



ارزیابی عملکرد جداسازی چند متغیره بارش با استفاده از مدل MuDRain (مطالعه موردی: شمال شرقی استان هرمزگان)

هدا بلوکی، مهدی فاضلی*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۳
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۶/۲۰

کلمات کلیدی:

بارش ساعتی
مدل چندمتغیره
MuDRain
تفکیک بارش
استان هرمزگان

خلاصه: داده‌های بارندگی با وضوح بالای مکانی و زمانی برای مطالعات مهندسی آب، مدل‌سازی هیدرولوژیکی و ارزیابی خطر سیل، به ویژه در مناطق گرمسیری با الگوهای بارندگی پیچیده ضروری است. نظر به کمبود این داده‌ها، جداسازی بارش ابزاری مهم است. در این مطالعه به ارزیابی عملکرد تفکیک چند متغیره بارش با استفاده از مدل MuDRain در استان هرمزگان و تأثیر همبستگی ساعتی بین ایستگاه‌ها بر دقت شبیه‌سازی پرداخته شد. مقایسه سری زمانی ساعتی مشاهداتی و شبیه‌سازی نشان داد که مدل در حفظ ارتفاع بارش روزانه دقیق است، اما در بیش‌تر موارد مقادیر شدید بارش را، کم‌تر از مقدار واقعی شبیه‌سازی کرده است. همچنین، تعداد وقایع بارش‌های شدید را به اندازه کافی تولید نکرده است. مقایسه نتایج تاریخ‌های منتخب که دارای بیشینه بارش بوده‌اند نشان داد که ضریب همبستگی (R) و ضریب ناش-ساتکلیف (NSE) به ترتیب بین بازه‌های ۰/۱۸۹۸ تا ۰/۹۳۱۹ و ۰/۰۳۱۹ تا ۰/۷۲۵۱ متغیر بوده‌اند. مقایسه تأثیر همبستگی ساعتی نشان داد که دقت مدل در شبیه‌سازی بارش ساعتی برای سری زمانی با میانگین همبستگی ساعتی بیش‌تر، بالاتر است و ضرایب R و NSE در آن به ترتیب برابر ۰/۷۸۱۶ و ۰/۵۸۵۶ بوده در حالی که این ضرایب برای سری زمانی با همبستگی ساعتی کم‌تر به ترتیب برابر ۰/۵۱۵۵ و ۰/۲۶۵۵ بوده است. در مجموع این مدل می‌تواند برای مناطق دارای همبستگی ساعتی بسیار بالا با اطمینان بیش‌تری مورد استفاده قرار بگیرد، در این صورت همبستگی مکانی ایستگاه‌ها به یک مزیت تبدیل می‌شود، زیرا با بهره‌گیری از داده‌های بارش ساعتی موجود در ایستگاه‌های مجاور، امکان ایجاد سری بارش‌های ساعتی واقع‌بینانه در ایستگاه مورد نظر را داراست.

۱- مقدمه

کاربردهای هیدرولوژیکی، به ویژه در مطالعات سیل و مدل‌سازی رواناب طوفان در یک محیط شهری، غالباً داده‌های ساعتی مورد نیاز است [۴]. در بیش‌تر مکان‌هایی که داده‌های مشاهده شده مستمر وجود ندارد و برای آینده چنین داده‌هایی تولید نمی‌شود، چالش عدم قطعیت، پیش می‌آید [۵]. در بسیاری از کشورهای جهان، تعداد زیادی باران‌سنج روزانه وجود دارد، که اغلب برای چندین دهه قابل استفاده بوده است؛ اما به دلیل عدم وجود باران‌سنج ساعتی و یا کوتاه بودن طول سری‌های داده ثبت شده، این داده‌ها برای بیش‌تر اهداف هیدرولوژیکی و تجزیه و تحلیل آماری ناکافی هستند. بدین ترتیب، یک مشکل رایج در مطالعات هیدرولوژیکی، محدودیت دسترسی داده‌ها در وضوح مناسب زمانی و/یا مکانی است. تفکیک بارندگی به عنوان یک ابزار مهم برای رویارویی با این مشکل پدیدار شد [۱]. بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی (به عنوان مثال HSPF¹،

یکی از مهم‌ترین وظایف برای هیدرولوژیست‌ها و مهندسان عمران درک فرآیندهای هیدرولوژیکی مربوط به طراحی‌های هیدرولوژیکی و مهندسی است. بارندگی، ورودی اصلی همه سیستم‌های هیدرولوژیکی است و طیف وسیعی از تجزیه و تحلیل‌های هیدرولوژیکی، برای طرح‌های کاهش سیل، مدیریت حوضه‌های آبریز، کیفیت آب یا مطالعات اکولوژیکی، نیاز به کمی کردن بارش در مقیاس زمانی روزانه و ساعتی دارد [۱]. ویژگی‌های بارش در پروژه‌های پیچیده مانند سرریزها، سدها و پل‌ها، برآورد سیل‌های احتمالی و همچنین فراوانی آن‌ها دارای اهمیت است؛ برای مثال در تدوین دستورالعمل‌هایی برای طراحی سازه‌های هیدرولیکی کاربرد دارد [۲]. توزیع زمانی بارندگی یکی از ورودی‌های اولیه در مدل‌های هیدرولوژیکی است که برای اهداف طراحی هیدرولیکی استفاده می‌شود [۳]. برای بسیاری از



تفکیک بارش پرداخته‌اند. حنایش^{۱۳} و همکاران به تفکیک بارش روزانه به ساعتی با استفاده از مدل Hyetos برای شبه‌جزیره مالزی پرداختند. نتایج نشان داد مدل عملکرد خوبی در حفظ میانگین دارد؛ با این حال، این مدل قادر به مدل‌سازی طیف وسیعی از ویژگی‌های مهم مانند مقادیر بارندگی‌های شدید نبوده است [۱۶]. کنوس و اسمیتز^{۱۴} از یک مدل تفکیک که در استرالیا توسعه یافته و برای کاربرد در آفریقای جنوبی اصلاح شده بود، جهت تبدیل داده‌های روزانه به ساعتی در آفریقای جنوبی استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل منطقه‌ای قادر به تکرار نتایج به دست آمده از داده‌های بارندگی کوتاه مدت «در محل» به عنوان ورودی به مدل تفکیک است و می‌تواند مجموع بارش روزانه و ویژگی‌های آماری بارندگی ساعتی را حفظ کند [۱۷]. دورنلس^{۱۵} و همکاران با کمک معادلات ایجاد شده از سوابق بارندگی به تفکیک داده‌های بارش پرداختند. هدف از مطالعه آن‌ها این بود که آیا تفاوت معنی‌داری بین روابط شدت-مدت-فراوانی به دست آمده از داده‌های پیشینه بارش تفکیک شده روزانه در مقایسه با مواردی که با سوابق بارندگی تعیین شده است، در منطقه پلوتاس، ایالت ریو گرانده دو سول^{۱۶}، برزیل وجود دارد یا خیر؟ تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای نتایج به دست آمده نشان داد که تفاوت معنی‌داری وجود ندارد [۱۸]. پارک و چانگ^{۱۷} بارش روزانه در چهار ایستگاه در سراسر کره جنوبی را به طور تصادفی با استفاده از روش تفکیک ناپارامتری^{۱۸} KNNR اصلاح شده، با در نظر گرفتن الگوهای بارندگی سه روزه، به بارش ساعتی تفکیک کردند. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی ویژگی‌های رویداد بارشی را با موفقیت بازتولید کرد [۱۹]. بینه^{۱۹} و همکاران از دو روش تفکیک تصادفی بارش بر اساس شباهت اقلیم برای انتقال آمار رویداد بارش از ایستگاه همسایه و روش تفکیک بارش Hyetos برای تولید بارش ساعتی در ایستگاه‌های حوضه رودخانه آواش^{۲۰} استفاده کردند. مقایسه این دو روش نشان داد که هر دو قادر به حفظ ویژگی آماری و ارتفاع بارش کل روزانه هستند و Hyetos در حفظ ویژگی آماری دارای عملکرد بهتری است [۲۰].

برای تفکیک داده‌های بارش، روش‌های متنوعی از ساده تا پیچیده وجود دارد. ساده‌ترین روش ایجاد توزیع زمانی یکنواخت از بارندگی روزانه است، اما

DHSVM¹ برای عملکرد بهتر با پارامترهای ورودی هواشناسی در پایه زمانی کوچک‌تر از روزانه طراحی شده‌اند [۶]. در پژوهش‌هایی که در مراحل از کار نیاز به داده‌های در پایه زمانی کوچک‌تر از روزانه وجود دارد تفکیک داده‌های بارش پیشنهاد می‌شود [۷]؛ به عنوان مثال دودانگه و همکاران جهت مطالعه فرآیند بارش-رواناب در حوضه آبخیز طالقان با استفاده از مدل HSPF [۸]، علوی‌نیا و نصیری‌صالح جهت ارزیابی کارایی مدل HSPF در شبیه‌سازی میانگین ماهانه دبی جریان و تولید رسوب در حوضه آبریز برو واقع در استان همدان [۹]، دستورانی و همکاران جهت شبیه‌سازی جریان روزانه در حوضه‌ی کوهستانی حبله‌رود با استفاده از مدل HSPF [۱۰]، ایوکویچ^۲ و همکاران جهت شبیه‌سازی سیل در حوضه کولوبارا^۳ [۱۱]، پتری^۴ و همکاران جهت ارزیابی کارایی سیستم مخزن محلی در حوضه آبریز واپره^۵ [۱۲]، شرستا^۶ جهت تحلیل عملکرد زهکشی شهری تحت تغییرات شدید بارندگی در سوخومویت^۷ (بانکوک) [۵]، نایزن^۸ و همکاران جهت برنامه‌ریزی و مدیریت سیلاب در حوضه رودخانه اونشروت^۹ در بخش مرکزی آلمان [۱۳] و آسواتی^{۱۰} و همکاران جهت مدل‌سازی حوضه آبخیز آچنکوویل^{۱۱} [۱۴]، در مرحله‌ی از کار نیازمند داده‌هایی در پایه زمانی کوچک‌تر از روزانه بودند و برای این کار، از روش‌های مختلف تفکیک بارش استفاده کردند.

از دهه‌های گذشته، دانشمندان سعی کرده‌اند داده‌های واقعی باران با وضوح بالا را توسط بسیاری از برنامه‌های رایانه‌ای تولید کنند که اساس آن‌ها احتمالات آماری فراوانی وقوع و کمی‌سازی مقدار است. از سال ۱۹۷۳ که والنسیا و شاکه^{۱۲} یک مدل چند متغیره را به عنوان ترکیبی خطی از وضوح داده بارش با مقیاس زمانی بزرگ ارائه کردند و داده تولید کردند [۱۵]، مدل‌های زیادی از جمله مدل تفکیک دینامیکی، Um، Hyetos و MuDRain اختراع شد تا ضمن حفظ خواص آماری، جداسازی یک رویداد بارشی را انجام دهند.

پژوهش‌هایی در سراسر جهان به مطالعه ارزیابی مدل‌های مختلف

- 13 Hanaish
- 14 Knoesen & Smithers
- 15 Dorneles
- 16 Pelotas, Rio Grande do Sul state
- 17 Park & Chung
- 18 K-nearest neighbor resampling
- 19 Beyene
- 20 Awash

- 1 Distributed Hydrological Soil and Vegetation Model
- 2 Ivkovic
- 3 Kolubara
- 4 Petry
- 5 Wupper
- 6 Shrestha
- 7 Sukhumvit
- 8 Nijssen
- 9 Unstrut
- 10 Aswathy
- 11 Achenkovil
- 12 Valencia & Schaake

نمودارهای واقعی شدت بارش-زمان^۴ می‌شود [۲۱]. فیتیلاس^۵ و همکاران به تفکیک داده‌های تاریخی ۸ ایستگاه واقع در حوضه رودخانه تیبر^۶، با استفاده از نرم‌افزار MuDRain برای سال‌های ۱۹۹۴ تا ۱۹۹۹ پرداختند. تفکیک با استفاده از داده‌های ساعتی ۳ باران‌سنج و داده‌های روزانه ۸ باران‌سنج انجام شد. نتایج ارزیابی مدل نشان داد که این روش منجر به حفظ خواص آماری مهم فرایند بارندگی می‌شود [۲۴]. حناییش به ارزیابی مدل MuD-Rain در شبه جزیره مالزی با استفاده از ۷ ایستگاه باران‌سنج در فواصل مختلف از ۴ کیلومتر تا ۱۶۰ کیلومتر پرداخت. برآزش مدل بر اساس بازتولید آمارهای برآزش مانند میانگین‌ها، واریانس‌ها، ضرایب چولگی، ضرایب خود همبستگی با تأخیر یک واحد^۷ و ضرایب خودهمبستگی با تأخیر صفر^۸ بود. بر اساس نتایج به دست آمده، مدل MuDRain برای منطقه مورد مطالعه گزینه مناسبی تشخیص داده نشد [۴]. دبله^۹ و همکاران رویکردهای مختلف تبدیل داده‌های روزانه آب و هوا به داده‌های ساعتی در حوضه آبخیز سدر کریک^{۱۱} را بررسی کردند. برای تفکیک داده‌های روزانه بارش به داده‌های ساعتی از مدل‌های Hyetos و MuDRain استفاده کردند. نتایج نشان داد هر دو مدل، توزیع بارندگی ساعتی را به طور متوسط خوب اندازه‌گیری کرده‌اند، اما مدل MuDRain در بیش‌تر موارد از جمله هم‌زمانی وقوع بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، آمار بهتری را تولید می‌کند [۲۳].

