

بررسی دقت و کارایی ماهواره TRMM در برآورد بارش ماهانه در حوضه آبخیز گرگانرود

حسین امامی^۱، علی سلاجقه^{۲*}، علیرضا مقدم‌نیا^۳، شهرام خلیقی سیگارودی^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۲. استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۳. دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۳/۲۲، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۳/۲۲)

چکیده

از روش‌های سنجش از دور ماهواره‌ای به‌ویژه ماهواره TRMM برای برآورد بارش حوضه‌های آبخیز با ایستگاه باران‌سنجی اندک و پراکنده استفاده می‌شود. به منظور اعتبارسنجی باید داده‌های بارش ماهواره TRMM با داده‌های بارش مشاهداتی مقایسه شوند. به همین منظور، در تحقیق حاضر ابتدا با استفاده از چهار روش آماری آزمون‌های همگنی نرمال استاندارد، دامنه بیوشند، پتیت و نسبت ون نیومن، کیفیت داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه آبخیز گرگانرود بررسی شد تا برآورد صحیحی از دقت و کارایی ماهواره TRMM داشته باشیم. پس از استخراج نتایج آزمون‌های همگنی و بررسی دقیق‌تر از طریق مقایسه با داده‌های ایستگاه‌های مجاور، یک ایستگاه مشکوک به دلیل مطابقت نداشتن با داده‌های ایستگاه‌های مجاور از روند تحقیق حذف شد. سپس، به منظور بررسی کارایی ماهواره TRMM در برآورد بارش ماهانه از طریق مقایسه آن با داده‌های بارش مشاهداتی از معیارهای آماری Bias، RMSE، R^2 و NSE استفاده شد. نتایج نشان داد مقدار R^2 برای تمامی ایستگاه‌های باران‌سنجی واقع در حوضه آبخیز گرگانرود بین ۰/۳۱ تا ۰/۷۵ است. RMSE بین ۱۵/۸۵ تا ۵۶/۸۲ به دست آمد. ایستگاه‌های باران‌سنجی که در حوضه آبخیز گرگانرود واقع شده‌اند، مقدار NSE بین ۰/۸۲- تا ۰/۶۶ دارند. شاخص آماری Bias بین ۵۵/۷۴- تا ۶۹/۰۱ است. همچنین، مقدار R^2 ، RMSE، NSE و Bias برای کل حوضه آبخیز گرگانرود به ترتیب ۰/۷۹، ۲۰/۹۴، ۰/۵۷ و ۲۸/۱۳- به دست آمد. نتایج ارزیابی دقت و کارایی ماهواره TRMM در برآورد بارش ماهانه نشان داد کارایی خوبی در برآورد بارش منطقه مطالعه شده دارد و برای مناطق بدون ایستگاه بسیار ارزشمند است.

کلیدواژه‌گان: آزمون‌های همگنی، اعتبارسنجی، برآورد بارش، حوضه آبخیز گرگانرود، ماهواره TRMM.

مقدمه

بارش به عنوان بخش مهمی از چرخه هیدرولوژی، پارامتر بسیار مهمی در مطالعات هیدرولوژی، هواشناسی و محیط زیست است. در حال حاضر، بارش بیشتر توسط سه منبع ایستگاه‌های باران‌سنجی، رادارهای زمینی و روش‌های سنجش از دور برآورد می‌شود [۱]. با توجه به توزیع ایستگاه‌های باران‌سنجی و شعاع مؤثر بسیار محدود آنها، اندازه‌گیری مقدار دقیق بارش، ممکن نیست [۲ و ۳]. علاوه بر این، سیستم‌های رادار زمینی به طور کلی برای نظارت و پایش رویدادهای شدید کوتاه‌مدت مناسب هستند، ولی برای وقایع طولانی‌مدت مناسب نیستند [۴]. داده‌های بارش ماهواره‌ای، می‌توانند با موفقیت به عنوان جایگزین برای شبکه‌های باران‌سنجی پراکنده، استفاده شوند [۱]. از جمله ماهواره‌هایی که کاربردهای آب‌هواشناسی دارند، می‌توان به ماهواره TRMM^۱ اشاره کرد که با همکاری سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحده آمریکا (NASA) و ژاناس اکتشاف فضایی ژاپن (JAXA) در ۲۸ نوامبر ۱۹۹۷ در یک مدار تقریباً دایره‌ای در ارتفاع تقریبی ۳۵۰ کیلومتری زمین و با زاویه ۳۵ درجه نسبت به استوا با دوره گردش زمانی ۹۱/۵ دقیقه به فضا پرتاب شد [۵]. این ماهواره داده‌های بارش را برای ۵۰ درجه جنوب تا ۵۰ درجه شمال عرض جغرافیایی با دقت زمانی سه‌ساعته و دقت مکانی ۰/۲۵ × ۰/۲۵ درجه طول و عرض جغرافیایی ارائه می‌دهد. اکبری و همکاران طی پژوهشی در استان خراسان رضوی به این نتیجه رسیدند که داده‌های بارش ماهواره TRMM در سری‌های زمانی ماهانه و فصلی با داده‌های بارش ایستگاه‌های زمینی همبستگی زیادی دارند، ولی در سری زمانی روزانه همبستگی بسیار کمی دارند [۶]. شیل و همکاران کارایی ماهواره TRMM-3B42-V6 را در منطقه مرکزی رشته‌کوه‌های آند ارزیابی و مقایسه کردند [۷]. نتایج تحقیق آنها نشان داد داده‌های بارش ماهواره‌ای تمایل به کم‌برآوردی بارندگی‌های شدید دارند و همبستگی بین داده‌های بارش مشاهداتی با داده‌های بارش ماهواره‌ای از سری زمانی روزانه به ماهانه بیشتر می‌شود. همچنین، با تغییر مقیاس مکانی از ۰/۲۵ × ۰/۲۵ به ۱ × ۱ همبستگی بین داده‌های بارش ماهواره‌ای

و ایستگاه‌های زمینی، بهبود معناداری می‌یابد. نتایج تحقیق جیفنگ و همکاران در منطقه جنوب غربی چین نشان داد داده‌های بارش ماهواره‌ای با داده‌های بارش مشاهداتی، همبستگی زیادی دارند، اما داده‌های بارش ماهواره‌ای دارای کم‌برآوردی بارش هستند [۸]. به طور کلی، آنها نتیجه گرفتند که می‌توان از داده‌های بارش ماهواره TRMM برای برنامه‌های کاربردی در منابع آب و هیدرولوژی در مناطق با ایستگاه پراکنده و اندک استفاده کرد. هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی دقت و کارایی ماهواره TRMM از طریق مقایسه آن با بارش مشاهده‌شده ایستگاه‌های باران‌سنجی در سری زمانی ماهانه و استفاده از این منبع اطلاعاتی با ارزش برای مطالعات هواشناسی و مدل‌سازی هیدرولوژیکی است و با توجه به اینکه پراکنش ایستگاه‌های باران‌سنجی در حوضه آبخیز گرگانود مناسب نیست، می‌توان از داده‌های بارش ماهواره TRMM به همراه داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی استفاده کرد. به همین منظور، ابتدا کیفیت و صحت داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی واقع در حوضه آبخیز گرگانود بررسی شد تا ارزیابی درست و دقیق‌تری از کارایی داده‌های بارش ماهواره TRMM داشته باشیم و سپس، اعتبارسنجی این داده‌ها از طریق مقایسه با داده‌های بارش مشاهداتی انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه‌شده

