فوق الذکر انجام گردید. باتوجه به این موضوع که هدف اصلی این تحقیق بررسی همگنی داده‌های بارش و اثر انتخاب ایستگاه‌های ناهمگن (از جهت شدت و تداوم بارش) بر روی دقت و عملکرد مدل HSPF می‌باشد لذا جهت از بین بردن اثر سایر عوامل موثر بر خروجی مدل، تمام شرایط به جز داده‌های ورودی مدل در هر دو حالت اجرای مدل ثابت در نظر گرفته شد. بنابراین بایستی تمامی پارامترهای مدل در دو



شکل ۶- گسسته سازی وقایع بارش با استفاده از مدل BLRPM
Figure 6- Rainfall disaggregation using the BLRPM model

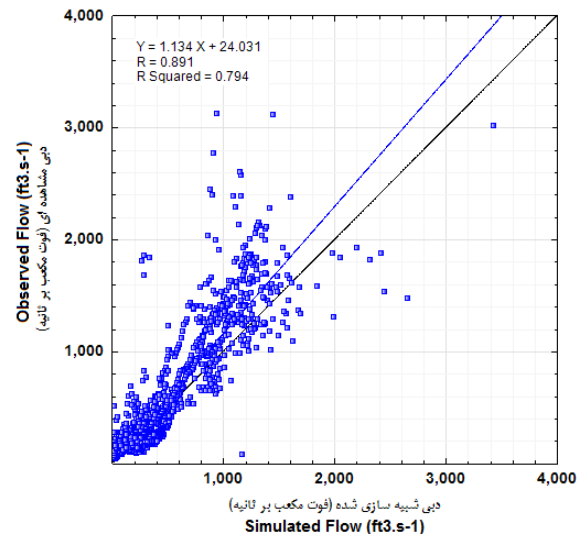
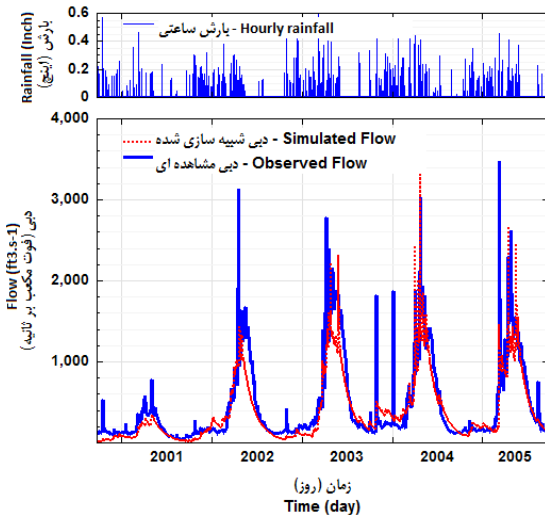
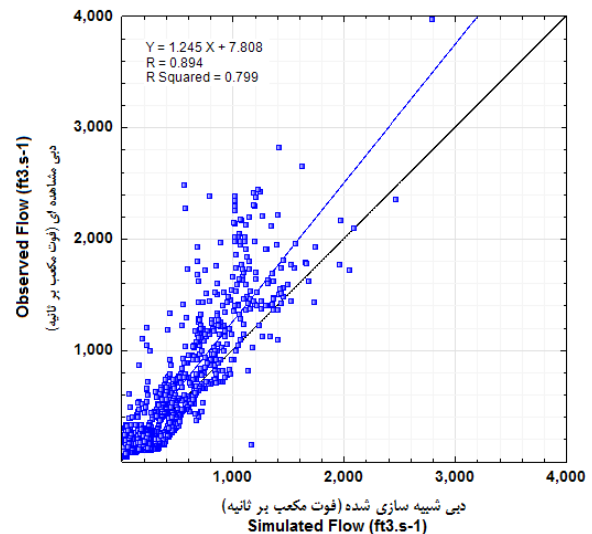
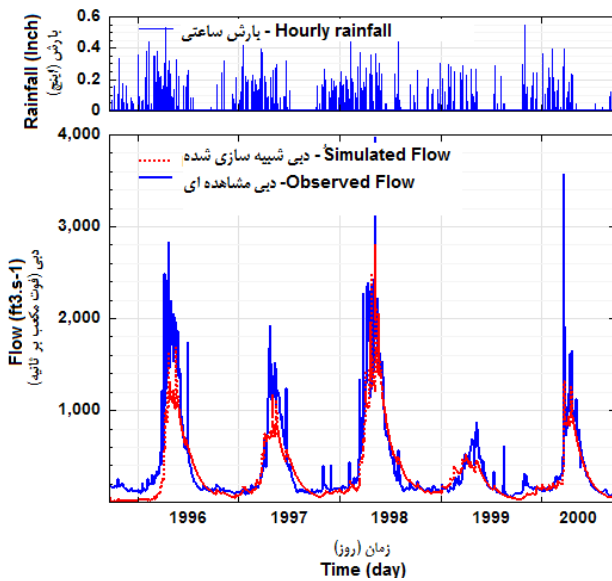
سنجی به خط ۴۵ درجه نزدیک است که نشان دهنده عملکرد مطلوب مدل و تطابق داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده‌ای می‌باشد. هایتوگراف مربوط به بارش ساعتی نیز بر اساس مقادیر گسسته‌سازی شده بارش در طول دوره ۱۹۹۵-۲۰۰۵ در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به هایتوگرافهای ارائه شده حداکثر مقدار شدت بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل BLRPM در کل طول دوره واسنجی و صحت سنجی مدل برابر با ۰/۶ اینچ بر ساعت بوده است. نتایج ارزیابی عملکرد مدل در جدول ۴ ارائه گردیده است. نتایج نشان