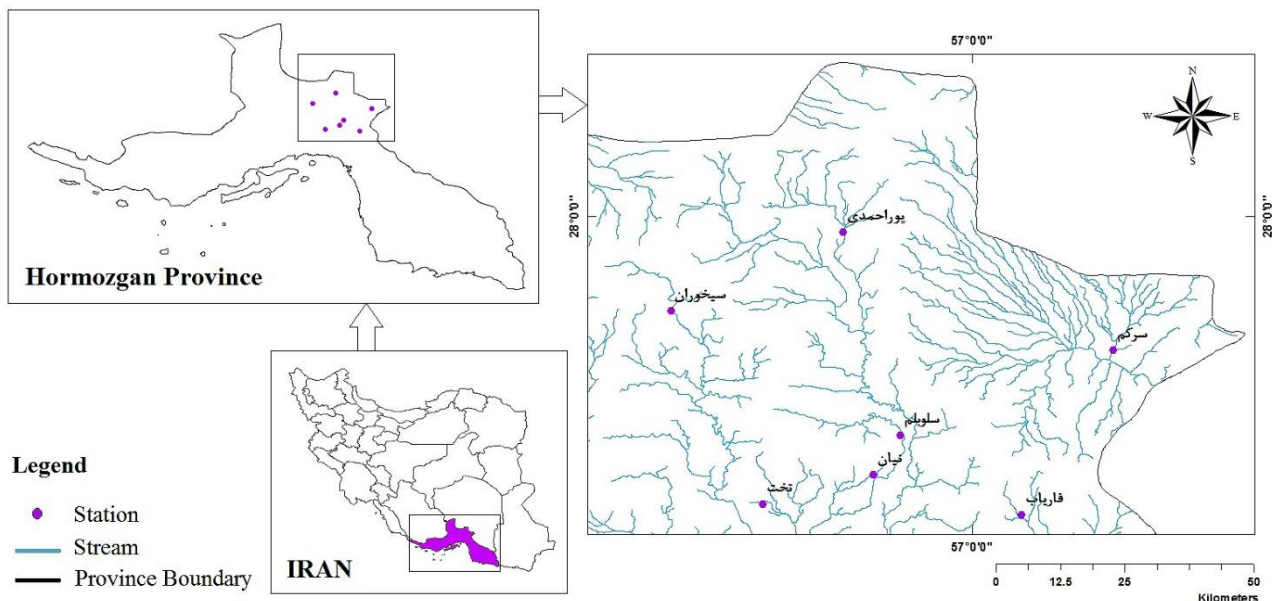
با توجه به موارد ذکر شده وجود داده‌های بارندگی مکانی و زمانی با وضوح بالا برای موارد بسیاری از جمله طرح‌های هیدرولوژیکی و مهندسی مانند طراحی سدها و پل‌ها، برآورد سیل‌ها و فراوانی وقوع آن‌ها، مدیریت رواناب شهری و بسیاری موارد دیگر بسیار حائز اهمیت است و ضرورت وجود داده‌های ورودی در بازه‌های زمانی کوتاه مدت برای بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیکی برجسته است. این امر، به ویژه در مناطق گرمسیری به دلیل وجود الگوهای بارندگی بسیار پیچیده، ضرورتی دو چندان دارد. بنابراین منطقه مورد مطالعه در این پژوهش منطقه شمال شرقی استان هرمزگان انتخاب گردید. با توجه به مزایایی که در مورد مدل‌های چند متغیره تفکیک بارش ذکر شد، برای تفکیک داده‌های بارش در این منطقه از مدل چند متغیره تفکیک بارش MuDRain استفاده شد. نظر به این که مطالعه‌ای

اعتبار این روش در صورت بارش‌های شدید محلی مانند بارش‌های همرفت ممکن است زیر سؤال برود. روش‌های پیچیده‌تر شامل روش‌های تفکیک چند متغیره و تولید تصادفی داده‌های بارندگی در پایه زمانی کوچک‌تر از روزانه است [۱۱]. رویکرد چند متغیره تفکیک بارندگی حتی برای مسائلی که به طور معمول به عنوان تک متغیره فرض می‌شده‌اند، در عمل دارای برتری قابل توجهی است؛ برای مثال، می‌توان تفکیک داده‌های روزانه بارش به بارندگی ساعتی را در نظر گرفت. این تفکیک، برای بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیکی دقیق که نیاز به داده ورودی در بازه زمانی ساعتی دارند، لازم است. یک مدل تفکیک تک متغیره مناسب، یک سری ساعتی مصنوعی تولید می‌کند که سازگاری کامل با داده‌های روزانه مشاهداتی دارد. همچنین، از نظر خصوصیات آماری با داده‌های بارش ساعتی واقعی سازگاری دارد اما تطابق کامل با آن ندارد. برای حل این مشکل، می‌توان از روش تفکیک چند متغیره بارش و بهره‌گیری از داده‌های بارندگی ساعتی در همسایگی ایستگاه مورد نظر استفاده کرد؛ با این شرط که همبستگی معنی‌دار متقابل بین بارش دو ایستگاه باران‌سنجی برقرار باشد (در عمل غالباً این طور است)؛ سپس از اطلاعات بارندگی ساعتی موجود در ایستگاه همسایه برای تولید سری بارندگی ساعتی و سازگار از لحاظ مکانی و زمانی با میزان بارش در ایستگاه مورد نظر استفاده کرد. در اینجا، همبستگی مکانی به مزیت تبدیل شده است [۲۱ و ۲۲]، زیرا در ترکیب با اطلاعات بارندگی ایستگاه‌های دارای سری بارش ساعتی، امکان ایجاد سری بارش‌های ساعتی واقع‌بینانه را فراهم می‌کند [۲۳]. روش ارائه شده توسط کوتسویانیس^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۳ چندین مدل بارندگی تک متغیره و چند متغیره را در یک چارچوب تفکیک به نام MuDRain ترکیب می‌کند [۱۲]. مدل چند متغیره تفکیک باران MuDRain روشی برای تفکیک مکانی-زمانی بارندگی است. به طور خاص، این روش را می‌توان برای به دست آوردن سری بارندگی ساعتی با ویژگی سازگاری مکانی در ایستگاه‌هایی که فقط داده‌های روزانه در دسترس است، به کار برد [۱].

کوتسویانیس و همکاران برای ارزیابی مدل چند متغیره تفکیک بارش MuDRain از داده‌های تاریخی پنج ایستگاه باران‌سنج در حوضه آبریز برو^۲ استفاده کردند. نتایج نشان داد این روش منجر به حفظ ویژگی‌های مهم فرایند بارندگی ساعتی مانند گشتاور مرزی^۳ بارش، همبستگی‌های زمانی و مکانی، نسبت‌ها و طول فواصل خشک و همچنین بازتولید خوب

4 Hyetograph
5 Fytilas
6 Tiber
7 Variance
8 Lag one autocorrelation of coefficient
9 Lag zero cross-correlation of coefficient
10 Debele
11 Cedar Creek

1 Koutsoyiannis
2 Brue
3 Marginal moment



شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه

Fig. 1. Map of study area

۲-۲- مدل تفکیک چندمتغیره MuDRain

کوتسویانیس و همکاران در سال ۲۰۰۳ یک مدل تفکیک بارندگی چند متغیره ساده را توسعه دادند. این مدل با این فرض که بارندگی روزانه می‌تواند با یک فرایند خودهمبسته^۱ دارای تأخیر یک واحد (AR(1)) به خوبی نشان داده شود در نرم‌افزار MuDRain پیاده‌سازی شد [۱۱]. مدل‌های خود همبسته از اوایل دهه ۱۹۶۰ در پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی به کار رفت و دارای ویژگی‌های سادگی ساختار و درک مستقیم بین همبستگی مقادیر زمان حال با زمان‌های پیشین در سری زمانی است. این مدل بر اساس زنجیره مارکوف بنا نهاده شده است. یک سری زمانی وقتی از زنجیره مارکوف تبعیت می‌کند که هر رخدادی در زمان t با زمان‌های قبل و بعد از خود مرتبط باشد [۲۵]. بنابراین برای n تا مکان، فرض می‌شود که مدل بارش چند متغیره ساده یک فرایند AR(1) است که با رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$X_t = aX_{t-1} + bV_t \quad (1)$$

در زمینه بررسی کارایی مدل چند متغیره تفکیک بارش MuDRain در استان هرمزگان صورت نگرفته است، هدف از این پژوهش ارزیابی کارایی این مدل در تولید داده‌های ساعتی بارش برای منطقه و ارزیابی میزان نزدیکی داده‌های شبیه‌سازی شده به داده‌های واقعی می‌باشد. این امر پس از آماده‌سازی داده‌ها برای ورود به مدل، پردازش و شبیه‌سازی و در نهایت تحلیل خروجی نرم‌افزار صورت می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

برای انجام این تحقیق، آمار بارش در ایستگاه‌های نیان، تخت، سلولیم، سیخوران، یوراحمدی، قاریاب و سرکم، واقع در شمال شرقی استان هرمزگان مد نظر قرار گرفت و آمار روزانه و در پایه زمانی کوچک‌تر از روزانه از شرکت سهامی آب منطقه‌ای هرمزگان دریافت شد. نقشه منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده و مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ درج شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 1. Characteristics of under study stations

شماره	نام ایستگاه	رودخانه	محدوده مطالعاتی	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	نوع ایستگاه
۱	نیان	زندان گرو	شمیل - تخت	۵۶/۸۲۸	۲۷/۵۴۹	۱۱۰	باران سنج معمولی و ثابت
۲	تخت	جلابی	شمیل - تخت	۵۶/۶۳۵	۲۷/۴۹۸	۴۰	تبخیر سنجی
۳	سلوبلم	کلم	شمیل - تخت	۵۶/۸۷۵	۲۷/۶۱۸	۱۹۴	تبخیر سنجی
۴	سیخوران	جاماش	شمیل - تخت	۵۶/۴۷۵	۲۷/۸۳۵	۹۰۰	تبخیر سنجی
۵	پورا احمدی	زندان	احمدی	۵۶/۷۷۶	۲۷/۹۷۲	۹۷۷	تبخیر سنجی
۶	فاریاب	میناب	رودان	۵۷/۰۸۷	۲۷/۴۸۰	۳۰۰	تبخیر سنجی
۷	سرکم	شیرین	مسافرآباد	۵۷/۲۴۷	۲۷/۷۶۷	۴۴۰	تبخیر سنجی

داده‌های ناقص کم‌تری داشتند. با بررسی داده‌های دریافت شده ۷ ایستگاه از مجموع ۸ ایستگاه با طول آماری ۹ سال (از سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶) انتخاب شدند (محدوده و موقعیت ایستگاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است).

(ب) بازسازی نواقص آماری ایستگاه‌ها

جهت بازسازی نواقص آماری ایستگاه‌ها از آمار ایستگاه‌های اطراف به شرح زیر استفاده شده است:

اگر آمار بارش مربوط به ایستگاه X غیرموجود باشد و ایستگاه‌های ۱، ۲، ...، n ، در مجاورت ایستگاه X قرار داشته باشند، N_x متوسط بارندگی سالانه ایستگاه X و N_1, N_2, \dots, N_n ، ...، N_n متوسط بارندگی سالانه ایستگاه‌های ۱، ۲، ...، n ، باشند، P_x داده بارش مفقود مربوط به ایستگاه X و P_1, P_2, \dots, P_n ، ...، P_n به ترتیب آمار بارندگی ایستگاه‌های مذکور باشد، چنانچه اختلاف N_1, N_2, \dots, N_n ، ...، N_n کم‌تر از ۱۰ درصد N_x باشد در این صورت برای به دست آوردن P_x از روش میانگین‌گیری ریاضی مطابق رابطه (۳) استفاده می‌شود:

$$P_x = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{n} \quad (3)$$

ولی اگر اختلاف N_1, N_2, \dots, N_n ، ...، N_n بیش‌تر از ۱۰ درصد N_x باشد از رابطه (۴) استفاده می‌شود (روش نسبت نرمال) [۲۶].