حوضه آبخیز گرگانود به مساحت ۱۳۱۷۰ کیلومترمربع در قسمت جنوب شرقی دریای خزر واقع شده است. بخش عمده این حوضه در استان گلستان واقع شده و بخش‌های بسیار کوچکی از آن در استان‌های خراسان شمالی و سمنان قرار دارد. این حوضه در بین مختصات جغرافیایی ۵۴° تا ۱۶° ۵۶° طول شرقی و ۳۴° تا ۳۶° ۴۷' تا ۳۷° عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). ۶۷ درصد آب سطحی استان گلستان، یعنی ۸۲۸ میلیون متر مکعب در این حوضه جریان دارد.

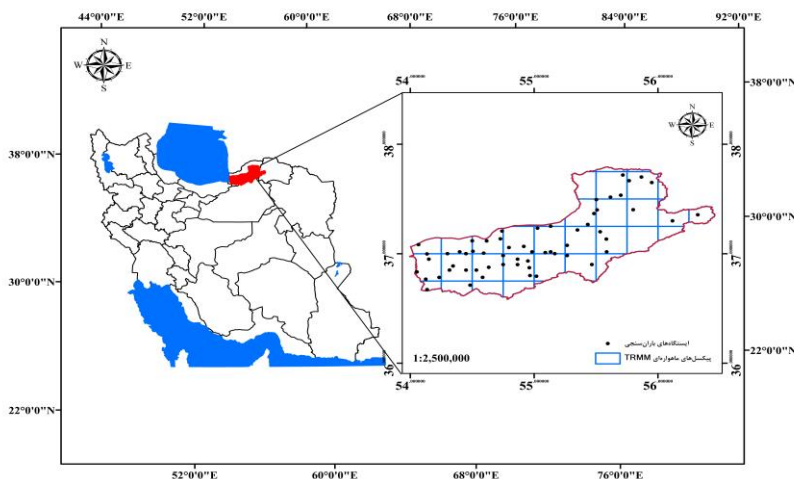
روش تحقیق

در تحقیق حاضر ابتدا داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه آبخیز گرگانود طی دوره ده‌ساله (۲۰۰۳-۲۰۱۲) از سازمان هواشناسی کشور و شرکت مدیریت منابع آب ایران دریافت شد (جدول ۱). سپس، از داده‌های بارش ماهواره TRMM-3B42 نسخه 7 (اصلاح‌شده با آمار مشاهده‌شده

1. Tropical Rainfall Measuring Mission
2. National Aeronautics and Space Administration
3. Japan Aerospace Exploration Agency

در ۸ آوریل ۲۰۱۵ غیرفعال و ماهواره GPM^۱ به عنوان جانشین در تاریخ ۲۷ فوریه ۲۰۱۴ برای مطالعه بارش (باران، برف و یخ) در مقیاس جهانی راه اندازی شد. به همین دلیل، تحقیق حاضر می‌تواند برای حمایت از ماهواره GPM که مشابه با ماهواره TRMM است، استفاده شود.

زمینی) در مقیاس زمانی ماهانه و مقیاس مکانی $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ درجه طول و عرض جغرافیایی و با فرمت NetCDF از ابتدای سال ۲۰۰۳ تا انتهای سال ۲۰۱۲ برای محدوده مطالعه شده از سایت <https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm> این داده‌ها از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. ماهواره TRMM



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی و پیکسل‌های ماهواره TRMM حوضه آبخیز گرگانود

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی استفاده شده در مطالعه حاضر

مختصات جغرافیایی		نام ایستگاه	مختصات جغرافیایی		نام ایستگاه	مختصات جغرافیایی		نام ایستگاه
عرض شمالی	طول شرقی		عرض شمالی	طول شرقی		عرض شمالی	طول شرقی	
۳۷/۰۰	۵۵/۱۶	آزادشهر	۳۷/۱۱	۵۴/۶۱	انبر الوم	۳۶/۸۰	۵۴/۹۶	افرا تخته
۳۷/۰۰	۵۴/۴۴	آق‌قلا	۳۷/۰۱	۵۴/۳۹	آق‌قبر	۳۷/۰۶	۵۴/۹۱	آق‌زبیر
۳۷/۵۱	۵۵/۶۱	پیش‌کمر	۳۶/۹۵	۵۴/۱۵	پنج‌پیکر	۳۷/۰۰	۵۴/۳۰	بناور
۳۷/۷۰	۵۵/۸۶	چنارلی	۳۶/۸۵	۵۴/۵۳	جالین	۳۷/۲۰	۵۵/۵۳	توسکاچال
۳۷/۱۳	۵۵/۵۸	دوزابن	۳۷/۰۱	۵۵/۰۹	خ. کشاورزی	۳۷/۰۱	۵۴/۹۸	خان‌بن
۳۶/۹۰	۵۴/۸۶	علی‌آباد	۳۷/۰۱	۵۵/۷۰	عزیزآباد	۳۷/۰۱	۵۵/۱۳	رامیان
۳۶/۹۸	۵۴/۷۵	قره‌بلاغ	۳۷/۰۰	۵۴/۵۹	فندرسک	۳۶/۹۰	۵۴/۷۵	فاضل‌آباد
۳۷/۰۸	۵۴/۰۶	گمیشان	۳۷/۶۵	۵۵/۹۵	گلی‌داغ	۳۷/۶۶	۵۵/۷۶	کریم‌ایشان
۳۶/۹۳	۵۴/۹۵	مزیران	۳۷/۱۱	۵۴/۵۰	مزرعه‌ارتش	۳۶/۹۵	۵۴/۸۶	مزرعه‌کتول
۳۶/۹۸	۵۵/۲۶	وطن	۳۶/۸۵	۵۴/۳۱	ورسن	۳۶/۷۸	۵۲/۲۳	نامن
۳۷/۲۵	۵۵/۱۳	گنبد	۳۶/۸۵	۵۴/۴۵	گرگان	۳۷/۳۶	۵۴/۴۸	کلاله
۳۷/۰۵	۵۴/۷۹	بهلکه‌داشلی	۳۷/۲۲	۵۵/۱۵	اراز کوسه	۳۶/۸۸	۵۴/۳۴	هاشم‌آباد
۳۷/۰۲	۵۴/۵۰	پهلوی دژ	۳۶/۷۸	۵۴/۵۸	پل اردوگاه	۳۷/۴۰	۵۵/۸۰	پارک ملی
۳۷/۳۰	۵۶/۱۱	چشمه‌خان	۳۷/۴۹	۵۵/۵۰	تمر	۳۶/۸۷	۵۴/۶۳	تقی‌آباد
۳۶/۷۱	۵۴/۴۸	زیارت	۳۶/۸۷	۵۴/۹۶	زرینگل	۳۷/۳۵	۵۶/۳۲	رباط قره‌بیل
۳۶/۸۳	۵۴/۰۵	سیاه‌آب	۳۷/۲۰	۵۴/۷۴	سد گرگان	۳۷/۱۳	۵۴/۷۲	سالیان‌تپه
۳۶/۹۹	۵۴/۱۳	غفار حاجی	۳۶/۷۶	۵۴/۱۲	غاز محله	۳۶/۷۹	۵۵/۰۱	شیرین‌آباد
۳۷/۴۰	۵۵/۵۰	قوجمز	۳۷/۲۳	۵۵/۰۲	قرزاقلی	۳۷/۷۱	۵۵/۷۱	قرناق
۳۷/۲۱	۵۵/۳۵	مینودشت	۳۷/۲۶	۵۵/۴۳	گالیکش	۳۶/۷۶	۵۴/۱۲	کردکوی
			۳۷/۰۷	۵۵/۲۶	نوده	۳۷/۰۱	۵۵/۵۸	نراب

