

## ریز مقیاس نمایی بارش ماهواره‌ای با در نظر گرفتن رابطه مکانی ناهمگن بین بارش و متغیرهای محیطی

آرمان عبدالهی پور

دانشجوی دکتری گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

حسن احمدی\*

استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

بابک امین نژاد

استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶

### چکیده

محصولات بارش ماهواره‌ای، یکی از منابع تخمین بارندگی می‌باشند. با این وجود، برای استفاده در مناطق محلی، و یا برای پارامتر سازی مدل‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در مقیاس‌های حوضه‌ای؛ رزولوشن مکانی آن‌ها اغلب درشت است. بنابراین، در این پژوهش یک روش ریزمقیاس نمایی - کالیبراسیون برای تخمین‌های ماهواره‌ای مأموریت اندازه‌گیری بارش جهانی (GPM؛ رزولوشن مکانی ۰/۱ درجه) از تاریخ ۲۰۱۴/۰۴/۰۱ تا ۲۰۱۵/۰۳/۳۱ به مدت یک سال، با در نظر گرفتن ناهمگنی مکانی در رابطه بین بارش و متغیرهای محیطی، با استفاده از مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی مختلط (MGWR) برای استان گلستان، توسعه داده شد. در دستیابی به داده‌های بارش بهبود یافته با رزولوشن مکانی یک کیلومتر در مقیاس سالانه، نتایج نشان داد که (۱) با روش پیشنهادی نه تنها رزولوشن مکانی بهبود یافت، بلکه دقت نیز افزایش پیدا کرد؛ (۲) داده‌های بارش ریزمقیاس شده و کالیبره شده ( $CC=0.74$ ,  $bias=0.23$ ) عملکرد بهتری از داده‌های اصلی ( $CC=0.58$ ,  $bias=0.35$ ) در برابر مشاهدات زمینی داشتند.

واژگان کلیدی: سنجش از دور، بارش ماهواره‌ای، ریزمقیاس نمایی، استان گلستان.

### مقدمه

بارش مؤلفه بنیادی چرخه جهانی آب و یکی از مهم‌ترین داده‌های هیدرولوژیکی برای مطالعات اقلیمی، هواشناسی، هیدرولوژی و محیط‌زیست هست (Shi و همکاران، ۲۰۱۵، ۵۸۵۰؛ Abdollahipour و همکاران، ۲۰۲۰، ۲). آگاهی از میزان دقیق بارش و تغییرات مکانی و زمانی آن در هر منطقه برای برنامه‌ریزی، مهندسی و مدیریت منابع آب مورد نیاز است (قرابیلگی و همکاران، ۱۳۹۲، ۲؛ سیده مریم علی بخشی و همکاران، ۱۳۹۵، ۹۶۴). همچنین، اندازه‌گیری دقیق بارش

در رزولوشن‌های زمانی و مکانی بالا، برای بهبود توانایی ما در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی سطح زمین مانند رواناب و پیش‌بینی خطرات هیدرومتئورولوژیکی نظیر سیل و خشک‌سالی، از اهمیت کلیدی برخوردار است (Fang و همکاران، ۲۰۱۳، ۵۰).