در این معادله X_t و X_{t-1} بردارهای بارش ساعتی در n مکان، به ترتیب در زمان‌های $t-1$ و t هستند؛ a و b ماتریس پارامترها، هر کدام به ابعاد $[n \times n]$ هستند؛ V_t یک دنباله مستقل با توزیع یکسان (IID^1) از متغیرهای تصادفی نوآوری شده و به شکل یک ماتریس ستونی با n عضو است [۲۱].

از سوی دیگر، می‌توان به کمک برخی توابع غیرخطی ارتفاع بارش ساعتی X_t را به ارتفاع بارش ساعتی X_t^* تبدیل کرد؛ برای مثال، تبدیل لگاریتمی $X_t^* = \ln(X_t + \zeta)$ با مقدار ثابت ζ و یا تبدیل توانی $X_t^* = X_t^{(p)}$ با توان ثابت p را می‌توان نام برد [۶]. در این صورت، رابطه (۱) با رابطه (۲) جایگزین می‌شود [۲۳]:

$$X_t^* = aX_{t-1}^* + bV_t \quad (2)$$

۲-۳- مراحل اجرای پژوهش

الف) آماده‌سازی داده‌ها

با بررسی آمار بارش روزانه و در پایه زمانی کوچک‌تر از روزانه شرکت سهامی آب منطقه‌ای هرمزگان مشخص شد که داده‌های دریافتی شامل داده‌های بارش ۲۲ ایستگاه بوده است. منطقه مورد مطالعه قسمتی از استان هرمزگان در نظر گرفته شد که تراکم ایستگاه‌ها در آن بیش‌تر بوده است. محدوده مشخص شده شامل ۸ ایستگاه بوده است. ایستگاه‌هایی به عنوان ایستگاه‌های مورد مطالعه انتخاب شدند که در یک بازه زمانی مشترک،

1 Independent Identically Distributed

فرض کرد [۲۷ و ۷].

$$P_x = \frac{1}{n} \left[P_1 \frac{N_x}{N_1} + P_2 \frac{N_x}{N_2} + \dots + P_n \frac{N_x}{N_n} \right] \quad (۴)$$

ت) ارزیابی کارایی مدل در تولید داده‌های ساعتی

ارزیابی کارایی مدل با مقایسه داده ساعتی تولید شده توسط مدل و داده‌های مشاهداتی انجام می‌شود. تعدادی از موارد شامل نمودارهای خروجی از جمله همبستگی بارش ساعتی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده هر ایستگاه با ایستگاه‌های دیگر، نسبت دوره خشک (تعداد ساعت‌های بدون بارش تقسیم بر تعداد کل ساعت‌ها)، انحراف استاندارد، ضریب چولگی و ضریب خودهمبستگی با تأخیر یک واحد توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود. برای بررسی میزان تأثیر همبستگی بین ایستگاه‌ها بر دقت تولید داده‌های ساعتی علاوه بر سری زمانی ۱۲ ماه سال در دوره ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ از سری زمانی یک ماه منتخب در دوره ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ و سری زمانی ۱۲ ماه یک سال منتخب نیز استفاده می‌شود. شاخص‌های ضریب همبستگی (R^1) بین بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مربوط به هر ایستگاه و ضریب ناش-ساتکلیف (NSE^2) جهت ارزیابی کارایی مدل در تولید داده‌های ساعتی برای هر سری زمانی استفاده می‌شود [۲۸].

• ضریب همبستگی R : میزان همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. دامنه تغییرات این ضریب بین -۱ تا +۱ است و هر چه قدر مطلق ضریب همبستگی به یک نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بالاتر است. مقدار این ضریب با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(S_i - \bar{S}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}_i)^2}} \quad (۶)$$

که در رابطه بالا، O_i داده‌های مشاهداتی، S_i داده‌های شبیه‌سازی، \bar{O}_i میانگین داده‌های مشاهداتی، \bar{S}_i میانگین داده‌های شبیه‌سازی و n تعداد داده‌ها است.

• ضریب NSE : ضریب ناش-ساتکلیف نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب یک نزدیک است، بنابراین مقدار بهینه آن یک است. این ضریب با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

پ) مراحل شبیه‌سازی

برای ارزیابی کارایی مدل فرض می‌شود داده‌های ساعتی ایستگاه نیان وجود ندارد. با استفاده از داده‌های ساعتی و روزانه سایر ایستگاه‌ها و داده‌های روزانه ایستگاه نیان، داده‌های ساعتی بارش ایستگاه نیان با مدل $Mud-Rain$ شبیه‌سازی می‌شود.

برای انجام تفکیک بارندگی از مقیاس روزانه به ساعتی، باید یک فایل با قالب مناسب تعریف شود. این برنامه با استفاده از سه فایل مختلف کار می‌کند:

۱. فایلی با نام `input.dat` (فایل متنی) حاوی ضرایب همبستگی متقابل بین داده‌های بارندگی ایستگاه‌های مختلف در مقیاس زمانی ساعتی، تعداد باران‌سنج‌ها با اطلاعات روزانه، تعداد باران‌سنج‌ها با اطلاعات ساعتی، تعداد روزهای تفکیک و در نهایت حاوی نام دو فایل متنی ذکر شده در ادامه، حاوی اطلاعات ساعتی و روزانه مشاهداتی است.

۲. فایلی با نام `daily.inp` با اطلاعات روزانه موجود.

۳. فایلی با نام `hourly.inp` با اطلاعات ساعتی موجود.

پس از تعریف فایل `input.dat` توسط کاربر، $MudRain$ به طور خودکار از دو فایل دیگر با اطلاعات لازم برای تفکیک استفاده می‌کند. مراحل برآورد پارامترها، تفکیک داده‌های روزانه به ساعتی و مقایسه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ساعتی بارش در قالب نمودار و جدول توسط نرم‌افزار صورت می‌گیرد [۱].

کوتسویانیس و همکاران در سال ۲۰۰۳ روش زیر را برای محاسبه همبستگی متقابل ایستگاه‌های ماهواره‌ای ارائه دادند:

$$r_{ij,h} = (r_{ij,d})^m \quad (۵)$$

که $r_{ij,h}$ ضریب همبستگی متقابل بین باران‌سنج i و j در مقیاس زمانی ساعتی، $r_{ij,d}$ ضریب همبستگی متقابل در مقیاس زمانی روزانه و m ثابتی است که باید تخمین زده شود. اگر داده‌های ساعتی برای چندین ایستگاه در دسترس باشد، ضرایب همبستگی واقعی را می‌توان در مدل اعمال کرد. اگر داده ساعتی در دسترس نباشد، مقدار m را می‌توان در محدوده ۲ تا ۳

1 Correlation Coefficient

2 Nash-Sutcliffe

صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - S_i| \quad (10)$$

۳- نتایج و بحث

پس از تفکیک داده‌های بارش توسط مدل، خروجی به دو صورت عددی و نموداری تهیه شد. نمودارهای خروجی شامل همبستگی بارش ساعتی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده هر ایستگاه با ایستگاه‌های دیگر (برای هر سری زمانی ۷ نمودار و در مجموع ۲۱ نمودار)، نسبت دوره خشک، انحراف استاندارد، ضریب چولگی و ضریب خودهمبستگی با تأخیر یک واحد می‌باشد (برای هر یک از این چهار مورد و هر سری زمانی یک نمودار و در مجموع برای ۳ سری زمانی، ۱۲ نمودار خروجی وجود دارد).

در ابتدا ماتریس همبستگی بارش روزانه و ساعتی بین ایستگاه‌های مختلف برای ۱۲ ماه سال در دوره ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ محاسبه شد. مطابق جدول‌های ۲ و ۳، محدوده تغییرات همبستگی بین داده‌های روزانه از ۰/۳۲۱ تا ۰/۷۵۷ و همبستگی بین داده‌های ساعتی (بدون در نظر گرفتن ایستگاه نیان) از ۰/۰۶۸ تا ۰/۴۵۲ متغیر بوده است. با توجه به پایین بودن میزان همبستگی‌ها برای ۱۲ ماه سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶، جهت ارزیابی بهتر کارایی مدل، دو سری زمانی دیگر شامل سری زمانی بارش ساعتی و روزانه ماه‌های آذر از سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ (میانگین همبستگی‌های روزانه و ساعتی بین ایستگاه‌ها در ماه آذر نسبت به سایر ماه‌ها بالاتر بوده است) و سری زمانی بارش ساعتی و روزانه سال ۱۳۹۵ (میانگین همبستگی‌های روزانه و ساعتی بین ایستگاه‌ها در سال ۱۳۹۵ نسبت به سایر سال‌ها بالاتر بوده است) نیز به مدل داده شد؛ در ادامه، به ازای هر یک از سری‌های زمانی مورد اشاره یک مرتبه و در مجموع سه خروجی مجزا از مدل گرفته شد. شکل ۲ نمودارهای همبستگی مربوط به بارش ساعتی ماه آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ ایستگاه نیان با ۶ ایستگاه دیگر را برای نمونه نشان می‌دهد. اطلاعات سایر نمودارهای همبستگی در جدول‌های ۴ تا ۷ درج شده است. مطابق جدول‌های ۴ و ۵ در سری زمانی مربوط به بارش ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ محدود تغییرات همبستگی بین داده‌های مشاهداتی روزانه از ۰/۵۴۵ تا ۰/۹۳۷ و همبستگی بین داده‌های مشاهداتی ساعتی (بدون در نظر گرفتن ایستگاه نیان) از ۰/۱۶۲ تا ۰/۵۸۲ متغیر بوده است. همچنین، مطابق جدول‌های ۶ و ۷ در سری زمانی مربوط به بارش سال ۱۳۹۵ محدود

$$NSE = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \right] \quad (7)$$

ج) ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی بیشینه بارش

برای ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی بیشینه بارش‌ها و همچنین بررسی تأثیر همبستگی بین ایستگاه‌ها بر دقت شبیه‌سازی بارش‌های شدید، تعدادی از بیشینه بارش‌های مربوط به هر سری زمانی انتخاب می‌شوند. با توجه به یکسان بودن تعداد داده‌های مربوط به هر سری (هر بیشینه بارش روزانه ۲۴ ساعت برای هر سری زمانی) علاوه بر شاخص‌هایی که در قسمت قبل ذکر شد، از شاخص‌های مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، میانگین مربعات خطا (MSE^2) و میانگین مطلق خطا (MAE^3) نیز استفاده می‌شود [۲۹].

- شاخص $RMSE$: یکی از شاخص‌های مهم است که برای ارزیابی کارایی مدل استفاده می‌شود. هر چه مقدار $RSME$ به صفر نزدیک‌تر باشد نشان دهنده عملکرد بالای مدل است. این شاخص با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (8)$$

- شاخص MSE : این شاخص از صفر در عملکرد عالی تا بی‌نهایت می‌تواند تغییر کند.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2 \quad (9)$$

- شاخص MAE : هر چه میزان MAE کم‌تر باشد، نشان دهنده کارایی بیش‌تر مدل است و بهترین مقدار آن برابر صفر است. این شاخص به

-
- 1 Root Mean Square Error
 - 2 Mean Squared Error
 - 3 Mean Absolute Error

جدول ۲. ماتریس همبستگی بین بارش‌های روزانه ایستگاه‌های مورد مطالعه برای ۱۲ ماه سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶

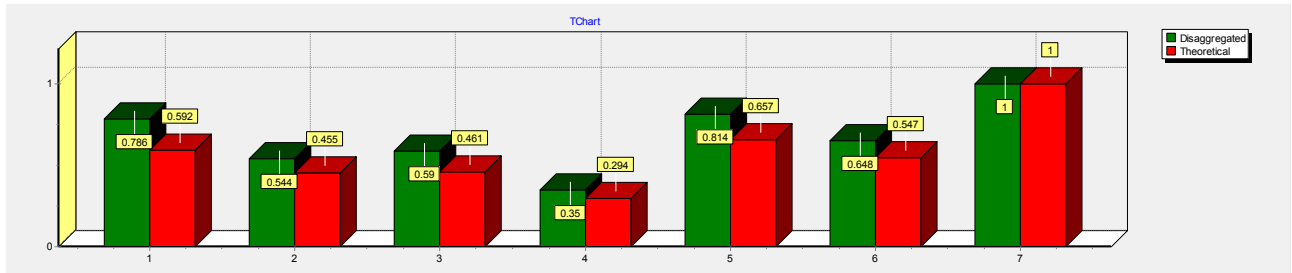
Table 2. Correlation matrix between daily rainfalls of under study stations for 12 months of 1388-1396 years