در شکل ۷ توافق خوبی بین داده‌های شبیه‌سازی شده در آبراهه ۲۷ و داده‌های دبی روزانه ثبت شده در محل ایستگاه گلینک (واقع در رودخانه شماره ۲۷) برقرار است که نشان دهنده عملکرد مطلوب مدل در شبیه‌سازی رواناب حوضه در آبراهه شماره ۲۷ در دوره واسنجی و صحت‌سنجی مدل بوده است. به طوریکه نمودار پراکندگی داده‌های مشاهداتی در مقابل داده‌های شبیه‌سازی شده در شکل مذکور نشان دهنده توزیع نقاط در اطراف خط ۴۵ درجه می‌باشد. خط برازش مدل (خط آبی رنگ) در هر دو نمودار مربوط به دوره واسنجی و صحت-

با توجه به نتایج شکل ۸، دبی‌های حداکثر بسیار بیشتر از مقادیر مشاهداتی برآورد گردیده‌اند که در نتیجه به کارگیری ایستگاه کلک چال جهت بهینه‌سازی پارامترهای مدل BLRPM بوده است. باتوجه به الگوی بارش‌ها در ایستگاه کلک چال از جهت وجود وقایع بارش با شدت زیاد و مدت کم، استفاده از داده‌های ایستگاه مذکور جهت بهینه‌سازی پارامترهای مدل BLRPM باعث تولید داده‌های بارش با شدت زیاد در فرایند گسسته سازی بارش گردیده است که به نوبه خود باعث بیش برآورد مقادیر دبی‌های حداکثر گردیده است.

دهنده عملکرد مطلوب مدل با ضریب تبیین ۰/۸ و ضریب ناش-ساتکلیف برابر ۰/۷۶ می‌باشد.

جهت ارزیابی اثر همگنی داده‌های ورودی و تأثیر انتخاب ایستگاه بر روی نتایج حاصل از خروجی مدل، مدل HSPF با استفاده از داده‌های گسسته‌سازی شده مدل BLRPM در حالت استفاده از ایستگاه کلک چال جهت بهینه‌سازی مدل، اجرا گردید. مقادیر پارامترهای مدل HSPF بدون تغییر باقی ماندند و مدل مذکور جهت شبیه‌سازی دبی روزانه در آبراهه ۲۷ با استفاده از داده‌های بارش ساعتی حاصل در دوره آماری ۲۰۰۰-۲۰۰۵ به کار گرفته شد.