با توسعه سنجش از دور ماهواره‌ای در سال‌های اخیر، ماهواره‌های هواشناسی با جمع‌آوری، ذخیره و توزیع داده‌ها مطابق با روش‌های استاندارد، با پوشش دادن سطح وسیعی از یک منطقه، پایش مناطقی که توسط باران‌سنج‌ها انجام نمی‌گیرد مانند اقیانوس‌ها، مناطق کوهستانی و دور افتاده و دسترسی توزیع مکانی بارش با رزولوشن مکانی و زمانی مختلف، برخی از مشکلات اندازه‌گیری زمینی را حل کرده‌اند (اکبری و همکاران، ۱۳۹۵، ۱). جهت توسعه روش‌های تخمین بارش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، الگوریتم‌هایی با فن سنجش از دور ماهواره‌ای در مقیاس جهانی و با رزولوشن مکانی و زمانی بالا، ارائه شده‌اند. این الگوریتم‌ها، از اطلاعات در محدوده باندهای طیف مرئی (VIS) تا مادون قرمز (IR) کالیبره شده از ماهواره‌های زمین مرجع و برای باندهای طیف ماکروویو غیرفعال (PMW) از ماهواره‌های واقع در مدار نزدیک‌تر به زمین و غیر زمین مرجع، استفاده می‌کنند (Ma و همکاران، ۲۰۱۷، ۱۱). الگوریتم‌های مختلف، انواع سنسورها (سنجنده) و ابزارها بر روی انواع ماهواره‌ها وجود دارد (Chen، ۲۰۱۴، ۳۰۷۵)، به‌گونه‌ای که امروزه یکی از منابع برآورد بارش در سطح جهانی، محصولات بارش ماهواره‌ای<sup>۱</sup> (SPPs) به دست آمده از الگوریتم‌های تخمین بارش ماهواره‌ای است. تعداد زیادی محصول بارش شبکه‌بندی شده با رزولوشن‌های مکانی و زمانی مختلف، به دست آمده از الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای بر اساس روش ترکیبی مادون قرمز و ماکروویو، منتشر شده‌اند که از آن جمله می‌توان الگوریتم بارش چند ماهواره‌ای مأموریت اندازه‌گیری بارندگی گرمسیری (TRMM)<sup>۲</sup> با نام TMPA<sup>۳</sup>، پروژه نقشه ماهواره‌ای جهانی بارش<sup>۴</sup> (GSMaP)، پروژه اقلیم‌شناسی بارش جهانی<sup>۵</sup> (GPCP)، و نسخه کالیبره شده IMERG<sup>۶</sup> محصول ماهواره مأموریت اندازه‌گیری بارش جهانی (GPM)<sup>۷</sup>، را نام برد (اکبری و همکاران، ۱۳۹۵، ۱؛ Duan و همکاران، ۲۰۱۶، ۲؛ Chen و همکاران، ۲۰۱۹، ۲؛ Abdollahipour و همکاران، ۲۰۲۰، ۲). در طول دهه گذشته، مطالعات زیادی عملکرد خوب محصولات بارش ماهواره TRMM را در مقابل مشاهدات ایستگاه‌های زمینی، گزارش کرده‌اند (Liu و همکاران، ۲۰۱۸، ۲). ماهواره TRMM تا تاریخ ۸ آوریل سال ۲۰۱۵ به مأموریت خود در مدار اصلی ادامه داد و کم‌کم از مدار خارج و به سمت زمین بر فراز اقیانوس هند جنوبی در تاریخ ۱۵ ژوئن فرود آمد. بر پایه موفقیت‌ها و استراتژی TRMM در ۲۸ فوریه سال ۲۰۱۴ نسل جدید ماهواره‌های تخمین بارش با نام GPM که دارای تجهیزات و سنسورهای پیشرفته است، به فضا پرتاب شد؛ اگرچه برآوردهای مبتنی بر ماهواره، اطلاعات قابل اعتمادتری از بارش برای مناطقی که دارای تعداد باران‌سنج‌های محدود و یا

<sup>1</sup> Satellite-based Precipitation Products (SPPs)

<sup>2</sup> Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

<sup>3</sup> TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA)

<sup>4</sup> Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP)

<sup>5</sup> Global Precipitation Climatology Project (GPCP)

<sup>6</sup> Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG)

<sup>7</sup> Global Precipitation Measurement (GPM)