که در آن؛ Y_i داده i ام در سری زمانی، \bar{Y} میانگین سری زمانی داده‌ها، y شماره داده در سری زمانی و n تعداد کل داده‌ها در سری زمانی هستند. دامنه تنظیم‌شده هم‌مقیاس با استفاده از رابطه ۶ محاسبه شده و در نهایت، مقدار $\frac{R}{\sqrt{n}}$ با مقادیر بحرانی ارائه‌شده توسط بیوشند آزمایش می‌شود.

$$R = \left(\max_{0 \leq y \leq n} S_k^* - \max_{0 \leq y \leq n} S_k^* \right) / (s) \quad (6)$$

که در آن؛ S_k^* انحراف معیار سری سری زمانی داده‌هاست. فرض صفر (H_0) در این روش یعنی اینکه داده‌ها همگن هستند و فرض یک (H_1) یعنی در سری زمانی داده‌ها ناهمگنی و شکستگی وجود دارد.

روش آزمون همگنی پتیت

آزمون همگنی پتیت نیازی به نرمال بودن سری زمانی داده‌ها ندارد [۱۴]. در این روش بعد از آنکه مقادیر Y_i به صورت یک سری صعودی مرتب شد، r_i رتبه مقادیر متناظر Y_i مشخص می‌شوند. سپس، با استفاده از معادلات ۷ و ۸ آماره X_k محاسبه شده و با مقادیر بحرانی ارائه‌شده توسط پتیت [۱۴] مقایسه می‌شوند.

$$X_y = 2 \sum_{i=1}^y r_i - y(n+1), \quad y = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$X_k = \max_{1 \leq y \leq n} |X_y| \quad (8)$$

در روش آزمون همگنی پتیت، فرض صفر (H_0) یعنی نبود تغییر و فرض یک (H_1) یعنی وجود تغییر در سری زمانی داده‌ها هستند. این روش آزمون همگنی در یافتن ناهمگنی‌های نقاط میانی سری زمانی داده‌ها دقت بیشتری دارد و زمان بروز ناهمگنی را گزارش می‌کند [۱۰].

روش آزمون همگنی نسبت ون نیومن

در روش آزمون همگنی نسبت ون نیومن نسبت اختلاف مربع ترتیبی به واریانس سری زمانی داده‌ها با استفاده از رابطه ۹ محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (Y_i - Y_{i+1})^2}{\sum_{i=1}^{n-1} (Y_i - Y)^2} \quad (9)$$

بررسی همگنی، صحت و کیفیت داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه آبخیز گرگانرود

پیش از بررسی دقت و کارایی داده‌های بارش ماهواره TRMM، با استفاده از چهار روش: (۱) آزمون همگنی نرمال استاندارد (SNHT)؛ (۲) آزمون همگنی دامنه بیوشند؛ (۳) آزمون همگنی پتیت؛ (۴) آزمون همگنی نسبت ون نیومن (VNR)، صحت و کیفیت بارش سالیانه ایستگاه‌های باران‌سنجی واقع در محدوده مطالعاتی بررسی شد.

روش آزمون همگنی نرمال استاندارد (SNHT)

فرض اولیه این روش، نرمال بودن توزیع آماری داده‌هاست [۹ و ۱۰]. آماره T_a که مقایسه میانگین در سال اولیه با $n - a$ سال انتهایی است (رابطه ۱):

$$T_a = a\bar{z}_1^2 + (n-a)\bar{z}_2^2, \quad a = 1, \dots, n \quad (1)$$

در این روش فرض صفر (H_0) یعنی اینکه داده‌ها همگن هستند و فرض یک (H_1) یعنی در سری زمانی داده‌ها ناهمگنی وجود دارد. آماره (T_0) با استفاده از روابط ۲ تا ۵ محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$T_0 = \max\{a\bar{z}_1^2 + (n-a)\bar{z}_2^2\}, \quad a = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\bar{z}_1 = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a \frac{(Y_i - \bar{Y})}{S} \quad (3)$$

$$\bar{z}_2 = \frac{1}{n-a} \sum_{i=a+1}^n \frac{(Y_i - \bar{Y})}{S} \quad (4)$$

که در آن؛ \bar{Y} میانگین نمونه‌ها، S انحراف استاندارد نمونه‌ها و n تعداد نمونه‌ها هستند. آماره (T_0) توسط الکساندرسون و موبرگ [۱۱] ارائه و توسط خلیک و آردا [۱۲] اصلاح شد.

روش آزمون همگنی دامنه بیوشند

مجموع جزئی در این روش با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$S_0^* = 0 \text{ and } S_k^* = a_0 + \sum_{i=1}^y (Y_i - \bar{Y}), \quad y = 1, \dots, n \quad (5)$$

1. Standard Normal Homogeneity Test
2. Buishand Homogeneity Test
3. Pettit Homogeneity Test
4. Von Neuman Homogeneity Test

در این روش فرض صفر (H_0) و فرض یک (H_1) همانند آزمون‌های قبلی تعریف می‌شود. از آنجا که این روش فرض می‌کند در صورت صحت فرض یک، داده‌های سری زمانی از توزیع تصادفی پیروی نمی‌کنند، بنابراین نمی‌تواند سال وقوع ناپیوستگی را گزارش کند [۱۰].