۱۲ ماه سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶							
ایستگاه	سلولم	سیخوران	تخت	فاریاب	سرکم	پوراحمدی	نیان
سلولم	۱/۰۰۰	۰/۵۶۵	۰/۷۵۰	۰/۵۷۱	۰/۷۵۷	۰/۴۷۲	۰/۶۴۷
سیخوران	۰/۵۶۵	۱/۰۰۰	۰/۵۱۰	۰/۴۰۱	۰/۵۴۳	۰/۵۲۴	۰/۴۳۵
تخت	۰/۷۵۰	۰/۵۱۰	۱/۰۰۰	۰/۵۴۹	۰/۶۵۷	۰/۴۰۴	۰/۶۵۶
فاریاب	۰/۵۷۱	۰/۴۰۱	۰/۵۴۹	۱/۰۰۰	۰/۵۹۷	۰/۳۲۱	۰/۶۴۰
سرکم	۰/۷۵۷	۰/۵۴۳	۰/۶۵۷	۰/۵۹۷	۱/۰۰۰	۰/۴۸۵	۰/۵۵۳
پوراحمدی	۰/۴۷۲	۰/۵۲۴	۰/۴۰۴	۰/۳۲۱	۰/۴۸۵	۱/۰۰۰	۰/۳۳۳
نیان	۰/۶۴۷	۰/۴۳۵	۰/۶۵۶	۰/۶۴۰	۰/۵۵۳	۰/۳۳۳	۱/۰۰۰

جدول ۳. ضرایب همبستگی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بین بارش‌های ساعتی ایستگاه‌های مورد مطالعه برای ۱۲ ماه سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶

Table 3. Observed and simulated correlation coefficients among hourly rainfalls of under study stations for 12 months of 1388-1396 years

۱۲ ماه سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶								
ایستگاه	نوع داده	سلولم	سیخوران	تخت	فاریاب	سرکم	پوراحمدی	نیان
سلولم	مشاهداتی	۱/۰۰۰	۰/۱۹۸	۰/۴۴۹	۰/۲۱۷	۰/۴۵۲	۰/۲۰۴	۰/۳۴۳
	شبیه‌سازی	۱/۰۰۰	۰/۱۹۸	۰/۴۴۹	۰/۲۱۸	۰/۴۵۲	۰/۲۰۴	۰/۵۹۸
سیخوران	مشاهداتی	۰/۱۹۸	۱/۰۰۰	۰/۱۷۷	۰/۱۱۳	۰/۲۰۲	۰/۲۱۴	۰/۱۳۰
	شبیه‌سازی	۰/۱۹۸	۱/۰۰۰	۰/۱۷۸	۰/۱۱۱	۰/۲۰۲	۰/۲۱۳	۰/۲۳۷
تخت	مشاهداتی	۰/۴۴۹	۰/۱۷۷	۱/۰۰۰	۰/۱۹۳	۰/۳۷۱	۰/۱۶۷	۰/۳۵۶
	شبیه‌سازی	۰/۴۴۹	۰/۱۷۸	۱/۰۰۰	۰/۱۹۳	۰/۳۷۱	۰/۱۶۶	۰/۶۵۱
فاریاب	مشاهداتی	۰/۲۱۷	۰/۱۱۳	۰/۱۹۳	۱/۰۰۰	۰/۲۹۹	۰/۱۱۷	۰/۳۳۴
	شبیه‌سازی	۰/۲۱۸	۰/۱۱۱	۰/۱۹۳	۱/۰۰۰	۰/۲۹۷	۰/۱۱۱	۰/۴۹۶
سرکم	مشاهداتی	۰/۴۵۲	۰/۲۰۲	۰/۳۷۱	۰/۲۹۹	۱/۰۰۰	۰/۲۰۱	۰/۲۳۴
	شبیه‌سازی	۰/۴۵۲	۰/۲۰۲	۰/۳۷۱	۰/۲۹۷	۱/۰۰۰	۰/۲۰۰	۰/۴۳۹
پوراحمدی	مشاهداتی	۰/۲۰۴	۰/۲۱۴	۰/۱۶۷	۰/۱۱۷	۰/۲۰۱	۱/۰۰۰	۰/۰۶۸
	شبیه‌سازی	۰/۲۰۴	۰/۲۱۳	۰/۱۶۶	۰/۱۱۱	۰/۲۰۰	۱/۰۰۰	۰/۲۰۱
نیان	مشاهداتی	۰/۳۴۳	۰/۱۳۰	۰/۳۵۶	۰/۳۳۴	۰/۲۳۴	۰/۰۶۸	۱/۰۰۰
	شبیه‌سازی	۰/۵۹۸	۰/۲۳۷	۰/۶۵۱	۰/۴۹۶	۰/۴۳۹	۰/۲۰۱	۱/۰۰۰



شکل ۲. ضرایب همبستگی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بارش ساعتی ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ بین ایستگاه نیان با ایستگاه‌های دیگر (۱- سلولیم، ۲- سیخوران، ۳- تخت، ۴- فاریاب، ۵- سرکم، ۶- پوراحمدی، ۷- نیان)

Fig. 2. Observed and simulated correlation coefficients of hourly rainfall, Azar months years 1388-1396 Between Nian station and other stations (1- Solubalm, 2- Sikhooran, 3- Takht, 4- Fariab, 5- Sarkam, 6- Pourahmadi, 7- Nian)

جدول ۴. ماتریس همبستگی بین بارش‌های روزانه ایستگاه‌های مورد مطالعه برای ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶

Table 4. Correlation matrix between daily rainfalls of under study stations

ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶							ایستگاه
نیان	پوراحمدی	سرکم	فاریاب	تخت	سیخوران	سلولیم	
۰/۸۴۰	۰/۸۴۶	۰/۸۸۲	۰/۷۷۸	۰/۶۸۵	۰/۸۵۳	۱/۰۰۰	سلولیم
۰/۷۶۹	۰/۹۳۷	۰/۷۵۲	۰/۵۴۸	۰/۶۵۳	۱/۰۰۰	۰/۸۵۳	سیخوران
۰/۷۷۲	۰/۶۱۲	۰/۷۳۶	۰/۵۷۹	۱/۰۰۰	۰/۶۵۳	۰/۶۸۵	تخت
۰/۶۶۵	۰/۵۴۵	۰/۸۱۶	۱/۰۰۰	۰/۵۷۹	۰/۵۴۸	۰/۷۷۸	فاریاب
۰/۸۶۹	۰/۷۵۱	۱/۰۰۰	۰/۸۱۶	۰/۷۳۶	۰/۷۵۲	۰/۸۸۲	سرکم
۰/۸۱۸	۱/۰۰۰	۰/۷۵۱	۰/۵۴۵	۰/۶۱۲	۰/۹۳۷	۰/۸۴۶	پوراحمدی
۱/۰۰۰	۰/۸۱۸	۰/۸۶۹	۰/۶۶۵	۰/۷۷۲	۰/۷۶۹	۰/۸۴۰	نیان

جدول ۵. ضرایب همبستگی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بین بارش‌های ساعتی ایستگاه‌های مورد مطالعه برای ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶

Table 5. Observed and simulated correlation coefficients among hourly rainfalls of under study stations for Azar months of 1388-1396 years

ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶								
ایستگاه	نوع داده	سلوبلم	سیخوران	تخت	فاریاب	سرکم	پوراحمدی	نیان
سلوبلم	مشاهداتی	۱/۰۰۰	۰/۳۰۲	۰/۴۳۰	۰/۲۶۹	۰/۵۷۰	۰/۵۵۷	۰/۵۹۲
	شبیه‌سازی	۱/۰۰۰	۰/۳۰۴	۰/۴۳۱	۰/۲۷۲	۰/۵۷۴	۰/۵۶۰	۰/۷۸۶
سیخوران	مشاهداتی	۰/۳۰۲	۱/۰۰۰	۰/۲۰۶	۰/۱۶۲	۰/۳۱۸	۰/۳۰۴	۰/۴۵۵
	شبیه‌سازی	۰/۳۰۴	۱/۰۰۰	۰/۲۰۳	۰/۱۵۰	۰/۳۱۵	۰/۳۰۴	۰/۵۴۴
تخت	مشاهداتی	۰/۴۳۰	۰/۲۰۶	۱/۰۰۰	۰/۳۷۱	۰/۵۸۲	۰/۳۷۲	۰/۴۶۱
	شبیه‌سازی	۰/۴۳۱	۰/۲۰۳	۱/۰۰۰	۰/۳۶۴	۰/۵۸۰	۰/۳۷۰	۰/۵۹۰
فاریاب	مشاهداتی	۰/۲۶۹	۰/۱۶۲	۰/۳۷۱	۱/۰۰۰	۰/۴۶۶	۰/۲۹۰	۰/۲۹۴
	شبیه‌سازی	۰/۲۷۲	۰/۱۵۰	۰/۳۶۴	۱/۰۰۰	۰/۴۵۴	۰/۲۵۷	۰/۳۵۰
سرکم	مشاهداتی	۰/۵۷۰	۰/۳۱۸	۰/۵۸۲	۰/۴۶۶	۱/۰۰۰	۰/۴۸۶	۰/۶۵۷
	شبیه‌سازی	۰/۵۷۴	۰/۳۱۵	۰/۵۸۰	۰/۴۵۴	۱/۰۰۰	۰/۴۸۴	۰/۸۱۴
پوراحمدی	مشاهداتی	۰/۵۵۷	۰/۳۰۴	۰/۳۷۲	۰/۲۹۰	۰/۴۸۶	۱/۰۰۰	۰/۵۴۷
	شبیه‌سازی	۰/۵۶۰	۰/۳۰۴	۰/۳۷۰	۰/۲۵۷	۰/۴۸۴	۱/۰۰۰	۰/۶۴۸
نیان	مشاهداتی	۰/۵۹۲	۰/۴۵۵	۰/۴۶۱	۰/۲۹۴	۰/۶۵۷	۰/۵۴۷	۱/۰۰۰
	شبیه‌سازی	۰/۷۸۶	۰/۵۴۴	۰/۵۹۰	۰/۳۵۰	۰/۸۱۴	۰/۶۴۸	۱/۰۰۰

مقایسه عددی آمارهای مشاهداتی هر ایستگاه، مشاهداتی استفاده شده در مدل و شبیه‌سازی، شامل آمارهای نسبت دوره خشک، انحراف استاندارد، ضریب چولگی و ضریب خود همبستگی با تأخیر یک واحد برای سری‌های زمانی بارش ساعتی ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶، ۱۲ ماه سال ۱۳۹۵ و ۱۲ ماه سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ به ترتیب در جدول‌های ۸ تا ۱۰ درج شده است. با توجه به اعداد درج شده، مدل در بازتولید ویژگی‌های آماری دقت بالایی دارد و اعداد مربوط به داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ۶ ایستگاه تقریباً یکسان هستند. نتایج ارزیابی کارایی مدل در بازتولید داده‌های ساعتی بارش در جدول ۱۱ درج شده است. مقدار شاخص‌ها با دقت ۴ رقم اعشار در جدول درج شده‌اند که اعداد نشان دهنده دقت بالای مدل است. ایستگاه نیان که نیاز به شبیه‌سازی بارش ساعتی دارد در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مقایسه نسبت طول دوره خشک مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در هر

تغییرات همبستگی بین داده‌های مشاهداتی روزانه از ۰/۶۹۹ تا ۰/۹۵۰ و همبستگی بین داده‌های مشاهداتی ساعتی (بدون در نظر گرفتن ایستگاه نیان) از ۰/۲۵۳ تا ۰/۶۲۲ متغیر بوده است. با توجه به جدول‌های ۵ و ۷، اعداد مربوط به داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ۶ ایستگاه تقریباً یکسان هستند و بنابراین، مدل در بازتولید همبستگی ساعتی دقت بالایی دارد.

نمودارهای خروجی مقایسه آمار مشاهداتی و شبیه‌سازی، شامل آمارهای نسبت دوره خشک، انحراف استاندارد، ضریب چولگی و ضریب خود همبستگی با تأخیر یک واحد به ترتیب در شکل‌های ۳ تا ۶ برای سری زمانی بارش ساعتی ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، آمار مشاهداتی حاصل میانگین آمارهای ایستگاه‌هایی است که داده‌های ساعتی آن‌ها در دسترس است؛ این آمار که با رنگ قرمز و عبارت Theoretical مشخص شده برای ایستگاه‌های مختلف یکسان است.