فاقد باران سنج هستند، ارائه می‌دهد، ولی رزولوشن مکانی آن‌ها برای کاربرد در مناطق محلی و حوضه‌های آبریز، شبکه‌های آبیاری و زهکشی، و یا برای پارامتر سازی مدل‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی در مقیاس محلی، بیش از حد درشت می‌باشد و کاربرد وسیع این محصولات را محدود کرده است (Xu و همکاران، ۲۰۱۵، ۱۱۹؛ Ma و همکاران، ۲۰۱۷، ۲؛ Ma و همکاران، ۲۰۲۰، ۴). از طرفی، همواره رابطه قوی بین بارش و سایر متغیرهای محیطی (مثلاً پوشش گیاهی، توپوگرافی و ...) وجود دارد (Jia و همکاران، ۲۰۱۱، ۳۰۷۱؛ Zhan، ۲۰۱۸، ۱) و رزولوشن مکانی داده‌های بارش ماهواره‌ای می‌تواند با ایجاد یک مدل آماری بین بارش و این عوامل محیطی مرتبط با آن که دارای رزولوشن مکانی بالاتر می‌باشند، به‌طور قابل توجهی بهبود یابد (Xu و همکاران، ۲۰۱۵، ۱۲۰). بنابراین، در سال‌های اخیر، روش‌های ریزمقیاس‌نمایی و استفاده از متغیرهای محیطی مختلف مانند عوامل توپوگرافی، شاخص‌های پوشش گیاهی، دمای سطح زمین و ...، برای به دست آوردن تخمین‌های بارش با رزولوشن مکانی بالا (یک کیلومتر) (Duan و Bastiaanssen، ۲۰۱۳، ۲)، موردبررسی قرار گرفته شده است (Ma و همکاران، ۲۰۱۷، ۲؛ مقاله مروری Abdollahipour و همکاران، ۲۰۲۱، ۲). به‌منظور ریزمقیاس‌نمایی داده‌های TMPA-3B43V7، Immerzeel و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که یک رابطه‌نمایی بین بارش و شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی<sup>۱</sup> (NDVI) وجود دارد. به دلیل تأثیر توپوگرافی در حوضه Qaidam، Jia و همکاران (۲۰۱۱)، یک مدل رگرسیون خطی چندگانه را با استفاده از NDVI و مدل رقومی ارتفاع<sup>۲</sup> (DEM) برای ریزمقیاس‌کردن داده‌های TMPA در منطقه مطالعاتی، معرفی کردند. برای بهبود دقت و صحت نتایج، Duan و Bastiaanssen (۲۰۱۳)، روش ترکیبی کالیبراسیون-ریزمقیاس‌نمایی (آنالیز تفاوت جغرافیایی<sup>۳</sup>: GDA و آنالیز نسبت جغرافیایی<sup>۴</sup>: GRA) را با استفاده از مشاهدات باران‌سنجی پس از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های TMPA به کمک داده‌های NDVI، پیشنهاد کردند. این مطالعات نشان می‌دهد که روش‌های ریزمقیاس‌نمایی پیشین، بر اساس این فرض بوده‌اند که رابطه بین بارش و سایر متغیرهای محیطی مرتبط با آن (مثلاً NDVI و/یا DEM) در یک منطقه، ثابت و ایستا است. از طرفی، Chen و همکاران (۲۰۱۵) و Xu و همکاران (۲۰۱۵) در نظر گرفتند که این روابط از نظر مکانی متغیر و نایستا<sup>۵</sup> بوده و به‌منظور رفع ناهمگنی مکانی ناشی از عواملی مانند نوع خاک، شرایط هیدرولوژیکی، فعالیت‌های انسانی و ...، یک روش رگرسیونی پنجره متحرک (رگرسیون وزنی جغرافیایی<sup>۶</sup>: GWR) که در آن هر نقطه رگرسیون یک رابطه رگرسیونی با نقاط داده‌ای مجاور دارد، معرفی کردند. این مطالعات عمدتاً NDVI و یا DEM را به‌عنوان متغیرهای محیطی در فرآیند ریزمقیاس‌نمایی داده‌های TMPA، موردبررسی قرار دادند. همچنین، مطالعات دیگر نشان داده‌اند که الگوهای مکانی بارش تحت تأثیر سایر ویژگی‌های سطح زمین قرار دارد. Chen و همکاران (۲۰۱۵) از دمای سطح زمین<sup>۷</sup> (LST) برای