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^N P_{(est)i} - P_{(obs)i}}{\sum_{i=1}^N P_{(obs)i}} \times 100 \quad (10)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{(est)i} - \bar{P}_{est})(P_{(obs)i} - \bar{P}_{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_{(est)i} - \bar{P}_{est})(P_{(obs)i} - \bar{P}_{obs})^2}} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{(obs)i} - P_{(est)i})^2}{N}} \quad (12)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_{(obs)i} - P_{(est)i})^2}{\sum_{i=1}^N (P_{(obs)i} - \bar{P}_{(est)i})^2} \quad (13)$$

نتایج و بحث

بررسی همگنی، کیفیت و صحت داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی

نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های همگنی استفاده‌شده در تحقیق حاضر برای بررسی همگنی، صحت و کیفیت داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی واقع در حوضه آبخیز گرگانرود و در نهایت، کلاس‌بندی این ایستگاه‌ها به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول ۳، ملاحظه می‌شود که از تمامی ایستگاه‌های باران‌سنجی واقع در حوضه آبخیز گرگانرود، ۵۶ ایستگاه (۹۴/۹۱ درصد) در کلاس همگن (A)، ۲ ایستگاه (۳/۳۸ درصد) در کلاس مشکوک (B) و فقط ۱ ایستگاه (۱/۶۹ درصد) در کلاس ناهمگن (C) قرار دارند.

در گام بعدی، برای بررسی صحت داده‌های ایستگاه‌هایی که در کلاس‌های B و C واقع شده‌اند از داده‌های ایستگاه‌های مجاور آن‌ها استفاده شد و ایستگاه‌هایی که با داده‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های مجاور مطابقت و همخوانی دارند، به کلاس A منتقل شدند (این ایستگاه‌ها بیشتر به دلیل کوتاهی دوره داده‌برداری به اشتباه ناهمگن تشخیص داده شده‌اند) و همچنین، ایستگاه‌هایی که با ایستگاه‌های مجاور مطابقت و همخوانی ندارند، از روند تحقیق حذف شدند. در جدول ۴ نتایج این بررسی‌ها ارائه شده است.

کلاس‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی بر اساس نتایج آزمون‌های همگنی پس از استخراج نتایج آزمون‌های همگنی، ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه آبخیز گرگانرود بر اساس کلاس‌بندی ارائه‌شده توسط ویجنگارد و همکاران [۱۶] و قاجارنیا و همکاران [۱۰] در دسته‌های زیر کلاس‌بندی شدند:

الف - کلاس همگن (A): در این کلاس داده‌هایی قرار می‌گیرند که با سطح معناداری ۵ درصد در هر چهار آزمون یادشده به فرض صفر (همگنی) برسند و یا فقط در یکی از آنها فرض یک (ناهمگنی) را تأیید کنند. داده‌های که در این کلاس قرار می‌گیرند، همگن هستند و می‌توان با اطمینان از آنها برای پژوهش‌های مد نظر استفاده کرد.

ب - کلاس مشکوک (B): در این کلاس داده‌هایی قرار می‌گیرند که از چهار آزمون یادشده با سطح معناداری ۵ درصد در دو آزمون، فرض یک (ناهمگنی) را تأیید کنند. داده‌های که در این کلاس قرار می‌گیرند، احتمال دارد که ناهمگن باشند.

ج - کلاس ناهمگن (C): در این کلاس داده‌هایی قرار می‌گیرند که با سطح معناداری ۵ درصد در سه و یا چهار آزمون یادشده فرض یک (ناهمگنی) را تأیید کنند. داده‌های که در این کلاس قرار می‌گیرند، ناهمگن هستند.

مقایسه و ارزیابی عملکرد داده‌های بارش ماهواره TRMM

به منظور بررسی کارایی ماهواره TRMM در برآورد بارش ماهانه حوضه گرگانرود از طریق مقایسه آن با داده‌های بارش مشاهداتی از معیارهای آماری شامل خطای نسبی (Bias)، میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE^۱)، ضریب تبیین (R^۲) و ناس ساتکلیف (NSE) (ناش و ساتکلیف^۳) استفاده شد (روابط ۱۰ تا ۱۳) که در این معادلات

۱. Root Mean Square Error
۲. Returns the Square
۳. Nash and Sutcliffe

جدول ۲. نتایج آزمون‌های همگنی داده‌های ایستگاه‌های زمینی واقع در حوضه آبخیز گرگانرود

نوع ایستگاه	تعداد	تعداد ایستگاه‌های ناهمگن در هر آزمون		
		SNHT test	Buishand's test	Pettitt's test
باران سنجی هواشناسی	۳۰	۲	۱	۰
سینوپتیک هواشناسی	۴	۰	۰	۰
باران سنجی تماب	۲۵	۳	۱	۰
کل ایستگاه‌ها	۵۹	۵	۲	۰

جدول ۳. نتایج کلاس‌بندی با استفاده از نتایج نهایی آزمون‌های همگنی

نوع ایستگاه	تعداد ایستگاه‌ها در هر کلاس		
	A	B	C
باران سنجی هواشناسی	۲۸	۱	۱
سینوپتیک هواشناسی	۴	۰	۰
باران سنجی تماب	۲۴	۱	۰
کل ایستگاه‌ها	۵۶	۲	۱
درصد	۹۴/۹۱	۳/۳۸	۱/۶۹

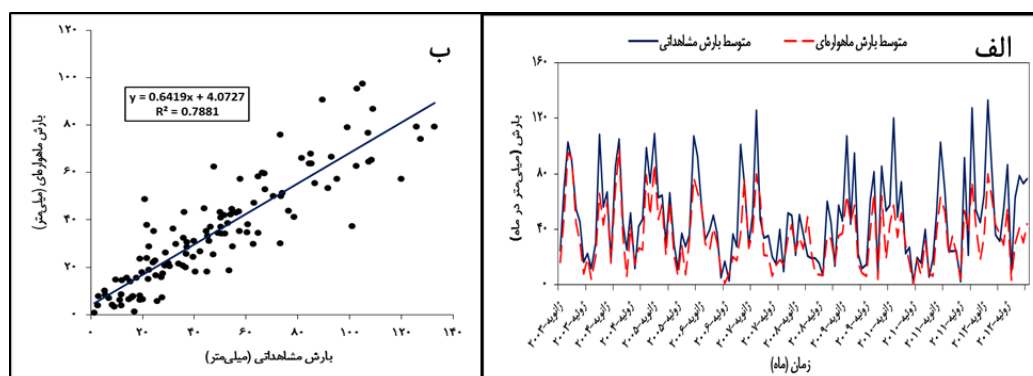
جدول ۴. نتایج بررسی صحت داده‌های ایستگاه‌های واقع شده در کلاس‌های B و C

نوع ایستگاه	تعداد ایستگاه کلاس		تعداد ایستگاه کلاس	تعداد ایستگاه‌هایی که اصلاح شدند	تعداد ایستگاه‌هایی که حذف شدند
	B	C			
باران سنجی هواشناسی	۱	۱	۱	۲	۰
باران سنجی تماب	۱	۰	۰	۰	۱

بارش مشاهداتی و ماهواره‌ای و پراکنش مربوط به متوسط بارش مشاهداتی و ماهواره‌ای برای سری زمانی ماهانه در حوضه آبخیز گرگانرود را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲-الف ملاحظه می‌شود، روند تغییرات بارش مشاهداتی و ماهواره‌ای، تقریباً مشابه و نزدیک به هم هستند، ولی ماهواره TRMM در برآورد صحیح مقدار بارش، خطا دارد و در بیشتر ماه‌های سال، تخمین‌های خود را با کم‌برآوردی ارائه کرده است. همچنین، با توجه به شکل ۲-ب، مقدار R^2 برای حوضه آبخیز گرگانرود، ۰/۷۸ است.