جدول ۶. ماتریس همبستگی بین بارش‌های روزانه ایستگاه‌های مورد مطالعه برای ۱۲ ماه سال ۱۳۹۵

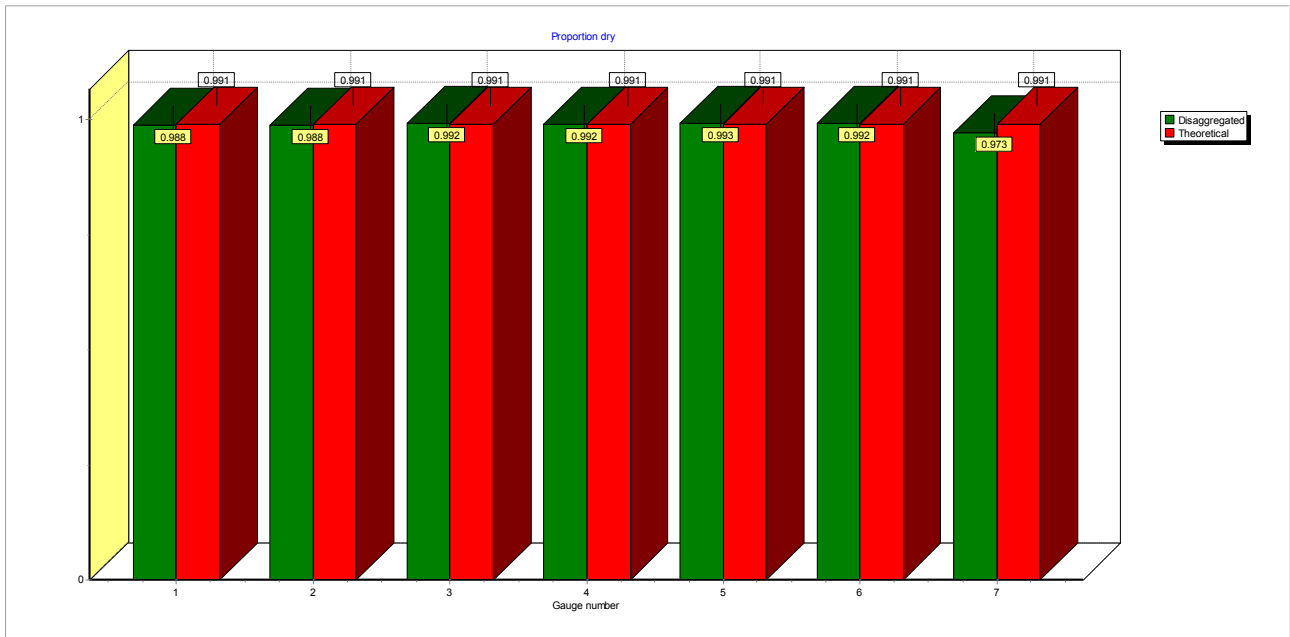
Table 6. Correlation matrix between daily rainfalls of under study stations for 12 months of 1395

۱۲ ماه سال ۱۳۹۵							
ایستگاه	سلولیم	سیخوران	تخت	فاریاب	سرکم	پوراحمدی	نیان
سلولیم	۱/۰۰۰	۰/۶۹۹	۰/۹۵۰	۰/۷۵۲	۰/۸۲۴	۰/۷۷۷	۰/۷۸۳
سیخوران	۰/۶۹۹	۱/۰۰۰	۰/۷۸۹	۰/۸۱۳	۰/۸۸۶	۰/۸۳۰	۰/۷۸۲
تخت	۰/۹۵۰	۰/۷۸۹	۱/۰۰۰	۰/۸۱۶	۰/۸۹۵	۰/۸۶۶	۰/۷۷۳
فاریاب	۰/۷۵۲	۰/۸۱۳	۰/۸۱۶	۱/۰۰۰	۰/۹۰۶	۰/۷۳۳	۰/۷۷۳
سرکم	۰/۸۲۴	۰/۸۸۶	۰/۸۹۵	۰/۹۰۶	۱/۰۰۰	۰/۸۹۴	۰/۷۶۱
پوراحمدی	۰/۷۷۷	۰/۸۳۰	۰/۸۶۶	۰/۷۳۳	۰/۸۹۴	۱/۰۰۰	۰/۷۲۶
نیان	۰/۷۸۳	۰/۷۸۲	۰/۷۷۳	۰/۷۷۳	۰/۷۶۱	۰/۷۲۶	۱/۰۰۰

جدول ۷. ضرایب همبستگی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بین بارش‌های ساعتی ایستگاه‌های مورد مطالعه برای ۱۲ ماه سال ۱۳۹۵

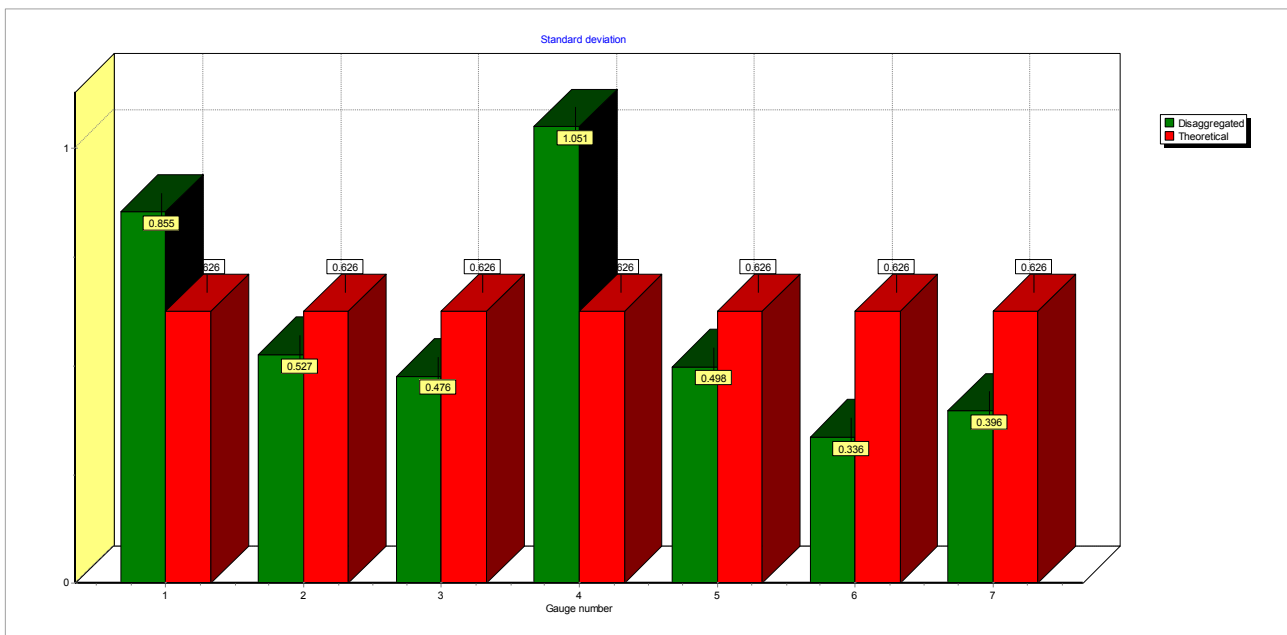
Table 7. Observed and simulated correlation coefficients among hourly rainfalls of under study stations for 12 months of 1395

۱۲ ماه سال ۱۳۹۵								
ایستگاه	نوع داده	سلولیم	سیخوران	تخت	فاریاب	سرکم	پوراحمدی	نیان
سلولیم	مشاهداتی	۱/۰۰۰	۰/۳۱۸	۰/۵۳۱	۰/۵۰۳	۰/۶۲۲	۰/۴۱۹	۰/۴۸۱
	شبیه‌سازی	۱/۰۰۰	۰/۳۱۹	۰/۵۳۱	۰/۵۰۳	۰/۶۲۲	۰/۴۲۰	۰/۷۲۰
سیخوران	مشاهداتی	۰/۳۱۸	۱/۰۰۰	۰/۴۲۸	۰/۲۵۳	۰/۴۰۵	۰/۵۰۵	۰/۴۷۸
	شبیه‌سازی	۰/۳۱۹	۱/۰۰۰	۰/۴۲۳	۰/۲۵۶	۰/۴۰۶	۰/۵۰۴	۰/۵۴۵
تخت	مشاهداتی	۰/۵۳۱	۰/۴۲۸	۱/۰۰۰	۰/۳۱۸	۰/۴۲۲	۰/۳۷۱	۰/۴۶۲
	شبیه‌سازی	۰/۵۳۱	۰/۴۲۳	۱/۰۰۰	۰/۳۱۸	۰/۴۲۲	۰/۳۷۱	۰/۶۹۷
فاریاب	مشاهداتی	۰/۵۰۳	۰/۴۲۳	۰/۳۱۸	۱/۰۰۰	۰/۵۰۷	۰/۳۴۰	۰/۴۶۲
	شبیه‌سازی	۰/۵۰۳	۰/۴۲۳	۰/۳۱۸	۱/۰۰۰	۰/۵۰۸	۰/۳۴۱	۰/۵۸۶
سرکم	مشاهداتی	۰/۶۲۲	۰/۴۰۵	۰/۴۲۲	۰/۵۰۷	۱/۰۰۰	۰/۴۵۲	۰/۴۴۰
	شبیه‌سازی	۰/۶۲۲	۰/۴۰۶	۰/۴۲۲	۰/۵۰۸	۱/۰۰۰	۰/۴۵۳	۰/۵۸۴
پوراحمدی	مشاهداتی	۰/۴۱۹	۰/۵۰۵	۰/۳۷۱	۰/۳۴۰	۰/۴۵۲	۱/۰۰۰	۰/۳۸۲
	شبیه‌سازی	۰/۴۲۰	۰/۵۰۴	۰/۳۷۱	۰/۳۴۱	۰/۴۵۲	۱/۰۰۰	۰/۵۰۳
نیان	مشاهداتی	۰/۴۸۱	۰/۴۷۸	۰/۴۶۲	۰/۴۶۲	۰/۴۴۰	۰/۳۸۲	۱/۰۰۰
	شبیه‌سازی	۰/۷۲۰	۰/۵۴۵	۰/۶۹۷	۰/۵۸۶	۰/۵۸۴	۰/۵۰۳	۱/۰۰۰



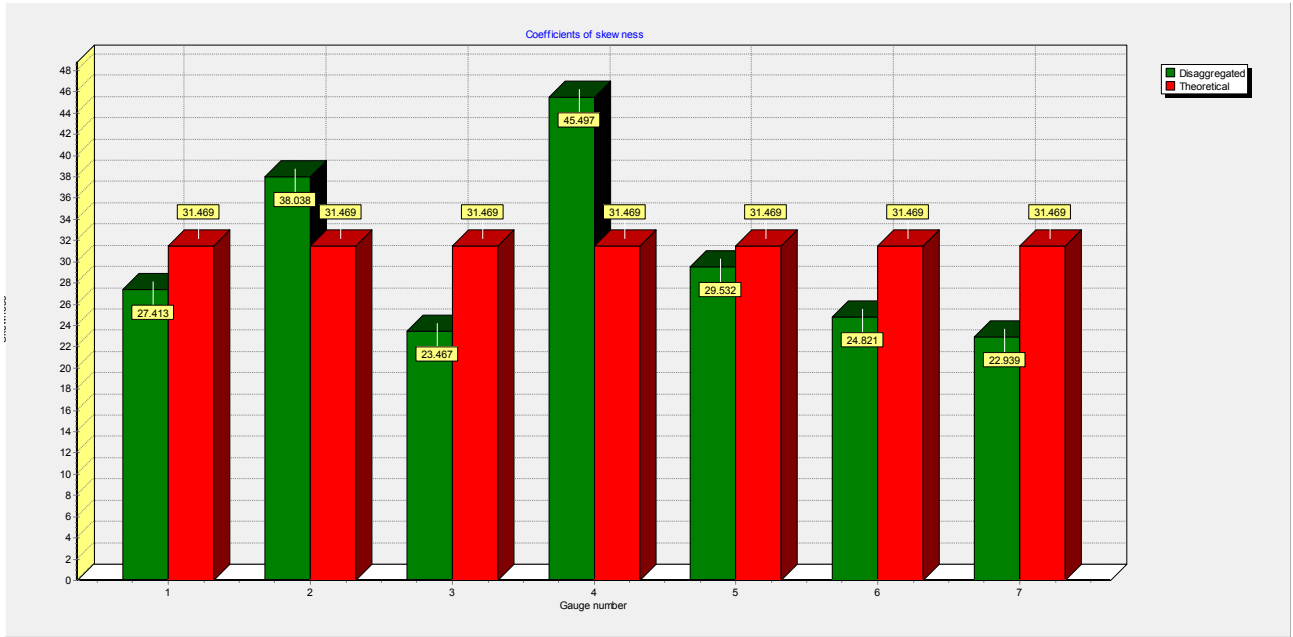
شکل ۳. مقایسه نسبت دوره خشک مشاهداتی (استفاده شده در مدل) و شبیه‌سازی شده بارش ساعته ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ (۱- سلولبلم، ۲- سیخوران، ۳- تخت، ۴- فاریاب، ۵- سرکم، ۶- پوراحمدی، ۷- نیان)

Fig. 3. Comparison of the dry period ratio of observed (used in the model) and simulated hourly rainfall of Azar months 1388-1396 years (1- Solubalm, 2- Sikhooran, 3- Takht, 4- Fariab, 5- Sarkam, 6- Pourahmadi, 7- Nian)