<sup>1</sup> The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

<sup>2</sup> The digital elevation model (DEM)

<sup>3</sup> The Geographical Difference Analysis (GDA)

<sup>4</sup> The Geographical Ratio Analysis (GRA)

<sup>5</sup> Non-stationary

<sup>6</sup> The Geographically Weighted Regression (GWR)

<sup>7</sup> Land Surface Temperature (LST)

به‌بود نتایج ریزمقیاس نمایی مکانی با استفاده از GWR استفاده کردند. همچنین، Fang و همکاران (۲۰۱۳) پیشنهاد دادند که عوامل توپوگرافی مانند ارتفاع، شیب و ... بر الگوهای توزیع مکانی بارش تأثیر گذارند (Ma و همکاران، ۲۰۱۷، ۲). Ma و همکاران (۲۰۱۸) مجموعه داده‌های TRMM و GPM را به‌منظور به دست آوردن داده‌های بارش ریزمقیاس شده با رزولوشن یک کیلومتر بر اساس مدل جنگل تصادفی، بررسی کردند. متغیرهای سطح زمین شامل NDVI، دماهای سطح زمین در روز و شب، DEM و سایر شاخص‌های توپوگرافی بود. نتایج نشان داد که مجموعه داده‌های IMERG در مقیاس زمانی ماهانه و سالانه داده‌های بارش دقیق‌تری نسبت به TRMM ارائه داد. Chen و همکاران (۲۰۱۹) از یک روش ریزمقیاس نمایی بر اساس GWR با در نظر گرفتن نا ایستایی مکانی در روابط بین بارش و متغیرهای محیطی مرتبط، برای محصولات TRMM-3B43 و GPM-3IMERGM استفاده کردند. نتایج نشان داد که مقدار MAE داده‌های 3IMERGM کمی بیشتر از داده‌های TRMM بود، اما مقادیر  $R^2$  و RMSE داده‌های 3IMERGM به‌طور کلی بهتر از TRMM بود. Zhao (۲۰۲۱) برای ریزمقیاس کردن بارش ماهانه IMERG، از روش جنگل تصادفی و روش تصحیح باقیمانده همراه با شبکه باران‌سنجی استفاده کرد. ارتفاع، شیب، جهت شیب، برجستگی، فاصله از دریا و شاخص پوشش گیاهی، به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که دقت ریزمقیاس نمایی IMERG با مدل جنگل تصادفی بهبود یافت و اصلاحات باقیمانده توانست نتایج مدل جنگل تصادفی را با کاهش MAE و RMSE به ترتیب ۱۹ و ۲۱ درصد بهبود دهد.

بنابراین، در این پژوهش یک روش ریزمقیاس نمایی - کالیبراسیون تجمیع شده و یکپارچه با در نظر گرفتن رابطه مکانی نا ایستا بین بارش و متغیرهای محیطی مرتبط با آن، با استفاده از مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی مختلط<sup>۱</sup> (MGWR) که توسعه یافته مدل GWR با در نظر گرفتن متغیرهای سراسری می‌باشد (Abdollahipour و همکاران، ۲۰۲۱، ۶)، به‌منظور به دست آوردن بهترین تخمین‌های بارش ماهواره‌ای GPM در رزولوشن مکانی یک کیلومتر و در مقیاس زمانی سالانه، برای استان گلستان توسعه داده شد. در این روش پیشنهادی، علاوه بر متغیرهای NDVI و DEM (عوامل توپوگرافی نظیر ارتفاع، شیب<sup>۲</sup>، جهت شیب<sup>۳</sup>) و LST (دمای سطح زمین در روز، دمای سطح زمین در شب و اختلاف دمای سطح زمین در روز و شب)، چون بارش یک متغیر مکانی ناهمگن است، موقعیت جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی)<sup>۴</sup> نیز به‌عنوان متغیرهایی که تغییرات مکانی بارش را منعکس می‌کنند (Zhao و همکاران، ۲۰۱۷، ۴) و همچنین، متغیر هواشناسی سراسری سرعت باد به‌منظور نمایش بهتر تغییرات مکانی بارش در مدل (Zhang و همکاران، ۲۰۱۸، ۲۲)، در نظر گرفته شد.