همان‌طور که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود، پس از بررسی دقیق‌تر از طریق مقایسه با داده‌های ایستگاه‌های مجاور، ۲ ایستگاه از کلاس‌های B و C به کلاس همگن A منتقل شدند و فقط یک ایستگاه مشکوک (B) به دلیل عدم مطابقت و همخوانی با داده‌های ایستگاه‌های مجاور از روند تحقیق حذف شد.

مقایسه داده‌های بارش ماهواره TRMM با داده‌های بارش ایستگاه‌های باران سنجی حوضه آبخیز گرگانرود شکل ۲ قسمت الف و ب به ترتیب روند تغییرات متوسط



شکل ۲. الف) روند تغییرات متوسط بارش مشاهداتی و ماهواره‌ای و ب) پراکنش نقاط مربوط به مقادیر متوسط بارش مشاهداتی و ماهواره‌ای در کل حوضه آبخیز گرگانرود

جدول ۵. نتایج شاخص‌های آماری برای ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه آبخیز گرگانود

شاخص‌های آماری				نام ایستگاه	شاخص‌های آماری				نام ایستگاه
Bias	NSE	RMSE	R ²		Bias	NSE	RMSE	R ²	
-۳/۰۲	۰/۶۰	۱۵/۸۵	۰/۶۲	انبر الوم	-۵۲/۵۱	-۰/۰۵	۵۳/۴۹	۰/۴۶	افرا تخته
-۱۰/۱۹	۰/۵۹	۱۷/۷۴	۰/۶۱	آق زبیر	-۳۴/۱۹	۰/۲۹	۳۵/۳۸	۰/۵۱	آزادشهر
-۱۸/۳۸	۰/۶۶	۱۷/۷۷	۰/۷۱	آق قلا	-۲۲/۲۰	۰/۶۰	۲۰/۷۶	۰/۶۶	آق‌قبر
-۱۹/۲۳	۰/۴۷	۲۵/۲۸	۰/۵۱	پنج‌پیکر	-۱۸/۸۵	۰/۶۴	۱۹/۸۲	۰/۶۹	بناور
-۴۱/۷۷	۰/۰۷	۵۳/۳۸	۰/۵۱	توسکا چال	-۰/۸۱	۰/۴۸	۲۴/۳۳	۰/۵۳	پیش‌کمر
۹/۲۵	۰/۶۰	۱۹/۲۸	۰/۵۸	چنارلی	-۴۳/۸۶	۰/۲۲	۳۸/۴۲	۰/۴۳	جالین
-۴۵/۴۲	۰/۱۴	۴۸/۹۸	۰/۵۹	خ. کشاورزی	-۴۳/۳۱	۰/۲۱	۳۳/۲۹	۰/۶۴	خان‌بن
-۴۶/۳۰	۰/۱۳	۵۰/۱۷	۰/۵۴	رامیان	-۱۵/۲۹	۰/۳۱	۲۹/۹۶	۰/۴۲	دوزاین
-۴۶/۰۴	۰/۱۵	۴۱/۷۱	۰/۵۹	علی‌آباد	-۹/۲۵	۰/۳۲	۲۸/۶۳	۰/۴۱	عزیزآباد
-۴۴/۴۴	۰/۲۰	۳۵/۵۷	۰/۵۹	فندرسک	-۴۹/۲۳	۰/۰۷	۴۱/۲۲	۰/۶۸	فاضل‌آباد
-۸/۵۶	۰/۶۱	۲۴/۹۹	۰/۶۲	کریم‌ایشان	-۲۵/۶۳	۰/۵۲	۲۱/۳۰	۰/۶۶	قره‌بلاغ
-۲۸/۶۱	۰/۵۴	۲۴/۵۵	۰/۶۶	گمیشان	-۳۷/۸۷	۰/۲۴	۴۵/۶۷	۰/۵۶	گلی‌داغ
-۹/۰۹	۰/۶۱	۱۶/۲۸	۰/۶۳	مزرعه ارتش	-۴۰/۱۵	۰/۲۰	۳۴/۴۶	۰/۵۲	مزرعه کنتول
-۵۲/۹۷	-۰/۰۴	۴۸/۰۶	۰/۶۹	نامن	-۵۰/۰۴	۰/۰۳	۴۳/۷۷	۰/۶۳	مزیاران
-۳۷/۱۹	۰/۳۵	۲۸/۷۰	۰/۶۰	وطن	-۳۴/۸۴	۰/۰۹	۳۸/۵۳	۰/۳۲	ورسن
-۳۴/۱۴	۰/۴۸	۲۵/۳۴	۰/۶۹	گرگان	-۱۶/۳۲	۰/۴۷	۲۷/۷۴	۰/۵۲	کلاله
-۳۶/۸۷	۰/۴۱	۲۸/۹۲	۰/۶۵	هاشم‌آباد	-۶/۷۹	۰/۴۳	۲۳/۸۶	۰/۶۸	گنبد
-۴۴/۶۹	۰/۱۱	۵۶/۸۲	۰/۵۷	پارک ملی	-۱۵/۲۸	۰/۶۱	۱۶/۸۰	۰/۶۵	بهلکه داشلی
-۲۲/۰۱	۰/۶۵	۱۹/۰۶	۰/۷۳	پهلوی دژ	-۵۱/۱۴	۰/۰۲	۴۰/۹۲	۰/۶۲	پل اردوگاه
-۱۲/۶۱	۰/۵۱	۲۵/۷۴	۰/۵۵	تمر	-۴۱/۱۴	۰/۲۱	۳۳/۴۹	۰/۵۵	تقی‌آباد
۶۲/۵۲	-۰/۸۲	۲۳/۹۰	۰/۴۶	چشمه خان	۵۴/۳۲	-۰/۳۲	۲۳/۹۳	۰/۴۰	تیل‌آباد
-۵۵/۷۴	-۰/۱۶	۵۲/۹۹	۰/۶۱	زرینگل	۶۹/۰۱	-۰/۵۹	۲۰/۲۶	۰/۶۳	رباط قره‌بیل
-۱۶/۵۹	۰/۶۲	۱۸/۶۰	۰/۶۶	سالیان‌تپه	۲۱/۸۱	-۰/۳۵	۳۳/۵۴	۰/۳۵	زیارت
-۴۵/۰۲	۰/۱۹	۳۷/۹۰	۰/۵۳	سیاه‌آب	۱/۱۶	۰/۵۵	۱۷/۲۶	۰/۷۵	سد گرگان
-۴۳/۱۰	۰/۲۰	۳۵/۶۳	۰/۵۲	غاز محله	-۱۲/۵۲	۰/۱۹	۳۲/۴۲	۰/۳۱	شیرین‌آباد
۱۰/۴۹	۰/۵۳	۲۲/۶۷	۰/۵۷	قرناق	-۲۷/۳۹	۰/۴۹	۲۵/۲۱	۰/۶۰	غفار حاجی
-۳۳/۹۷	۰/۳۲	۳۹/۳۴	۰/۶۰	فوجمز	۱۸/۱۵	۰/۴۲	۱۹/۶۱	۰/۵۴	قزاقلی
-۴۲/۵۴	۰/۰۷	۵۰/۰۱	۰/۴۴	گالیکش	-۵۰/۶۹	۰/۰۳	۴۰/۶۹	۰/۵۸	کردکوی
-۵۰/۷۵	-۰/۵۱	۲۹/۱۰	۰/۴۱	نراب	-۴۵/۰۷	۰/۰۶	۴۸/۳۹	۰/۵۶	مینودشت
					-۴۶/۵۸	۰/۰۷	۴۹/۸۲	۰/۶۰	نوده