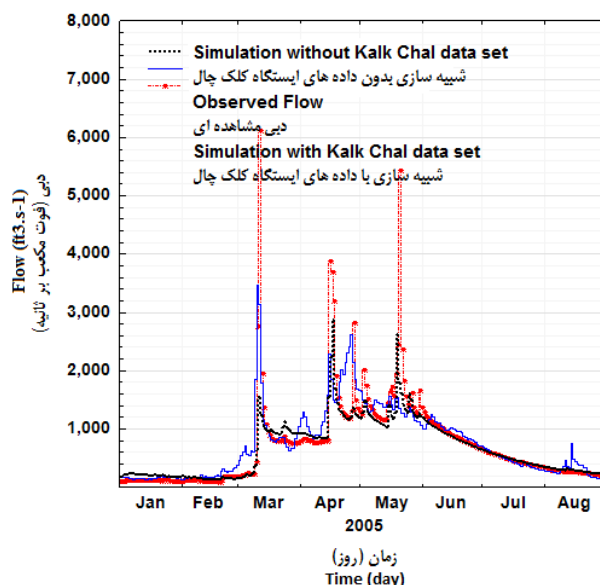
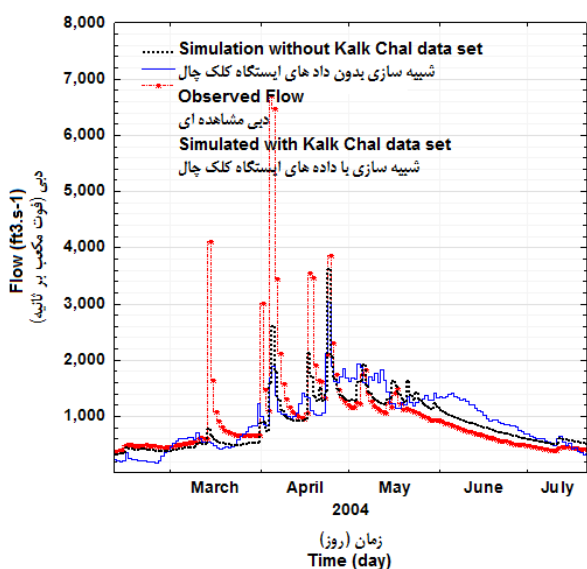
شکل ۷- واسنجی (بالا) و صحت سنجی (پایین) مدل HSPF (بدون استفاده از ایستگاه کلک چال)

Figure 7- Calibration (up) and validation (down) of the HSPF model (without Kalk Chal station)

جدول ۴- معیارهای ارزیابی عملکرد مدل HSPF

Table 4- Performance evaluation criteria for the HSPF model

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل Performance evaluation criteria	دوره واسنجی Calibration period (1995-2000)	دوره صحت سنجی Validation period (2000-2005)
ضریب همبستگی R Correlation coefficient (R)	0.89	0.89
ضریب تبیین (R-square) Coefficient of determination (R-square)	0.80	0.79
مجزور میانگین مربعات خطا (RMSE) Root mean square error (RMSE)	7.02	7.11
ضریب تطابق (d) Index of agreement (d)	0.9	0.92
ضریب ناش-سانتلیف (E) Nash-Sutcliff coefficient (E)	0.73	0.76



شکل ۸- مقایسه نتایج حاصل از اجرای مدل HSPF با استفاده از داده‌های ایستگاه کلک چال و عدم استفاده از آن

Figure 8- comparison between HSPF results with and without Kalk Chal station.

نزدیکتر شدن مقادیر شبیه‌سازی شده به مقادیر مشاهده‌ای دست یافت. با این وجود یکی از اصول اساسی در مدلسازی هیدرولوژیک این است که پارامترهای مدل باید به گونه‌ای برآورد شوند که حالت منطقی داشته باشند و تبیین کننده واقعیت‌های فیزیکی موجود در حوضه آبخیز باشند (۶). گریک و همکاران (۱۹) نیز در مطالعه‌ای به منظور مدلسازی هیدرولوژی حوضه رودخانه ساندوزی در جنوب آفریقا با استفاده از مدل HSPF نشان دادند مدل HSPF حساسیت بالایی به شدت بارش دارد به طوری که بارش‌های با شدت کم باعث تولید رواناب کمتر و در نتیجه نفوذ و تخیر و تعرق بیشتر می‌گردد. از سوی دیگر افزایش شدت بارش باعث برآورد بیشتر دبی‌های اوج در مطالعه آنها گردید که در تطابق با نتیجه این مطالعه می‌باشد. سکواوفسکی و