<sup>1</sup> Mixed geographically weighted regression (MGWR)

<sup>2</sup> Slope

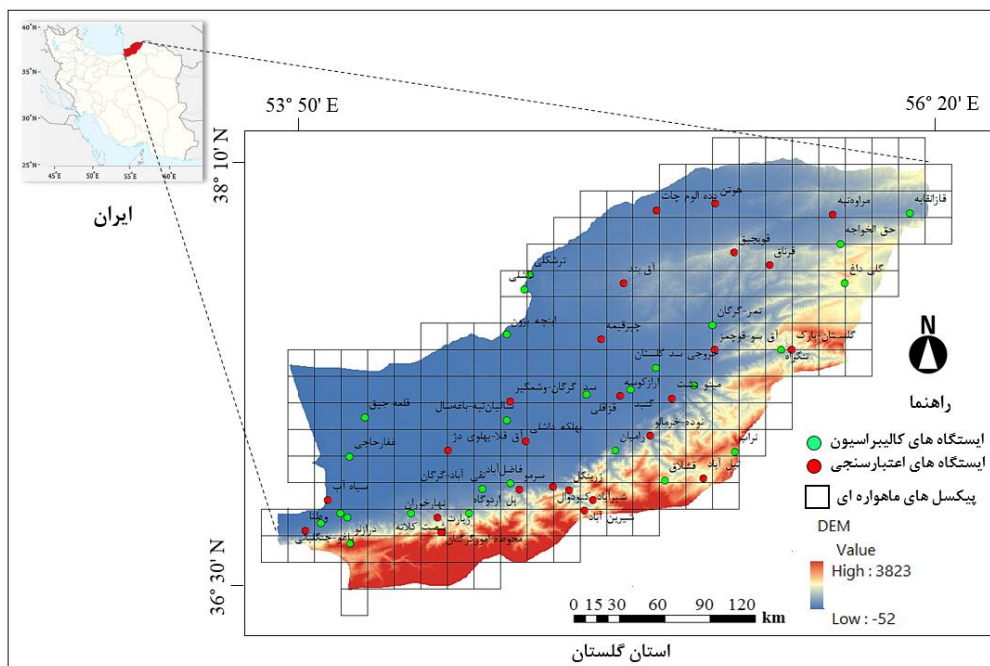
<sup>3</sup> Aspect

<sup>4</sup> Geolocations (longitude and latitude)

## داده‌ها و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

مناطق شمالی کشور، به دلیل موقعیت خاص اقلیمی همواره در زمینه بررسی میزان بارندگی از نظر متخصصان، بسیار حائز اهمیت بوده است (قرابیلگی و همکاران، ۱۳۹۲، ۳). این مناطق با توجه به توپوگرافی پیچیده، تغییرات مکانی زیاد بارش، شرایط آب و هوایی گوناگون و متنوع و قرار گرفتن در نزدیکی یک دریاچه بزرگ داخلی یعنی دریای خزر، برای ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای ایده آل می‌باشند (Duan و Bastiaanssen، ۲۰۱۳، ۲). بنابراین در این پژوهش، استان گلستان به عنوان منطقه مطالعاتی، مدنظر قرار گرفت (شکل ۱). این استان با مساحت حدود ۲۰۴۳۸ کیلومتر مربع، بین ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه و ۲ ثانیه تا ۳۸ درجه و ۷ دقیقه و ۶ ثانیه عرض شمالی و ۵۳ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۲۱ دقیقه و ۴ ثانیه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده و به دلیل جایگاه جغرافیایی ویژه خود، از آب و هوای گوناگونی برخوردار است.