است. مقدار شاخص آماری RMSE بین ۱۵/۸۵ تا ۵۶/۸۲ که به ترتیب برای ایستگاه‌های باران‌سنجی انبرالوم و پارک ملی است (شکل ۳-ب). با توجه به شکل ۵ کمترین مقدار RMSE در بالادست حوضه آبخیز گرگانود و در نیمه شمالی تا غربی به همراه پایین‌دست حوضه آبخیز گرگانود در نیمه جنوبی حوضه آبخیز گرگانود است. همچنین، بیشترین مقدار RMSE در نیمه مرکزی حوضه آبخیز گرگانود است. مقدار این شاخص آماری برای کل حوضه

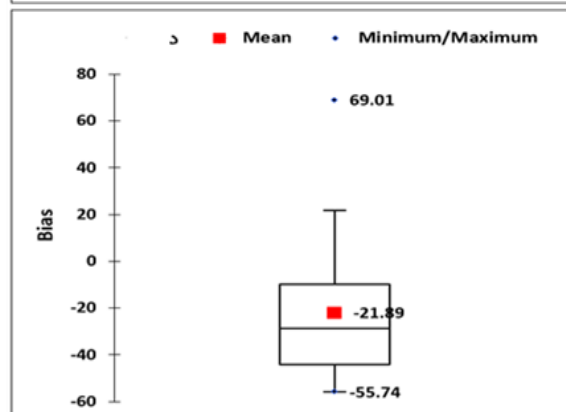
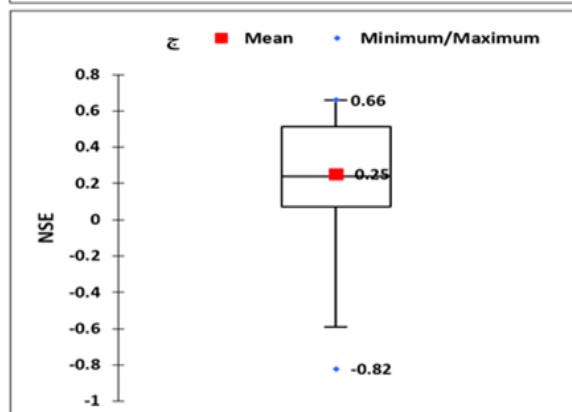
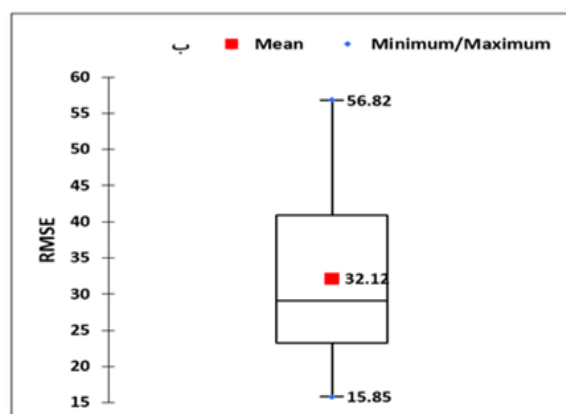
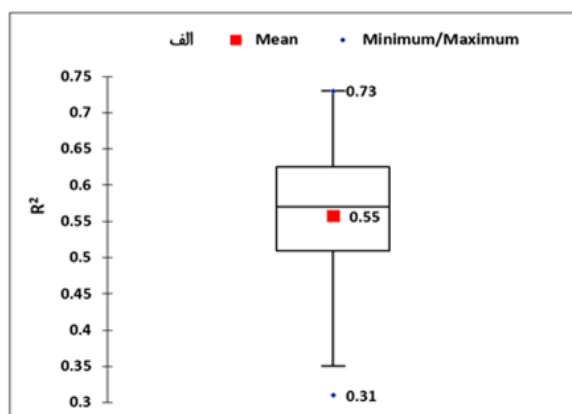
همان‌طور که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود، نتایج نشان می‌دهد مقدار شاخص آماری R²، برای تمامی ایستگاه‌های باران‌سنجی واقع در حوضه آبخیز گرگانود بین ۰/۳۱ تا ۰/۷۵ است که به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های باران‌سنجی شیرین‌آباد و سد گرگان هستند (شکل ۳-الف). شکل ۴ نیز نشان می‌دهد به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار R² در جنوب و غرب حوضه آبخیز گرگانود است. با توجه به جدول ۶ مقدار R² برای کل حوضه آبخیز گرگانود ۰/۷۹

نسبت به داده‌های بارش مشاهداتی نشان می‌دهد. مقادیر مثبت این شاخص، نشان‌دهنده وجود بیش‌برآوردی و مقادیر منفی آن، نشان‌دهنده کم‌برآوردی است. با توجه به جدول ۵، مقدار شاخص Bias برای ایستگاه‌های باران‌سنجی بین ۵۵/۷۴- تا ۶۹/۰۱ است که به ترتیب برای ایستگاه‌های باران‌سنجی زرینگل و رباط قره‌بیل هستند (شکل ۳-د). شکل ۴ نشان می‌دهد در بیشتر سطح حوضه آبخیز گرگانود، ماهواره TRMM دارای کم‌برآوردی است. همچنین، مقدار این شاخص برای کل حوضه آبخیز گرگانود ۲۸/۱۳- است که در تمامی حوضه مطالعه‌شده این ماهواره کم‌برآوردی مقدار بارش ماهانه دارد.