با در نظر گرفتن مقادیر بارش روزانه یکسان (و در نتیجه حجم بارش یکسان)، در حالتی که از داده‌های گسسته‌سازی شده بارش با در نظر گرفتن ایستگاه کلک چال جهت بهینه‌سازی پارامترهای مدل BLRPM استفاده گردد مقادیر دبی اوج بیشتر از مقادیر مشاهده‌ای برآورد گردد. اگرچه مقادیر بارش روزانه در حالت‌های مختلف اجرای مدل هیدرولوژیکی یکسان بود با این وجود به دلیل شدت‌های بیشتر بارش در حالت استفاده از داده‌های ایستگاه کلک چال موجب بیش برآورد قابل توجه مقادیر دبی اوج گردد که این موضوع نشان دهنده حساسیت بالای مدل HSPF به متغیر شدت بارش می‌باشد. در حالت استفاده از داده‌های ثبت شده ایستگاه کلک چال نیز می‌توان با افزایش مقادیر پارامتر نفوذ INFILT به نتایج قابل قبولی از جهت

داده‌ها در نتیجه افزایش ناهمگنی داده‌ها افزایش می‌یابد. ایستگاه کلکچال به دلیل قرارگیری در محدوده بیرون از حوضه و در فاصله جغرافیایی دورتر، دارای الگوی بارش متفاوت از جهت بارشهایی با شدت بیشتر نسبت به ایستگاه‌های داخل حوضه می‌باشد. از این رو زمانی که از داده‌های ایستگاه مذکور جهت بهینه‌سازی پارامترهای مدل BLRPM استفاده می‌شود منجر به تولید بارش‌هایی با شدت زیاد در فرآیند گسسته‌سازی بارش می‌گردد که وقتی به عنوان ورودی مدل HSPF مورد استفاده قرار می‌گیرند موجب بیش‌برآورد دبی‌های اوج می‌گردد. حذف داده‌های ایستگاه کلکچال موجب بهبود برآورد پارامترهای مدل BLRPM و کاهش خطای مدل می‌گردد. در این حالت استفاده از داده‌های بارش ساعتی حاصل از فرآیند گسسته‌سازی به عنوان ورودی مدل HSPF موجب کاهش خطای برآورد دبی‌های اوج می‌گردد. نتایج این مطالعه نشان دهنده حساسیت بالای مدل HSPF به مقادیر شدت بارش می‌باشد. مدل گسسته‌سازی BLRPM عملکرد خوبی در گسسته‌سازی داده‌های بارش و تولید داده‌های ساعتی بارش مورد نیاز مدل داشته است به طوریکه آماره‌های مربوط به داده‌های بارش را بخوبی شبیه‌سازی نموده است و از سوی دیگر اجرای مدل هیدرولوژیکی HSPF با استفاده از داده‌های ساعتی تولید شده بوسیله مدل BLRPM از جهت شبیه‌سازی مطلوب داده‌های روزانه دبی، موفقیت آمیز بوده است. باتوجه به کمبود ایستگاه‌های باران نگار در کشور و همچنین دقت پایین داده‌های بارش ساعتی ثبت شده در ایستگاه‌های موجود، نتایج این مطالعه بیانگر سودمندی استفاده از مدل گسسته‌سازی BLRPM جهت تولید داده‌های بارش ساعتی با استفاده از داده‌های روزانه می‌باشد.