شکل ۱: موقعیت منطقه مطالعاتی، DEM، و توزیع مکانی ایستگاه‌های باران‌سنج برای مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی

## مجموعه داده‌ها و پردازش آن‌ها

### داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی

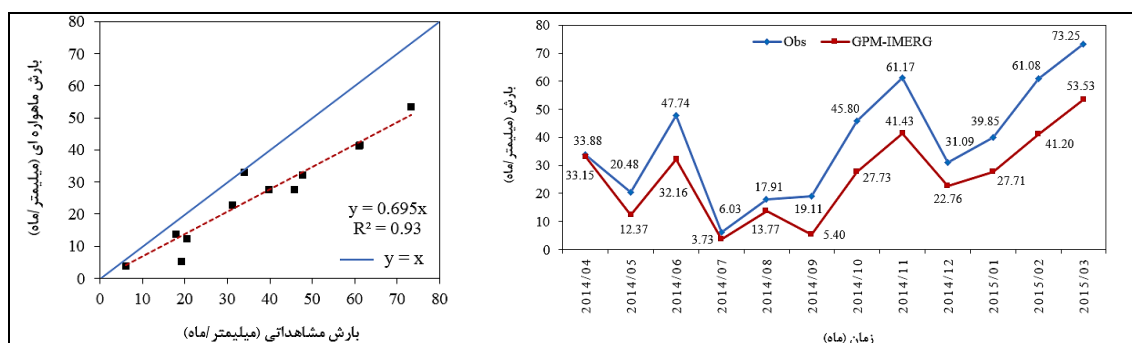
در این پژوهش، داده‌های بارش ماهانه از ۵۲ ایستگاه باران‌سنجی (RGS) در داخل منطقه مطالعاتی، با توجه به پیوسته بودن آمار این ایستگاه‌ها و وجود داده‌های تأیید شده، برای سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵ تهیه شد (<http://wrbs.wrm.ir>).

همچنین، داده‌های بارش سالانه برای هر ایستگاه با جمع کردن داده‌های بارش ماهانه در سال، محاسبه شد. با توجه به شکل ۱، توزیع مکانی ایستگاه‌های باران‌سنجی نشان می‌دهد که توزیع ایستگاه‌ها در جنوب منطقه بیشتر است. برای مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی، جداسازی داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی (RGS) در منطقه مورد مطالعه به دو مجموعه داده، به شرح زیر انجام شد (Duan و Bastiaanssen، ۲۰۱۳، ۳):

ابتدا؛ برای تمام دوره ۶ ساله (یعنی؛ ۲۰۱۴-۲۰۰۹)، میانگین بارش سالانه از تمام ۵۲ ایستگاه باران‌سنجی محاسبه و از کم‌ترین به بیشترین ردیف ۱-۵۲ مرتب شد. سپس؛ ۲۵ ایستگاه با اعداد فرد از ۱ تا ۴۹ به‌علاوه شماره ۵۲ به‌عنوان ایستگاه‌های باران‌سنجی کالیبراسیون و بقیه به‌عنوان ایستگاه‌های اعتبارسنجی، در نظر گرفته شد. ایستگاه‌های باران‌سنجی برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی در شکل ۱، نشان داده شده است.