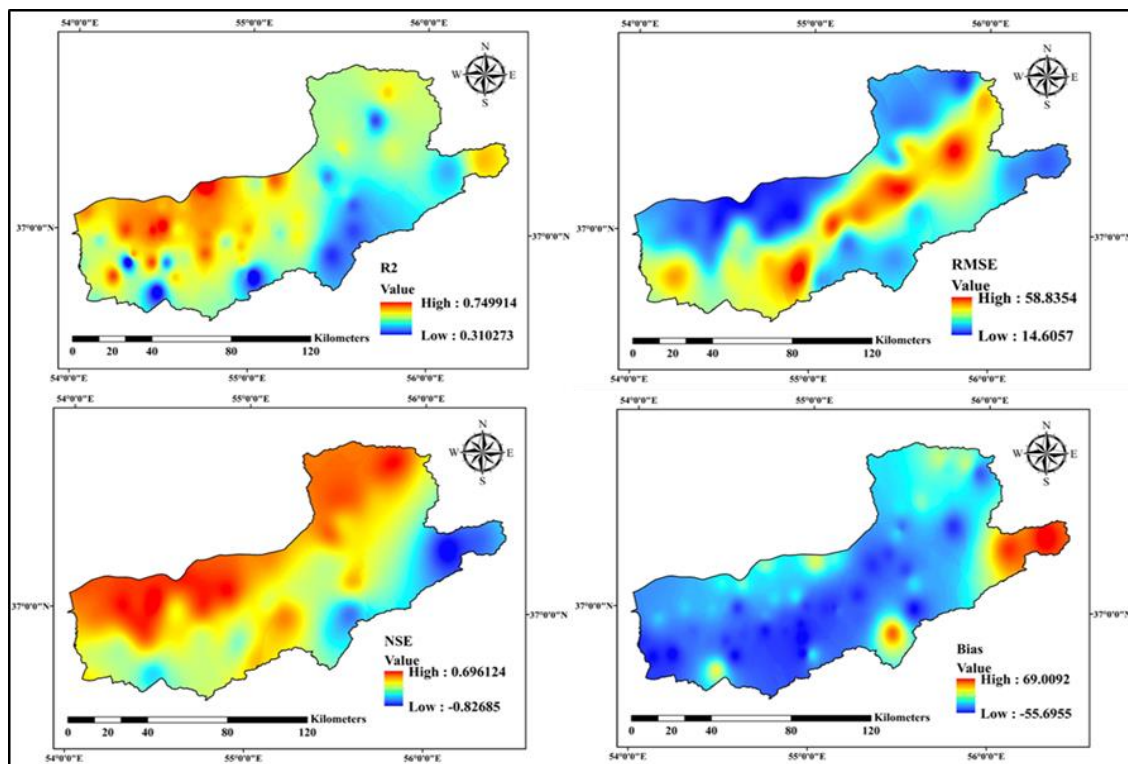
آبخیز گرگانود ۲۰/۹۴ است. شاخص آماری NSE دقت ماهواره TRMM در برآورد بارش ماهانه را نشان می‌دهد. مقدار این شاخص آماری با توجه به جدول ۵ برای تمامی ایستگاه‌های باران‌سنجی بین ۰/۸۲- تا ۰/۶۶ هست که به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های باران‌سنجی چشمه خان و آق‌قلا هستند (شکل ۳-ج). شکل ۴ نشان می‌دهد نواحی بالادست شمالی تا غربی حوضه آبخیز گرگانود بیشترین مقدار و نواحی پایین‌دست جنوبی، کمترین مقدار NSE را دارند. همچنین، مقدار شاخص آماری NSE برای کل حوضه آبخیز گرگانود ۰/۵۷ است. شاخص آماری Bias بیش‌برآوردی و یا کم‌برآوردی داده‌های بارش ماهواره‌ای را

جدول ۶. نتایج شاخص‌های آماری داده‌های بارش ماهواره‌ای در سری زمانی ماهانه

شاخص‌های آماری				نام حوضه
Bias	NSE	RMSE	R ²	گرگانود
-۲۸/۱۳	۰/۵۷	۲۰/۹۴	۰/۷۹	



شکل ۳. مقادیر شاخص‌های آماری R² (الف)، RMSE (ب)، NSE (ج) و Bias (د) داده‌های بارش ماهواره‌ای در سری زمانی ماهانه



شکل ۴. پراکنش مکانی R^2 , RMSE, NSE و Bias داده‌های بارش ماهواره‌ای در سری زمانی ماهانه

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر ابتدا با استفاده از آزمون‌های همگن، صحت و کیفیت داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی بررسی شد که نتایج این آزمون‌های همگنی به همراه بررسی داده‌های بارش ایستگاه‌های مجاور نشان داد داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی واقع در حوضه آبخیز گرگانود کیفیت خوبی دارند. در گام بعدی تحقیق برای ارزیابی دقت و کارایی ماهواره TRMM از نمودار روند تغییرات متوسط بارش مشاهداتی و ماهواره‌ای و شاخص‌های آماری استفاده شد. تغییرات متوسط بارش مشاهداتی و ماهواره‌ای روند مشابهی دارند. از شاخص‌های آماری به منظور اعتبارسنجی داده‌های بارش ماهواره TRMM استفاده شده است. مقدار شاخص آماری R^2 برای تمامی ایستگاه‌های باران‌سنجی واقع در حوضه آبخیز گرگانود بین ۰/۳۱ تا ۰/۷۵ و برای کل حوضه آبخیز گرگانود ۰/۷۹ است که مقدار این شاخص آماری برای کل حوضه آبخیز گرگانود، بسیار خوب است، زیرا تصاویر ماهواره TRMM در مقیاس ۲۵ کیلومتر در ۲۵ کیلومتر تهیه می‌شوند و برای مناطق یا حوضه‌های با مساحت زیاد همبستگی بسیار خوبی دارند. مقدار RMSE بین ۱۵/۸۵

تا ۵۶/۸۲ برای ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه آبخیز گرگانود و همچنین این شاخص آماری در سطح کل حوضه آبخیز گرگانود ۲۰/۹۴ به دست آمد. می‌توان نتیجه گرفت برای اعتبارسنجی داده‌های بارش ماهواره‌ای، باید سایر شاخص‌های آماری را هم مد نظر قرار داد. ایستگاه‌های باران‌سنجی که در حوضه آبخیز گرگانود واقع شده‌اند، دارای مقدار NSE بین -۰/۸۲ تا ۰/۶۶ هستند و این شاخص دارای مقدار ۰/۵۷ برای کل حوضه آبخیز گرگانود است. شاخص آماری Bias برای ایستگاه‌های باران‌سنجی بین -۵۵/۷۴ تا ۶۹/۰۱ هست و کل حوضه آبخیز گرگانود مقدار Bias برابر با -۲۸/۱۳ است و به طور کلی، برای این منطقه داده‌های بارش ماهواره‌ای کم‌برآوردی دارند. نتایج ارزیابی دقت و کارایی ماهواره TRMM در برآورد بارش نشان داد این ماهواره، برآوردهای خوبی در سری زمانی ماهانه از مقدار و توزیع بارش در منطقه مطالعه‌شده به دست می‌دهد و برای پوشش مناطق بدون ایستگاه و همچنین، برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی، بسیار مفید و ارزشمند است که با نتایج تحقیقات انجام‌گرفته توسط اکبری و همکاران [۶]، شیروانی و فخاری‌زاده شیرازی [۱۸]، مددی و همکاران