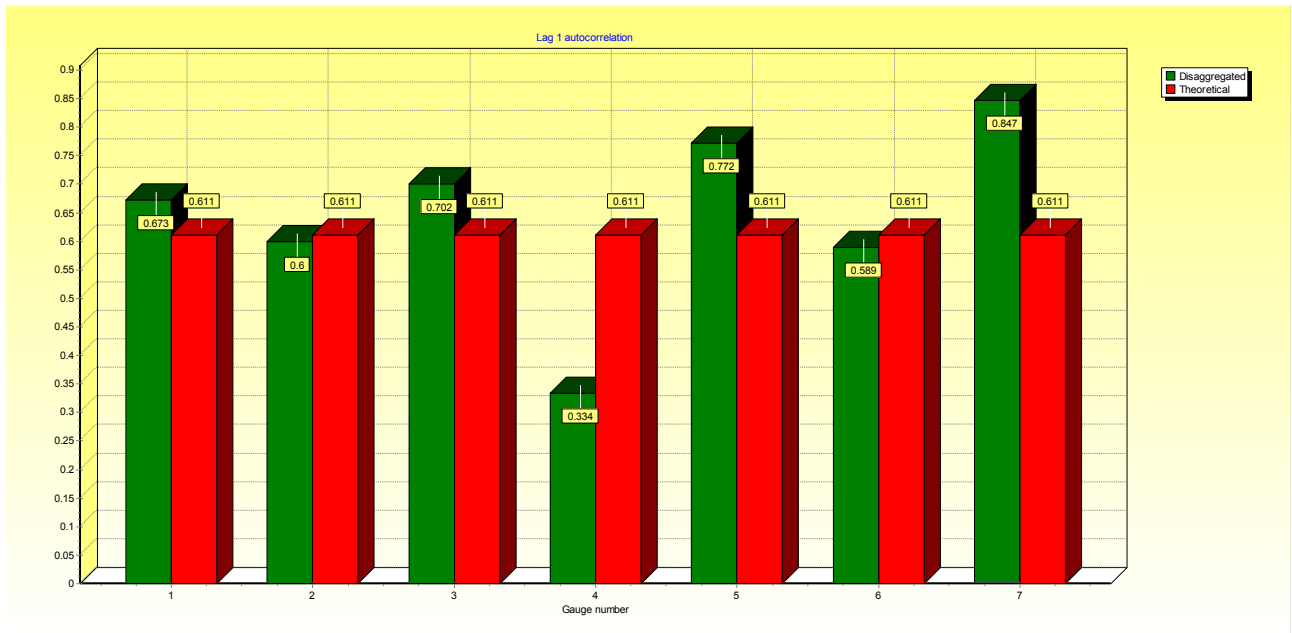
شکل ۴. مقایسه انحراف استاندارد مشاهداتی (استفاده شده در مدل) و شبیه‌سازی شده بارش ساعته ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ (۱- سلولبلم، ۲- سیخوران، ۳- تخت، ۴- فاریاب، ۵- سرکم، ۶- پوراحمدی، ۷- نیان)

Fig. 4. Comparison of the standard deviation of observed (used in the model) and simulated hourly rainfall of Azar months of 1388-1396 years (1- Solubalm, 2- Sikhooran, 3- Takht, 4- Fariab, 5- Sarkam, 6- Pourahmadi, 7- Nian)



شکل ۵. مقایسه ضریب چولگی مشاهداتی (استفاده شده در مدل) و شبیه‌سازی شده بارش ساعتی ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ (۱- سلولبلم، ۲- سیخوران، ۳- تخت، ۴- فاریاب، ۵- سرکم، ۶- پوراحمدی، ۷- نیان)

Fig. 5. Comparison of the skewness coefficient of observed (used in the model) and simulated hourly rainfall of Azar months of 1388-1396 years (1- Solubalm, 2- Sikhooran, 3- Takht, 4- Fariab, 5- Sarkam, 6- Pourahmadi, 7- Nian)



شکل ۶. مقایسه ضریب خود همبستگی با تأخیر یک واحد مشاهداتی (استفاده شده در مدل) و شبیه‌سازی شده بارش ساعتی ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ (۱- سلولبلم، ۲- سیخوران، ۳- تخت، ۴- فاریاب، ۵- سرکم، ۶- پوراحمدی، ۷- نیان)

Fig. 6. Comparison of the lag one autocorrelation coefficient of observed (used in the model) and simulated hourly rainfall of Azar months of 1388-1396 years (1- Solubalm, 2- Sikhooran, 3- Takht, 4- Fariab, 5- Sarkam, 6- Pourahmadi, 7- Nian)

جدول ۸. مقایسه آمارهای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بارش ساعتی برای ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶

Table 8. Comparison of observed and simulated statistics of hourly rainfalls for Azar months of 1388-1396 years

ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶							نوع داده	ایستگاه
نیان	پورا احمدی	سرکم	فاریاب	تخت	سیخوران	سلولیم		
۰/۹۹۲	۰/۹۹۲	۰/۹۹۳	۰/۹۹۲	۰/۹۹۲	۰/۹۸۸	۰/۹۸۹	مشاهداتی	
۰/۹۹۱	۰/۹۹۱	۰/۹۹۱	۰/۹۹۱	۰/۹۹۱	۰/۹۹۱	۰/۹۹۱	مشاهداتی (استفاده شده در مدل)	نسبت دوره خشک
۰/۹۷۳	۰/۹۹۲	۰/۹۹۳	۰/۹۹۲	۰/۹۹۲	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	شبیه‌سازی	
۰/۶۳۷	۰/۳۳۷	۰/۵۰۱	۱/۰۶۰	۰/۴۷۷	۰/۵۲۸	۰/۸۵۵	مشاهداتی	
۰/۶۲۶	۰/۶۲۶	۰/۶۲۶	۰/۶۲۶	۰/۶۲۶	۰/۶۲۶	۰/۶۲۶	مشاهداتی (استفاده شده در مدل)	انحراف استاندارد
۰/۳۹۶	۰/۳۳۶	۰/۴۹۸	۱/۰۵۱	۰/۴۷۶	۰/۵۲۷	۰/۸۵۵	شبیه‌سازی	
۲۸/۹۲۴	۲۴/۶۵۵	۲۹/۳۹۶	۴۶/۰۰۲	۲۳/۴۰۳	۳۷/۹۱۳	۲۷/۴۰۲	مشاهداتی	
۳۱/۴۶۹	۳۱/۴۶۹	۳۱/۴۶۹	۳۱/۴۶۹	۳۱/۴۶۹	۳۱/۴۶۹	۳۱/۴۶۹	مشاهداتی (استفاده شده در مدل)	ضریب چولگی
۲۲/۹۳۹	۲۴/۸۲۱	۲۹/۵۳۲	۴۵/۴۹۷	۲۳/۴۶۷	۳۸/۰۳۸	۲۷/۴۱۳	شبیه‌سازی	
۰/۵۳۵	۰/۵۹۰	۰/۷۷۳	۰/۳۲۶	۰/۷۰۳	۰/۶۰۱	۰/۶۷۳	مشاهداتی	ضریب خود
۰/۶۱۱	۰/۶۱۱	۰/۶۱۱	۰/۶۱۱	۰/۶۱۱	۰/۶۱۱	۰/۶۱۱	مشاهداتی (استفاده شده در مدل)	همبستگی با تأخیر یک واحد
۰/۸۴۷	۰/۵۸۹	۰/۷۷۲	۰/۳۳۴	۰/۷۰۲	۰/۶۰۰	۰/۶۷۳	شبیه‌سازی	

شده ساعتی به روزانه و مقایسه آن با سری زمانی روزانه مشاهداتی می‌توان دید که مدل در حفظ مجموع بارش هر روز توانایی صد در صدی دارد. این مورد باعث شده که در مجموع، کل بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نیز در هر سری زمانی با هم مطابقت داشته باشد.

جهت ارزیابی مدل در شبیه‌سازی بیشینه بارش‌ها، ۲ بیشینه بارش از هر سری زمانی انتخاب شد. بیشینه بارش‌های انتخابی در جدول ۱۳ درج شده است. سپس داده‌های ساعتی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مربوط به هر روز، به صورت نموداری با یکدیگر مقایسه شدند. شکل‌های ۷ تا ۹ این مقایسه‌ها را برای هر سری زمانی نشان می‌دهد. بررسی نمودارها نشان می‌دهد که عملکرد مدل در شبیه‌سازی بیشینه بارش‌ها تا حدودی ضعیف است و مدل مقادیر شدید را دست کم گرفته است. همچنین در دوره شبیه‌سازی به اندازه کافی حوادث شدید بارشی ایجاد نکرده است. نتایج مربوط به ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی بیشینه بارش برای تاریخ‌های منتخب در جدول ۱۴ درج شده است. مقایسه شاخص‌های مختلف برای هر تاریخ نیز همین نتیجه را

سری زمانی مطابق جدول‌های ۸ تا ۱۰ نشان می‌دهد که مدل این نسبت را برای ایستگاه نیان کم‌تر مدل‌سازی می‌کند، به این صورت که بارش مربوط به یک روز را در تعداد ساعت‌های بیش‌تری از روز توزیع می‌کند، همچنین انحراف استاندارد و ضریب چولگی در هر سری زمانی برای ایستگاه نیان به میزان کم‌تری شبیه‌سازی شده است. در نتیجه انتظار می‌رود که مدل دقت بالایی در تولید بیشینه بارش‌ها نداشته باشد.

نتایج مربوط به ارزیابی کل کارایی مدل در شبیه‌سازی داده‌های بارش ساعتی ایستگاه نیان در جدول ۱۲ درج شده است. ضریب همبستگی بین بارش ساعتی مشاهداتی و شبیه‌سازی و ضریب ناش-ساتکلیف در ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ نسبت به دو سری زمانی دیگر بیش‌تر است. همچنین این ضریب در سری زمانی ۱۲ ماه سال ۱۳۹۵ بیش‌تر از سری زمانی ۹ ساله است. در اینجا اهمیت تأثیر همبستگی ساعتی بین ایستگاه‌ها مشخص می‌شود. هر چه همبستگی ساعتی ورودی به مدل بیش‌تر باشد، دقت مدل برای شبیه‌سازی بیش‌تر خواهد بود. با تبدیل سری زمانی شبیه‌سازی

جدول ۹. مقایسه آمارهای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بارش ساعتی برای ۱۲ ماه سال ۱۳۹۵

Table 9. Comparison of observed and simulated statistics of hourly rainfalls for 12 months of 1395

ایستگاه	نوع داده	سلولیم	سیخوران	تخت	فاریاب	سرکم	پوراحمدی	نیان
	مشاهداتی	۰/۹۸۷	۰/۹۸۳	۰/۹۸۷	۰/۹۸۵	۰/۹۸۶	۰/۹۸۹	۰/۹۹۴
نسبت دوره خشک	مشاهداتی (استفاده شده در مدل)	۰/۹۸۶	۰/۹۸۶	۰/۹۸۶	۰/۹۸۶	۰/۹۸۶	۰/۹۸۶	۰/۹۸۶
	شبیه‌سازی	۰/۹۸۷	۰/۹۸۳	۰/۹۸۷	۰/۹۸۴	۰/۹۸۶	۰/۹۸۹	۰/۹۸۳
	مشاهداتی	۰/۸۸۵	۰/۴۰۸	۰/۷۳۱	۰/۳۶۶	۰/۳۰۲	۰/۲۵۰	۰/۴۲۳
انحراف استاندارد	مشاهداتی (استفاده شده در مدل)	۰/۴۹۰	۰/۴۹۰	۰/۴۹۰	۰/۴۹۰	۰/۴۹۰	۰/۴۹۰	۰/۴۹۰
	شبیه‌سازی	۰/۸۸۵	۰/۴۰۵	۰/۷۳۱	۰/۳۶۶	۰/۳۰۲	۰/۲۴۹	۰/۲۹۱
	مشاهداتی	۲۸/۳۳۵	۲۴/۵۳۱	۴۱/۲۹۶	۲۶/۱۵۴	۲۱/۲۸۲	۲۰/۶۴۷	۳۱/۴۸۳
ضریب چولگی	مشاهداتی (استفاده شده در مدل)	۲۷/۰۴۶	۲۷/۰۴۶	۲۷/۰۴۶	۲۷/۰۴۶	۲۷/۰۴۶	۲۷/۰۴۶	۲۷/۰۴۶
	شبیه‌سازی	۲۸/۳۴۱	۲۴/۲۳۱	۴۱/۳۰۳	۲۶/۱۹۸	۲۱/۲۸۵	۲۰/۶۸۶	۲۸/۵۷۵
	مشاهداتی	۰/۷۴۳	۰/۵۸۲	۰/۵۴۴	۰/۴۶۵	۰/۷۰۱	۰/۵۲۴	۰/۴۳۸
ضریب خود همبستگی با تأخیر یک واحد	مشاهداتی (استفاده شده در مدل)	۰/۵۹۳	۰/۵۹۳	۰/۵۹۳	۰/۵۹۳	۰/۵۹۳	۰/۵۹۳	۰/۵۹۳
	شبیه‌سازی	۰/۷۴۳	۰/۵۷۹	۰/۵۴۴	۰/۴۶۵	۰/۷۰۱	۰/۲۵۲	۰/۸۰۹

جدول ۱۰. مقایسه آمارهای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بارش ساعتی برای ۱۲ ماه سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶

Table 10. Comparison of observed and simulated statistics of hourly rainfalls for 12 months of 1388-1396 years