### مجموعه داده‌های بارش ماهواره‌ای

نسخه کالیبره شده IMERG محصول GPM Constellation Satellites است که محصول اجرای نهایی، یک محصول تحقیقاتی، پس از زمان واقعی است و از ۱۲ مارس ۲۰۱۴ در دسترس می‌باشد و در مقیاس‌های زمانی نیم‌ساعته و ماهانه در دسترس هستند و دارای رزولوشن مکانی ۰/۱ درجه (حدود ۱۰ کیلومتر) می‌باشند که از عرض جغرافیایی ۶۰ درجه شمالی تا ۶۰ درجه جنوبی را پوشش می‌دهد. در این پژوهش، محصول IMERG شبکه‌بندی شده در مقیاس زمانی ماهانه یعنی 3IMERGM با رزولوشن مکانی ۰/۱ درجه جغرافیایی و فرمت NetCDF از <https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/gpm> دریافت شد. با توجه به این که داده‌های جدید بارش ماهواره‌ای GPM از تاریخ ۲۰۱۴/۰۳/۱۲ میلادی تاکنون انتشار یافته و در دسترس است، ریزمقیاس نمایی این داده‌ها از ۲۰۱۴/۰۴ تا ۲۰۱۵/۰۳ به مدت یک سال نمونه، انجام و داده‌های بارش سالانه با جمع تمام ۱۲ مجموعه داده بارش ماهانه، تولید شد. مطابق شکل ۲، برای سال نمونه، بارش ماهانه مشاهداتی و بارش ماهانه مبتنی بر ماهواره مقایسه شده است.



شکل ۲: مقایسه داده‌های بارش ماهانه مشاهداتی و ماهواره‌ای برای سال نمونه

## داده‌های مشخصات توپوگرافی

مأموریت مکان نگاری شاتل رادار<sup>۱</sup> (SRTM) که توسط آژانس ملی اطلاعات مکانی<sup>۲</sup> (NGA) و ناسا (NASA) اداره می‌شود، DEM با رزولوشن بالا بین 56°S و 60°N را در سطح جهانی ارائه می‌کند (Ma و همکاران، ۲۰۱۷، ۳). مجموعه داده‌های مدل رقومی ارتفاع (DEM) برای منطقه مطالعاتی، در رزولوشن مکانی ۳۰ متری (1 Arc-Second)، تهیه شد (<https://earthexplorer.usgs.gov>). سایر شاخص‌های توپوگرافی نظیر؛ ارتفاع، شیب، جهت شیب (بیانگر تغییرات ارتفاع در جهات مختلف است که می‌تواند شاخص مناسبی برای بیان کردن اثر ارتفاع روی بارش کوهستانی باشد و دامنه مقادیر در نقشه جهت شیب، بین صفر تا ۳۶۰ درجه است)، و طول و عرض جغرافیایی، از مجموعه داده‌های DEM استخراج شد.

## داده‌های شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی

شاخص پوشش گیاهی NDVI محل‌های احتمالی پوشش گیاهی را با تغییرات عددی بین +۱ تا -۱ نشان می‌دهد. مناطقی که دارای پوشش گیاهی متراکم باشند، این شاخص به سمت +۱ و نواحی که از لحاظ تراکم گیاهی ضعیف باشند، به سمت -۱ میل می‌کند (مقادیر نزدیک به صفر و منفی، نشان‌دهنده پیکره‌های آبی، سطوح پوشیده از برف و خاک بدون گیاه است). اگر چه بارش بستگی به عوامل متعددی دارد، تحقیقات نشان می‌دهد که پاسخ پوشش گیاهی در مقیاس زمانی سالانه ارتباط مثبتی با بارش دارد (Duan و Bastiaanssen، ۲۰۱۳، ۲). در این پژوهش، محصول Terra MODIS یعنی شاخص گیاهی MOD13A1 به‌عنوان یک پیش‌بینی‌کننده جغرافیایی برای ریزمقیاس‌نمایی بارش انتخاب شد. شاخص NDVI از MOD13A1 در آخرین مجموعه ۶ MODIS از طریق Terra MODIS، با رزولوشن زمانی ۱۶ روزه و مکانی ۵۰۰ متر تولید می‌شود و از سایت مرکز نگهداری و توزیع پردازش‌های زمین<sup>۳</sup> (LP DAAC) ناسا، دریافت شد ([https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis/modis\\_products\\_table/mod13a1\\_v006](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod13a1_v006)). در سال ۲۰۰۰، پس از آغاز Terra MODIS، بیست دوره ۱۶ روزه وجود داشت و در سال‌های بعد بیست‌وسه دوره ۱۶ روزه در هر سال بوده است. برای سال نمونه، تمام مقادیر NDVI در منطقه مطالعاتی به‌منظور تعیین پوشش گیاهی سالانه، میانگین گرفته شد.