- based on NDVI and DEM in the Qaidam Basin of China. *Remote sensing of Environment*. 2011 Dec 15; 115(12):3069-79.
- [4]. Immerzeel WW, Rutten MM, Droogers P. Spatial downscaling of TRMM precipitation using vegetative response on the Iberian Peninsula. *Remote Sensing of Environment*. 2009 Feb 16; 113(2):362-70.
- [5]. Huffman GJ, Bolvin DT. TRMM and other data precipitation data set documentation. NASA, Greenbelt, USA. 2013 Nov; 28(2.3):1.
- [6]. Akbari. M. Efficiency and Accuracy in the Estimation of Daily, Monthly and Quarterly Rainfall Data from TRMM-3B42 in Khorasan Razav. MSc Thesis Ferdowsi University of Mashhad Faculty of Agriculture. 2013. [Persian].
- [7]. Scheel ML, Rohrer M, Huggel C, Santos Villar D, Silvestre E, Huffman GJ. Evaluation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011; 15(8):2649-63.
- [8]. Guofeng Z, Dahe Q, Yuanfeng L, Fenli C, Pengfei H, Dongdong C, Kai W. Accuracy of TRMM precipitation data in the southwest monsoon region of China. *Theoretical and applied Climatology*. 2017 Jul 1; 129(1-2):353-62.
- [9]. Alexandersson H. A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of climatology*. 1986; 6(6):661-75.
- [10]. Ghajarnia, N., Liaghat, A.M. Daneshkar Arasteh. P. Verifying precipitation data of TAMAB and meteorology institute in Urmia basin. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*. Fall 2014; 4(1). [Persian].
- [11]. Alexandersson H, Moberg A. Homogenization of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*. 1997 Jan; 17(1):25-34.
- [12]. Khaliq MN, Ouarda TB. On the critical values of the standard normal homogeneity test (SNHT). *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*. 2007 Apr; 27(5):681-7.
- [13]. Buishand TA. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of hydrology*. 1982 Aug 1; 58(1-2):11-27.
- [14]. Pettit AN. Anon-parametric approach to the change-point detection. *Appl. Stat.* 1979; 28:126-35.
- [۱۹]. محمدپور و همکاران [۲۰]، شیل و همکاران [۷]، آدجی و همکاران [۲۱]، یانگ و لو [۲۲]، ماننس و همکاران [۲۳] و جیفنگ و همکاران [۸] همخوانی و مطابقت دارد. ماهواره TRMM در برآورد دقیق مقدار بارش ماهانه، خطا دارد. نتایج تحقیق محمدپور و همکاران [۲۰] نشان داد علت خطای داده‌های بارش ماهواره‌ای به نوع و مقدار بارش بستگی دارد. نوع بارش که عموماً رگباری و کوتاه‌مدت است، سبب می‌شود بعضی اتفاق‌های بارش را ایستگاه زمینی ثبت کند، ولی ماهواره ثبت نکند یا ممکن است بارش کاملاً محلی باشد، به طوری که ماهواره آن را ثبت کند، اما ایستگاه زمینی به دلیل قرار نداشتن در محل بارندگی، آن را ثبت نکند. همچنین، به دلیل حرکت این ماهواره در مدار با ارتفاع کم و قطب‌گرد، فقط قادر است ۱۶ مرتبه در روز به دور زمین بچرخد و بنابراین، تصویربرداری از بیشتر مناطق را می‌تواند با تناوب‌های یک یا دو بار در روز انجام دهد. این کاستی موجب آن می‌شود که بسیاری از وقایع بارندگی طی روز از دست برود و بنابراین، دقت سنجنده‌های TRMM برای ارائه مقادیر بارندگی در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت کم شود. با توجه به اهمیت داده‌های بارش در مطالعات هواشناسی، هیدرولوژی، منابع آب و محیط زیست و همچنین، کمبود داده‌های بارش، پیشنهاد می‌شود ارزیابی داده‌های بارش ماهواره TRMM در محدوده جغرافیایی کل کشور به صورت یک طرح تحقیقاتی جامع و کامل، هم از نظر زمانی و هم از نظر مکانی انجام شود. توصیه می‌شود در پژوهش‌های آینده از منابع دیگر همچون داده‌های بارش ماهواره PERSIANN برای بررسی قابلیت استفاده از آن‌ها در مطالعات هیدرولوژی و منابع آب استفاده شود.

منابع

- [1]. Alexakis DD, Tsanis IK. Comparison of multiple linear regression and artificial neural network models for downscaling TRMM precipitation products using MODIS data. *Environmental Earth Sciences*. 2016 Jul 1; 75(14):1077.
- [2]. Collischonn B, Collischonn W, Tucci CE. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology*. 2008 Oct 15; 360(1-4):207-16.
- [3]. Jia S, Zhu W, Lü A, Yan T. A statistical spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation

- [15]. Von Neumann J. Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1941 Dec 1; 12(4):367-95.
- [16]. Wijngaard JB, Klein Tank AM, Können GP. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*. 2003 May; 23(6):679-92.
- [17]. Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 2007; 50(3):885-900.
- [18]. Shirvani, A. Fakhari Zade Shirazi, E. Comparison of ground based observation of precipitation with TRMM satellite estimations in Fars Province. *Journal of Agricultural Meteorology*. Autumn & Winter 2014; 2(2):1-15. [Persian].
- [19]. Madadi, Gh. Hamzeh, S. Noroozi. A. A. Evaluation of rainfall on a daily, monthly and annual basis using satellite imagery (Case study: west boundary basin of Iran)., *RS & GIS for Natural Resources*. 2015; 1(2). 59-74. [Persian].
- [20]. Mohamadpour. M.A. Evaluation of TRMM (3B43-V7) Satellite Data Based on Selected Stations for Iran. MSc Thesis Ferdowsi University of mashhad Faculty of Agriculture. 2015. [Persian].
- [21]. Adjei KA, Ren L, Appiah-Adjei EK, Kankam-Yeboah K, Agyapong AA. Validation of TRMM data in the Black Volta Basin of Ghana. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2012 May 1; 17(5):647-54.
- [22]. Yang Y, Luo Y. Evaluating the performance of remote sensing precipitation products CMORPH, PERSIANN, and TMPA, in the arid region of northwest China. *Theoretical and applied climatology*. 2014 Nov 1; 118(3):429-45.
- [23]. Mantas VM, Liu Z, Caro C, Pereira AJ. Validation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products in the Peruvian Andes. *Atmospheric Research*. 2015 Sep 15; 163:132-45.