آدامس (۴۲) مدل HSPF را به منظور شبیه‌سازی رواناب حوضه رودخانه چارلز در ماساچوست شرقی به کار گرفتند. مدل در دو حالت با استفاده از داده‌های بارش ساعتی ایستگاه‌های خارج از حوضه و داده‌های ساعتی بارش گسسته‌سازی شده از داده‌های بارش روزانه داخل حوضه اجرا شد. آنها نشان دادند مدل HSPF عملکرد بهتری در حالت استفاده از داده‌های گسسته‌سازی شده بارش داخل حوضه نسبت به استفاده از داده‌های بارش ساعتی ثبت شده خارج از حوضه داشته است. وانگ و همکاران (۴۳) به مطالعه تاثیر توزیع مکانی بارش بر روی نتایج حاصل از مدل HSPF در حوضه زون در چین پرداختند. آنها نشان دادند داده‌های ورودی به مدل HSPF می‌تواند منشا ایجاد عدم قطعیت قابل توجه در خروجی مدل باشد.

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه اثر انتخاب ایستگاه بر روی بهینه‌سازی پارامترهای مدل گسسته‌سازی BLRPM و مدل هیدرولوژیکی HSPF مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور ابتدا با استفاده از داده‌های بارش ساعتی ثبت شده در ایستگاه‌های باران‌نگار، پارامترهای مدل BLRPM تعیین گردید و با استفاده از مدل مذکور به گسسته‌سازی داده‌های بارش روزانه حوضه پرداخته شد. سپس داده‌های ساعتی بارش حاصل از فرآیند گسسته‌سازی به عنوان ورودی مدل HSPF جهت شبیه‌سازی دبی روزانه در ایستگاه گلینک مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد زمانیکه از داده‌های ایستگاه کلکچال در بیرون از حوضه جهت بهینه‌سازی پارامترهای مدل BLRPM استفاده می‌گردد خطای مدل BLRPM به دلیل افزایش ضریب تغییرات

منابع

- 1- Abdellatif M., Atherton W., Alkhaddar R. 2013. Application of the stochastic model for temporal rainfall disaggregation for hydrological studies in north western England. *Journal of Hydroinformatics*, 15(2): 555-567.
- 2- Alavinia M. 2009. Comparison between HSPF and SWAT models for sediment (Case study: Abro watershed). Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran. (in Persian).
- 3- Aqua Terra Consultants. 1996. HSPF Data Structure: The Operation Status Vector (OSV). Unpublished. Aqua Terra Consultants, Mountain View, CA.
- 4- Arnold J.G., Srinivasin R., Muttiah R.S., Williams J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *Journal of American Water Resources Associate*, 34 (1): 73-89.
- 5- Ashofteh P., Massah Bouani A.R. 2010. Impact of Climate Change on Maximum Discharges: Case Study of Aidoghmouth Basin, East Azerbaijan. *Journal of Water and Soil Science*, 14 (53):28-38 (in Persian with English abstract).
- 6- BASINS Technical Note 6. 2006. Estimating hydrology and hydraulic parameters for HSPF, Environmental protection agency, USA.
- 7- Bennett S.J., Bishop T.F.A., Vervoort R.W. 2013. Using SWAP to quantify space and time related uncertainty in deep drainage model estimates: A case study from northern NSW, Australia. *Journal of Agricultural Water Management*, 2013(130): 142-153.
- 8- Bicknell B.R., Imhoff J.C., Kittle J.J.L., Jobs T.H., Donigian J.A.S. 2005. Hydrological Simulation Program – FORTRAN (HSPF). User's Manual for Release 12.2. U.S. EPA National Exposure Research Laboratory, Athens, GA, in cooperation with U.S. Geological Survey, Water Resources Division, Reston, VA.
- 9- Choi J., Sokolofsky S.A., Olivera F. 2008. Hourly disaggregation of hourly rainfall in Texas using measured