۱۲ ماه سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶								
ایستگاه	نوع داده	سلولیم	سیخوران	تخت	فاریاب	سرکم	پوراحمدی	نیان
	مشاهداتی	۰/۹۹۲	۰/۹۸۹	۰/۹۹۴	۰/۹۹۳	۰/۹۹۴	۰/۹۹۲	۰/۹۹۵
نسبت دوره خشک	مشاهداتی (استفاده شده در مدل)	۰/۹۹۲	۰/۹۹۲	۰/۹۹۲	۰/۹۹۲	۰/۹۹۲	۰/۹۹۲	۰/۹۹۲
	شبیه‌سازی	۰/۹۹۲	۰/۹۸۹	۰/۹۹۴	۰/۹۹۳	۰/۹۹۴	۰/۹۹۲	۰/۹۶۳
	مشاهداتی	۰/۶۳۳	۰/۴۶۵	۰/۴۹۱	۰/۵۲۷	۰/۳۲۱	۰/۲۸۹	۰/۵۱۰
انحراف استاندارد	مشاهداتی (استفاده شده در مدل)	۰/۴۵۴	۰/۴۵۴	۰/۴۵۴	۰/۴۵۴	۰/۴۵۴	۰/۴۵۴	۰/۴۵۴
	شبیه‌سازی	۰/۶۳۳	۰/۴۶۶	۰/۴۹۱	۰/۵۲۶	۰/۳۲۱	۰/۲۸۹	۰/۲۵۵
	مشاهداتی	۴۳/۴۴۷	۵۳/۳۲۸	۵۵/۶۴۹	۵۶/۵۱۳	۴۱/۲۱۲	۳۱/۳۶۰	۵۶/۴۵۳
ضریب چولگی	مشاهداتی (استفاده شده در مدل)	۴۶/۹۱۹	۴۶/۹۱۹	۴۶/۹۱۹	۴۶/۹۱۹	۴۶/۹۱۹	۴۶/۹۱۹	۴۶/۹۱۹
	شبیه‌سازی	۴۳/۴۴۳	۵۳/۳۱۴	۵۵/۶۶	۵۶/۲۴۱	۴۱/۲۱۲	۳۱/۴۳۲	۳۳/۶۴۹
	مشاهداتی	۰/۵۱۳	۰/۴۹۵	۰/۵۰۱	۰/۴۰۶	۰/۶۳۵	۰/۵۴۹	۰/۴۱۹
ضریب خود همبستگی با تأخیر یک واحد	مشاهداتی (استفاده شده در مدل)	۰/۵۱۷	۰/۵۱۷	۰/۵۱۷	۰/۵۱۷	۰/۵۱۷	۰/۵۱۷	۰/۵۱۷
	شبیه‌سازی	۰/۵۱۳	۰/۴۹۴	۰/۵۰۱	۰/۴۰۸	۰/۶۳۵	۰/۵۴۶	۰/۷۳۳

جدول ۱۱. ارزیابی کارایی مدل در بازتولید داده‌های ساعتی بارش

Table 11. Evaluation of model efficiency for reproduction of hourly rainfall data

پورااحمدی	سرکم	فاریاب	تخت	سیخوران	سلولیم	شاخص	نوع سری زمانی
۰/۹۹۸۴	۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۸	۱/۰۰۰۰	R	ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶
۰/۹۹۶۸	۰/۹۹۹۱	۰/۹۹۹۸	۰/۹۹۹۸	۰/۹۹۹۶	۱/۰۰۰۰	NSE	
۰/۹۹۹۴	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۹۹	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۹۷	۱/۰۰۰۰	R	۱۲ ماه سال ۱۳۹۵
۰/۹۹۸۷	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۹۸	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۹۴	۱/۰۰۰۰	NSE	
۰/۹۹۹۶	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	R	۱۲ ماه سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶
۰/۹۹۹۳	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۹	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	NSE	

جدول ۱۲. ارزیابی کلی کارایی مدل در شبیه‌سازی بارش ساعتی ایستگاه نیان

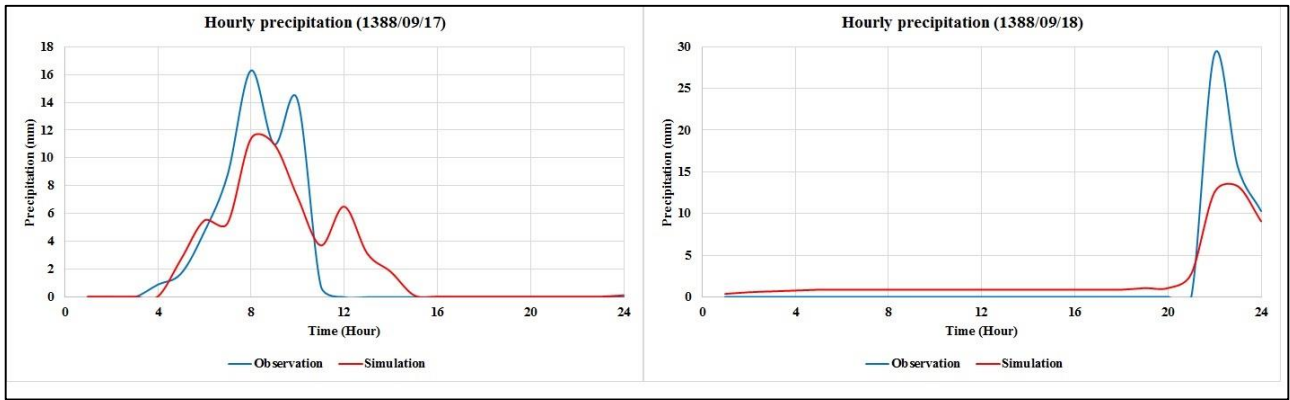
Table 12. General evaluation of model efficiency for simulation of hourly rainfall at Nian station

مجموع کل بارش شبیه‌سازی (mm)	مجموع کل بارش مشاهداتی (mm)	تطبیق بارش روزانه مشاهداتی با مجموع بارش‌های ساعتی شبیه‌سازی به روزانه	NSE	R	تعداد ساعت‌های تفکیک شده	نوع سری زمانی ورودی به مدل
۲۱۶/۴	۲۱۶/۴	✓	۰/۵۸۵۶	۰/۷۸۱۶	۶۴۸۰	ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶
۱۷۶/۹	۱۷۶/۹	✓	۰/۳۹۸۴	۰/۶۳۳۵	۸۷۸۴	۱۲ ماه سال ۱۳۹۵
۱۳۹۱/۱	۱۳۹۱/۱	✓	۰/۲۶۵۵	۰/۵۱۵۵	۷۸۸۸۸	۱۲ ماه سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶

جدول ۱۳. دو بیشینه بارش مربوط به هر سری زمانی در ایستگاه نیان

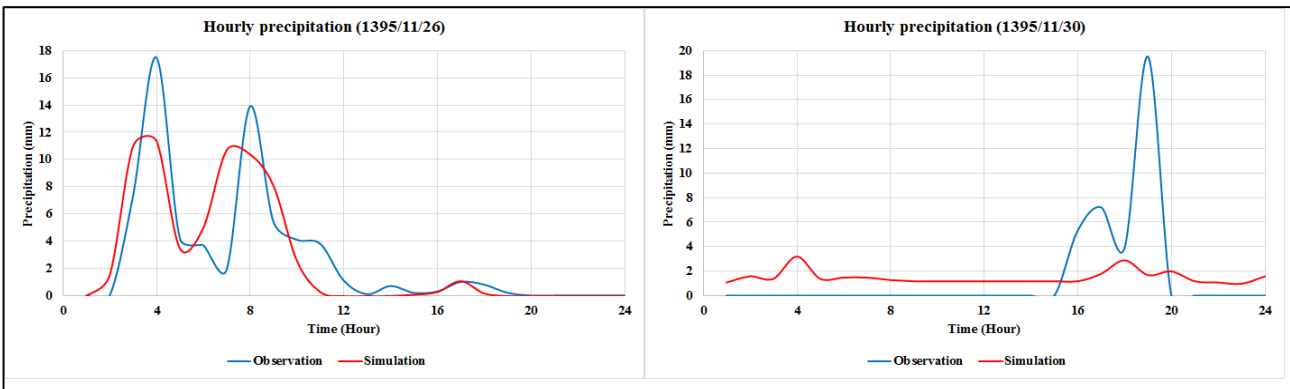
Table 13. Two maximum rainfall of each time series at Nian station

مجموع بارش (mm)	تاریخ بیشینه بارش ۲	مجموع بارش (mm)	تاریخ بیشینه بارش ۱	نوع سری زمانی ورودی به مدل
۵۵/۱	۱۸ آذر ۱۳۸۸	۵۸/۴	۱۷ آذر ۱۳۸۸	ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶
۳۵/۹	۳۰ بهمن ۱۳۹۵	۶۶/۲	۲۶ بهمن ۱۳۹۵	۱۲ ماه سال ۱۳۹۵
۸۶/۹	۱۹ اسفند ۱۳۹۴	۱۰۰/۷	۱۳ دی ۱۳۹۴	۱۲ ماه سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶



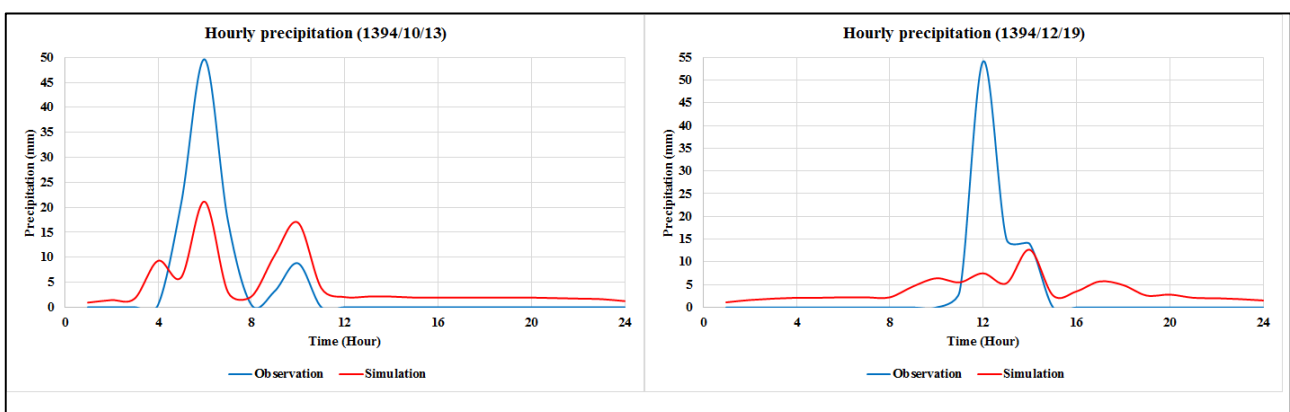
شکل ۷. نمودارهای مشاهداتی و شبیه‌سازی ۲ بیشینه بارش ایستگاه نیان مربوط به سری زمانی ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶

Fig. 7. Observed and simulated diagrams of two maximum rainfall of Nian station related to Azar month time series of 1388-1396 years



شکل ۸. نمودارهای مشاهداتی و شبیه‌سازی ۲ بیشینه بارش ایستگاه نیان مربوط به سری زمانی ۱۲ ماه سال ۱۳۹۵

Fig. 8. Observed and simulated diagrams of two maximum rainfall of Nian station related to 12-months time series of 1395



شکل ۹. نمودارهای مشاهداتی و شبیه‌سازی ۲ بیشینه بارش ایستگاه نیان مربوط به سری زمانی ۱۲ ماه سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶

Fig. 9. Observed and simulated diagrams of two maximum rainfall of Nian station related to 12-month time series of 1388-1396 years

جدول ۱۴. ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی بیشینه بارش برای تاریخ‌های منتخب

Table 14. Evaluation of model efficiency for simulation of maximum rainfall for selected dates

MSE	MAE	RMSE	NSE	R	تاریخ	نوع سری زمانی
۶/۳۰۱۷	۱/۳۵۸۳	۲/۵۱۰۳	۰/۷۲۵۱	۰/۸۶۱۲	۱۷ آذر ۱۳۸۸	ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶
۱۲/۷۳۰۸	۱/۶۷۵۰	۳/۵۶۸۰	۰/۷۱۵۹	۰/۹۳۱۹	۱۸ آذر ۱۳۸۸	
۷/۰۳۹۲	۱/۵۰۸۳	۲/۶۵۳۱	۰/۶۳۹۸	۰/۸۰۸۸	۲۶ بهمن ۱۳۹۵	۱۲ ماه سال ۱۳۹۵
۱۷/۰۰۹۲	۲/۳۵۸۳	۴/۱۲۴۲	۰/۰۳۱۹	۰/۱۸۹۸	۳۰ بهمن ۱۳۹۵	
۶۲/۴۴۲۵	۴/۸۰۰۰	۷/۹۰۲۱	۰/۴۷۶۳	۰/۷۴۳۴	۱۳ دی ۱۳۹۴	۱۲ ماه سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶
۱۰۳/۲۹۵۰	۴/۸۱۶۷	۱۰/۱۶۳۴	۰/۲۸۲۲	۰/۵۳۱۲	۱۹ اسفند ۱۳۹۴	

نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی بیشینه بارش‌ها برای تمام تاریخ‌های منتخب با دقت بالا عمل نکرده است. شاخص‌های R بین بازه ۰/۱۸۹۸ تا ۰/۹۳۱۹، NSE بین بازه ۰/۰۳۱۹ تا ۰/۷۲۵۱، $RMSE$ بین بازه ۲/۵۱۰۳ تا ۴/۸۱۶۷، MAE بین بازه ۱/۳۵۸۳ تا ۲/۳۵۸۳ و MSE بین بازه ۶/۳۰۱۷ تا ۱۰۳/۲۹۵۰ متغیر بوده است.

نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی بیشینه بارش‌ها برای تمام تاریخ‌های منتخب با دقت بالا عمل نکرده است. شاخص‌های R بین بازه ۰/۱۸۹۸ تا ۰/۹۳۱۹، NSE بین بازه ۰/۰۳۱۹ تا ۰/۷۲۵۱، $RMSE$ بین بازه ۲/۵۱۰۳ تا ۴/۸۱۶۷، MAE بین بازه ۱/۳۵۸۳ تا ۲/۳۵۸۳ و MSE بین بازه ۶/۳۰۱۷ تا ۱۰۳/۲۹۵۰ متغیر بوده است.

نتایج مطالعه حناییش (۲۰۱۶) [۴] در شبه‌جزیره مالزی مشابهت دارد. مقایسه تأثیر همبستگی ساعتی نشان داد که دقت مدل در شبیه‌سازی بارش ساعتی مربوط به سری زمانی ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ که میانگین همبستگی ساعتی بیش‌تری داشته است، بالاتر بوده و همبستگی ساعتی مشاهداتی و شبیه‌سازی و ضریب ناش-ساتکلیف در آن بیش‌تر بوده است. نتایج کلی نشان می‌دهد با توجه به این که ایستگاه‌های مورد مطالعه همبستگی ساعتی بالایی نداشته، دقت مدل نیز برای شبیه‌سازی کافی نبوده است و داده‌های تولید شده برای استفاده در طراحی‌هایی که نیازمند شبیه‌سازی دقیق بارش‌های شدید هستند، مناسب نمی‌باشند. در مجموع این مدل می‌تواند برای مناطقی که همبستگی ساعتی بسیار بالایی دارند با اطمینان بیش‌تری مورد استفاده قرار بگیرد، در این صورت همبستگی مکانی ایستگاه‌ها به یک مزیت تبدیل می‌شود، زیرا در ترکیب با اطلاعات بارش ساعتی ایستگاه‌های موجود، امکان ایجاد سری بارش‌های واقعی‌بینانه را داراست، اما در صورتی که میزان همبستگی ساعتی کافی نباشد باید ابتدا مدل مورد ارزیابی قرار بگیرد.

نتایج گیری

در این مطالعه به ارزیابی عملکرد تفکیک چند متغیره بارش با استفاده از مدل MuDRain در قسمتی از استان هرمزگان پرداخته شد. از داده‌های بارش روزانه ۷ ایستگاه و بارش ساعتی ۶ ایستگاه استفاده شد و مدل جهت شبیه‌سازی بارش ساعتی ۱ ایستگاه مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت بررسی تأثیر همبستگی ساعتی بین ایستگاه‌ها بر دقت شبیه‌سازی از سه سری زمانی مختلف شامل سری زمانی ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶، ۱۲ ماه سال ۱۳۹۵ و ۱۲ ماه سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ استفاده شد. مقایسه آمار مشاهداتی و شبیه‌سازی، شامل آمارهای نسبت دوره خشک، انحراف استاندارد، ضریب چولگی و ضریب خود همبستگی با تأخیر یک واحد نشان داد که مدل در بازتولید ویژگی‌های آماری دقت بالایی دارد و اعداد مربوط به داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ۶ ایستگاه تقریباً یکسان هستند. مقایسه نسبت طول دوره خشک مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در هر سری زمانی نشان داد که مدل این نسبت را کم‌تر مدل‌سازی می‌کند، به این صورت که بارش مربوط به یک روز را در تعداد ساعت‌های بیش‌تری از روز توزیع می‌کند، همچنین انحراف استاندارد و ضریب چولگی در هر سری زمانی برای ایستگاه نیان به میزان کم‌تری شبیه‌سازی شده است. مقایسه

۴- نتیجه‌گیری

نتایج گیری

در این مطالعه به ارزیابی عملکرد تفکیک چند متغیره بارش با استفاده از مدل MuDRain در قسمتی از استان هرمزگان پرداخته شد. از داده‌های بارش روزانه ۷ ایستگاه و بارش ساعتی ۶ ایستگاه استفاده شد و مدل جهت شبیه‌سازی بارش ساعتی ۱ ایستگاه مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت بررسی تأثیر همبستگی ساعتی بین ایستگاه‌ها بر دقت شبیه‌سازی از سه سری زمانی مختلف شامل سری زمانی ماه‌های آذر سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶، ۱۲ ماه سال ۱۳۹۵ و ۱۲ ماه سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶ استفاده شد. مقایسه آمار مشاهداتی و شبیه‌سازی، شامل آمارهای نسبت دوره خشک، انحراف استاندارد، ضریب چولگی و ضریب خود همبستگی با تأخیر یک واحد نشان داد که مدل در بازتولید ویژگی‌های آماری دقت بالایی دارد و اعداد مربوط به داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ۶ ایستگاه تقریباً یکسان هستند. مقایسه نسبت طول دوره خشک مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در هر سری زمانی نشان داد که مدل این نسبت را کم‌تر مدل‌سازی می‌کند، به این صورت که بارش مربوط به یک روز را در تعداد ساعت‌های بیش‌تری از روز توزیع می‌کند، همچنین انحراف استاندارد و ضریب چولگی در هر سری زمانی برای ایستگاه نیان به میزان کم‌تری شبیه‌سازی شده است. مقایسه

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از همکاری شرکت سهامی آب منطقه‌ای هرمزگان جهت در اختیار گذاشتن داده‌های مورد نیاز این پژوهش تقدیر و تشکر می‌نمایند.

- Watershed Management, 70(1) (2017) 87-100.
- [11] M. Ivković, A. Todorović, J. Plavšić, Improved input to distributed hydrologic model in areas with sparse subdaily rainfall data using multivariate daily rainfall disaggregation, *Journal of Hydroinformatics*, 20(4) (2018) 784-797.
- [12] U. Petry, Y. Hundecha, M. Pahlow, A. Schumann, Generation of severe flood scenarios by stochastic rainfall in combination with a rainfall runoff model, in: *RIMAX Contributions at the 4th International Symposium on Flood Defence (ISFD4)*, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, (2009).
- [13] D. Nijssen, A. Schumann, M. Pahlow, B. Klein, Planning of technical flood retention measures in large river basins under consideration of imprecise probabilities of multivariate hydrological loads, *Natural Hazards Earth System Sciences*, 9(4) (2009) 1349-1363.
- [14] S. Aswathy, N. Sajikumar, M. Mehra, Watershed Modelling Using Control System Concept, *Procedia Technology*, 24 (2016) 39-46.
- [15] M.A.J. Bakhshi, Firas, Disaggregation the Daily Rainfall Dataset into Sub-Daily Resolution in the Temperate Oceanic Climate Region, *International Journal of Marine Environmental Sciences*, 13(1) (2019) 11-16.
- [16] I.S. Hanaish, K. Ibrahim, A.A. Jemain, Daily rainfall disaggregation using HYETOS model for Peninsular Malaysia, *matrix*, 2 (2011) 1.
- [17] D.S. Knoesen, The development and assessment of a regionalised daily rainfall disaggregation model for South Africa, *Water SA*, 34(3) (2008) 323-330.
- [18] V.R. Dorneles, R.d.C. Damé, C.F. Teixeira-Gandra, L.B. Mélo, M.A. Ramirez, E.B. Manke, Intensity-duration-frequency relationships of rainfall through the technique of disaggregation of daily rainfall, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23 (2019) 506-510.
- [19] H. Park, G. Chung, A Nonparametric Stochastic Approach for Disaggregation of Daily to Hourly Rainfall Using 3-Day Rainfall Patterns, *Water*, 12(8) (2020) 2306.
- [20] T.D. Beyene, M.A. Moges, S. Tilahun, Development
- [1] P. Fytilas, Multivariate rainfall disaggregation at a fine time scale, Graduate thesis, University of Rome "La Sapienza", Rome, (2002).
- [2] D. Martins, M.L.T. Gandini, N.S. Kruk, P.I.B. Queiroz, Disaggregation of daily rainfall data for the Caraguatubá city, in São Paulo State, Brazil, *RBRH*, 24 (2019).
- [3] D.M. Knoesen, The development and assessment of techniques for daily rainfall disaggregation in South Africa, MSc Dissertation, University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg, South Africa, (2005).
- [4] I.S. Hanaish, Multivariate Rainfall Disaggregation Using MuDRain Model: Malaysia Experience, *International Journal of Civil, Mechanical Energy Science*, 2(2) (2016).
- [5] A. Shrestha, Impact of climate change on urban flooding in Sukhumvit area of Bangkok, Master of Science Thesis, Asian Institute of Technology UNESCO-IHE, Thailand, (2013).
- [6] M. Safeeq, A. Fares, Accuracy evaluation of ClimGen weather generator and daily to hourly disaggregation methods in tropical conditions, *Theoretical applied climatology*, 106(3) (2011) 321-341.
- [7] Y. Lu, Statistical downscaling and disaggregation for supporting regional climate change impact studies, Doctoral thesis, Nanyang Technological University, Singapore, 2015.
- [8] E. Dodangeh, K. Shahedi, K. Solaimani, Effect of Weather Station Selection on Parameterization of Modified Bartlett-Lewis Rectangular Pulse (BLRPM) and HSPF Models, *Journal of water and soil*, 31(3) (2017) 754-771.
- [9] M. Alavinia, F. Nasiri Saleh, Evaluation of Applicability of HSPF Model to Estimate Runoff and Sediment in Abaru Watershed in Hamedan Province, *Modares Civil Engineering journal*, 13(4) (2013) 61-70.
- [10] J. Dastorani, M. Mahdavi, A. Salajegheh, A.F. Fard, Simulation of Daily Stream Flows in Semi-Arid Mountainous Watersheds using Hydrological Simulation FORTRAN Program (HSPF), *Journal of Range and*

- [25] H.R. Safavi, Engineering hydrology, fourth edition, Arkane Danesh Publication, Isfahan, (2014). (in Persian)
- [26] A. Alizadeh, The Principles of Applied Hydrology, Imam Reza (AS) University, Mashhad, (2013). (in Persian)
- [27] Y. Lu, X. Qin, Multisite rainfall downscaling and disaggregation in a tropical urban area, Journal of Hydrology, 509 (2014) 55-65.
- [28] H. Bolouki, M. Fazeli, H. Sharifzade, Prediction of Climate Change Affects on Sistan and Baluchestan Province with Emphasis on Precipitation and Temperature Variables, in: 2nd International and 5th National Conference on the Conservation of Natural Resources and Environment, (2021). (in Persian)
- [29] H. Bolouki, Climate Change Detection and Extraction of Intensity-Duration-Frequency Curves Using Fractal Theory for Three South Coast Provinces of Iran, Yasouj University, Yasouj, (2021). (in Persian)
- of Rainfall Disaggregation Model in the Awash River Basin, Ethiopia, in: 6th EAI International Conference, ICAST 2018, Bahir Dar, Ethiopia, October 5-7, (2018).
- [21] D. Koutsoyiannis, C. Onof, H.S. Wheater, Multivariate rainfall disaggregation at a fine timescale, Water Resources Research, 39(7) (2003).
- [22] D. Koutsoyiannis, Rainfall disaggregation methods: Theory and applications, in: Workshop on Statistical and Mathematical Methods for Hydrological Analysis, Rome, (2003), pp. 1-23.
- [23] B. Debele, R. Srinivasan, J.Y. Parlange, Accuracy evaluation of weather data generation and disaggregation methods at finer timescales, Advances in water resources, 30(5) (2007) 1286-1300.
- [24] P. Fytilas, D. Koutsoyiannis, F. Napolitano, A case study of spatial-temporal rainfall disaggregation at the Tiber river basin, Italy, in: EGS-AGU-EUG Joint Assembly, (2003), pp. 2748.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Bolouki, M. Fazeli, Evaluation of Multivariate Rainfall Disaggregation Performance Using MuDRain Model (Case Study: North East of Hormozgan Province), Amirkabir J. Civil Eng., 54(12) (2023) 4657-4676.

DOI: 10.22060/ceej.2022.21063.7607