- hourly precipitation at other locations. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(6):476-487.
- 10- Claudia F.A., Dame R.F. 2014. Bartlett-Lewis of rectangular pulse modified model: estimate of parameters for simulation of precipitation in sub-hourly duration. *Engenharia Agricola*, 34 (5): 925-934.
 - 11- Cowpertwait P.S.P., Lockie T., Davies M.D. 2006. A stochastic spatial-temporal disaggregation model for rainfall. *Journal of Hydrology New Zealand*, 45: 1-12.
 - 12- Donigian J.A.S., Bicknell B.R., Imhoff J.C. 1995. Hydrological Simulation Program-FORTRAN (HSPF). p. 395-442. In: Singh, V.P., Ed., *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications and Highlands Ranch, 1995; 395-442.
 - 13- Donigian A.S., Crawford N.H. 1976. Modelling Nonpoint Pollution from the Land Surface. EPA/600/3-76-083, Environmental Research Laboratory, Athens.
 - 14- Donigian A.S., Davis H.H. 1978. User's Manual for Agricultural Runoff Management (ARM) Model. EPA-600/3-78-080, USEPA, Athens, GA. p.12.
 - 15- Dousti M., Shahedi K., Habibnejad Roshan M., Miryaghoubzadeh M.R. 2012. Using IHACRES semi-conceptual model to simulate daily flow (Case study: Tamar Basin). *Journal of Soil and Water Conservation*, 21(2): 277-292 (in Persian with English abstract).
 - 16- Engida A.N., Esteves M. 2011. Characterization and disaggregation of daily rainfall in the Upper Blue Nile Basin in Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 399: 226-234.
 - 17- Farzbod A., Faridhoseini A.R., Javan K., Sharifi M.B. 2015. A Comparison of ANN and HSPF Models for Runoff Simulation in Balkhichai River Watershed, Iran. *American Journal of Climate Change*, 4: 203-216.
 - 18- Feldman A.D. 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC, Davis, CA, USA.
 - 19- Gericke O.J., Pretorius E., Wagenaar D., Loyd C. 2004. Hydrological modelling of river basins using HSPF model. p. 1571-1578. In *Proceedings of the 2004 Water Institute of Southern Africa (WISA) Biennial Conference*.
 - 20- Huang P., Li Z., Chen J., Li Q., Yao C. 2017. Event-based hydrological modeling for detecting dominant hydrological process and suitable model strategy for semi-arid catchments. *Journal of Hydrology*, In press.
 - 21- Im S.J., Brannan K.M., Mostaghimi S., Kim S.M. 2007. Comparison of HSPF and SWAT models performance for runoff and sediment yield prediction. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Environmental Science Engineering*, 42 (11): 1561-1570.
 - 22- Iskra I., Droste R. 2007. Application of non-linear automatic optimization techniques for calibration of HSPF. *Water Environmental Research*, 79 (6):647-659.
 - 23- Jakeman A.J., Hornberger G.M. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall runoff model? *Water Resources Research*, 29(8):2637-2649.
 - 24- Jebari S. 2009. Water Erosion Modelling using Fractal Rainfall Disaggregation, a Study in Semiarid Tunisia. Lund Institute of Technology, Lund University, Sweden.
 - 25- Johnson M.S., Coon W.F., Mehta V.K., Steenhuis T. S., Brooks E.S., Boll J. 2003. Application of two hydrologic models with different runoff mechanisms to a hillslope dominated watershed in the northeastern US: a comparison of HSPF and SMR. *Journal of Hydrology*, 284(1-4): 57-76.
 - 26- Khaliq M.N., Cunnane C. 1996. Modelling point rainfall occurrences with the Modified Bartlett-Lewis Rectangular Pulses Model. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, 180:109-138.
 - 27- Khosravi M. 2008. Flood Forecasting using Artificial Neural Network and Empirical Equations, Watershed management MSc thesis, Faculty of Natural Resources, Tehran University. (in Persian with English abstract).
 - 28- Kossieris P., Makropoulos C., Onof C., Koutsoyiannis D. 2016. A rainfall disaggregation scheme for sub-hourly time scales: Coupling a Bartlett-Lewis based model with adjusting procedures. *Journal of Hydrology*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.015>
 - 29- Koutsoyiannis D., Onof C. 2001. Rainfall disaggregation using adjusting procedures on a Poisson cluster model. *Journal of Hydrology*, 246: 109-122.
 - 30- Kozanis S., Christofides A., Mamassis N., Efstratiadis A., Koutsoyiannis D. 2010. Hydrognomon – open source software for the analysis of hydrological data, *Geophysical Research Abstracts*.
 - 31- Lian Y.Q., Chan I., Xie H., Demissie M. 2010. Improving HSPF modeling accuracy from FTABLES: a case study for the Illinois River Basin. *Journal of Hydrological Engineering – ASCE*, 15 (8): 642-650.
 - 32- Mishra A., Kar S., Raghuwanshi N.S. 2009. Modeling nonpoint source pollutant losses from a small watershed using HSPF model. *Journal of Environmental Engineering – ASCE*, 135 (2): 92-100.
 - 33- Nasr A., Bruen M., Jordan P., Moles R., Kiely G., Byrne P. 2007. A comparison of SWAT, HSPF and SHETRAN/GOPC for modelling phosphorus export from three catchments in Ireland. *Water Resources*, 41 (5): 1065-1073.
 - 34- Pui A., Sharma A., Mehrotra R., Sivakumar B., Jeremiah E. 2012. A comparison of alternatives for daily to sub-daily rainfall disaggregation. *Journal of Hydrology*, 470-471: 138-157.
 - 35- Razavizadeh S., Salajegheh A., Khalighi S., Jafari M. 2013. Effects of land use changes on flood characteristics using the HEC-HMS model (Case study: Taleghan watershed). *Journal of Range and Watershed management*,

- 66(3):373-386 [in Persian with English abstract].
- 36- Rodríguez-Iturbe I., de Power B.F., Valdés J.B. 1987. Rectangular pulses point process models for rainfall: Analysis of empirical data. *Journal of Geophysical Research*, 92: 9645-9656.
- 37- Ryu J.H. 2009. Application of HSPF to the distributed model intercomparison project: case study. *Journal of Hydrological Engineering – ASCE*, 14 (8): 847–857.
- 38- Saleh A., Du B. 2004. Evaluation of SWAT and HSPF within BASINS program for the Upper North Bosque River watershed in Central Texas. *Transactions of ASAE*, 47 (4): 1039–1049.
- 39- Segond M.L., Neokleous N., Makropoulos C., Onof C., Maksimovic C. 2007. Simulation and spatio-temporal disaggregation of multi-site rainfall data for urban drainage applications. *Hydrological Science Journal*, 52: 917–935.
- 40- Singh J., Knapp H.V., Arnold J.G., Misganaw D. 2005. Hydrological modeling of the Iroquois river watershed using HSPF and SWAT. *Journal of American Water Resources Associate*, 41 (2): 343–360.
- 41- Sivakumar B., Berndtsson R. 2010. *Advances in Data-Based Approaches for Hydrologic Modeling and Forecasting*. World Scientific.
- 42- Sokolofsky S., Adams E. 2011. Disaggregation of daily rainfall for continues watershed modeling. *Journal of hydrological engineering*, 6(4): 300-309
- 43- Wang H., Wu z., Hu C. 2014. A Comprehensive Study of the Effect of Input Data on Hydrology and non-point Source Pollution Modeling. *Water resources management*, 29:1505. DOI 10.1007/s11269-014-0890-x
- 44- World Meteorological Organization. 1975. *Inter comparison of Conceptual Models Used in Operational Hydrological Forecasting*. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva.
- 45- Xu, C.Y. 2002. *Hydrologic models*. Earth Science Centre. Uppsala University. Sweden.
- 46- Zarei M., Ghanbarpour M.R., Habibnezhad Roshan M., Shahedi K. 2009. Streamflow Simulation using IHACRES Rainfall-Runoff Model (Case Study: Kasilian Catchment). *Journal of Watershed management and Science Engineering*, 3 (8):11-20 (in Persian with English abstract).

Effect of Weather Station Selection on Parameterization of Modified Bartlett-Lewis Rectangular Pulse (BLRPM) and HSPF Models

E. Dodangeh¹ - K. Shahedi^{2*} - K. Solaimani³

Received: 13-03-2017

Accepted: 20-06-2017

Introduction: The proper management of water resources in a watershed requires precise understanding and modelling of the hydrological processes. HSPF model uses an infiltration excess mechanism to simulate streamflow and requires the hourly precipitation data as input. Despite the high accuracy of the HSPF model, the lack of rainfall data at short time scales (hour and less than hour) restricts implementation of the model especially for long time simulations. Some studies have applied simple division for daily rainfall disaggregation into the hourly values to provide data required by the HSPF model. In simple division, each rainfall event is divided into 24 pulse stochastically and the peak flows may not be simulated correctly due to the lower rainfall intensities.

Materials and Methods: In this study, Random Parameter Bartlett-Lewis Rectangular Pulse (BLRPM) model was used for daily rainfall disaggregation into the hourly values to provide data needed by the HSPF model. The model parameters were calibrated using the 1, 24 and 48 hour rainfall data time series of the rain gauge stations inside (Jovestan and Zidasht) and outside (Kalk Chal) the watershed for the period of 2006-2009. To cluster the wet days, the BLRPM model was run several times and a generated sequence which had the best match with the original one in terms of daily totals was selected. Then, the synthetic sequence of hourly rainfall depths was modified based on a proportional adjusting procedure to add up exactly to the given daily depths. The calibrated model was then implemented to disaggregate the daily rainfall data of the watershed for the period of 1995-2005. The resultant hourly rainfall data were then fed into the HSPF hydrologic model to simulate the daily runoff. Parameterization of the BLRPM and HSPF models was also done while keeping the Kalk Chal station out of the calibration.

Results and Discussion: Sum of weighted squared error was calculated to be 1.03 when the data recorded in Kalk Chal station was also considered for parameter estimation of the BLRPM model. Maximum weighted square error was equal to 0.7 for lag-1 auto covariance of daily rainfall data. Keeping the Kalk Chal station out of the BLRPM model parameterization resulted in improved performance of the model. Sum of the weighted error decreased to 0.36 by removing the Kalk Chal station data. The results indicated that the weighted square error values decreased for all of the BLRPM model parameters when Kalk Chal station was not considered for calibration. The lag-1 auto covariance of daily rainfall data had the greatest reduction in weighted square error from 0.7 to 0.07 with and without including the Kalk Chal data set, respectively. The BLRPM model parameters also varied when data of the Kalk Chal station were removed from the calibration process. The k parameter value increased and the values of λ , ϕ and ν decreased due to removal of the Kalk Chal station data. The highest variation was observed for ν decreased from 2.74 to 0.33 by removing the Kalk Chal station. The calibrated BLRPM model, with and without taking into account the Kalk Chal station data set, was employed to disaggregate daily rainfall data into the hourly values. The HSPF model was calibrated using the daily observed streamflow data recorded in Galinak station to simulate daily streamflow in reach 27. The daily streamflow simulations in reach 27 were conducted by implementing the hourly generated rainfall data sets. The results showed that inclusion of the hourly rainfall data recorded in Kalk Chal station for parameterization of the BLRPM model caused the reproduction of high-intensity rainfall data in disaggregation process and consequently led to the overestimation of peak flows by HSPF model. Exclusion of the Kalk Chal station for BLRPM model parameterization improved the daily streamflow simulation with Nash-Sutcliffe efficiency = 0.76, coefficient of determination = 0.79 and RMSE = 7.11 m³.s⁻¹. These results demonstrated the sensitivity of HSPF model to the weather station selection and rainfall intensities.

Conclusions: The Kalk Chal station located outside of the studied region, with high intensity-short duration

1, 2, 3- PhD Candidate, Associate Professor and Professor of Department of Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Science and Natural Resources University
(*-Corresponding Author Email: kaka.shahedi@gmail.com)

rainfall pattern caused heterogeneity of the input hourly rainfall data for parameter estimation of BLRPM model. Parameter estimation of the BLRPM model with inclusion of the hourly rainfall data of Kalk Chal station resulted in generation of greater intensities in disaggregation process. Despite the same values of daily rainfall data in streamflow simulations, the high rainfall intensities caused by the data set of Kalk Chal station led to the overestimation of peak flows. The results indicated the high sensitivity of HSPF model to the rainfall intensities.

Keywords: Infiltration, Hourly precipitation, Peak flow, Rainfall disaggregation