## مجموعه داده‌های دمای سطح زمین

سنسورهای MODIS بر روی ماهواره‌های Terra و Aqua یک ثبت جهانی از مشاهدات دمای سطح زمین در روز و شب را فراهم می‌کند (Ma و همکاران، ۲۰۱۷، ۴). مجموعه داده‌های MOD11A2 از آخرین مجموعه ۶ MODIS که در این مطالعه استفاده شد، در رزولوشن زمانی ۸ روزه و مکانی یک کیلومتر ارائه شده است.

<sup>1</sup> The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

<sup>2</sup> The National Geospatial-Intelligence Agency (NGA)

<sup>3</sup> The NASA Land Processes Distributed Active Archive Center

(https://lpdaac.usgs.gov/dataset\_discovery/modis/modis\_products\_table/mod11a2\_v006). در سال ۲۰۰۰، پس از شروع Terra MODIS، چهل دوره ۸ روزه و در سال‌های بعد، هر ساله چهل و پنج دوره ۸ روزه وجود دارد. بنابراین، برای سال نمونه، متوسط دمای سطح زمین در روز و شب برای تعیین دماهای سطح زمین در طول سال برای روز (LST-D) و شب (LST-N) و همچنین، اختلاف دمای روز و شب (LST-DN) در منطقه مطالعاتی محاسبه شد. اختلاف دمای روز و شب با کم کردن دمای سطح زمین در شب از دمای سطح زمین در روز، به دست آمد (Jing و همکاران، ۲۰۱۶، ۵).

### مجموعه داده‌های سرعت باد

در این پژوهش، از داده‌های ماهانه سرعت باد ۱۰ متر با رزولوشن مکانی  $0.125 \times 0.125$  درجه جغرافیایی (حدود ۱۰ کیلومتر)، استفاده شد و از سایت <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-modat/levtype=sfc> تهیه شد. همچنین، از میانگین این داده‌های ماهانه، مجموعه داده‌های سرعت باد در مقیاس زمانی سالانه به دست آمد.

### مدل رگرسیونی

رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR)، یک روش رگرسیون منطقه‌ای است که می‌تواند در بررسی مشخصات نا ایستا و وابسته به مقیاس رابطه بین متغیرهای وابسته و مستقل، استفاده شود (Xu و همکاران، ۲۰۱۵، ۱۲۲). در این روش رگرسیونی پنجره متحرک هر نقطه رگرسیونی یک رابطه رگرسیونی با نقاط داده‌ای مجاور (اطراف) دارد (Ma و همکاران، ۲۰۱۷، ۲). هنگام ایجاد رابطه رگرسیونی در هر نقطه رگرسیونی، GWR نقاط داده‌ای همسایه را برای تولید ضرایب رگرسیونی جستجو می‌کند و هر نقطه داده<sup>۱</sup> با فاصله آن از نقطه رگرسیونی<sup>۲</sup>، وزن دار می‌شود طوری که یک نقطه داده (مشاهدات) نزدیک‌تر به نقطه رگرسیونی (نقطه مرکزی)، وزن بیشتری می‌گیرد (Chen، ۲۰۱۴، ۳۰۸۱). در فرآیند ریزمقیاس نمایی، ایجاد مدل‌های GWR تا حد زیادی به انتخاب دو پارامتر مهم (۱) پارامتر "تابع کرنل"<sup>۳</sup> و (۲) پارامتر "معیار انتخاب"<sup>۴</sup> بستگی دارد. رابطه رگرسیونی در مدل رگرسیونی وزنی جغرافیایی مختلط (MGWR) مورد استفاده در این پژوهش که توسعه یافته مدل GWR با در نظر گرفتن متغیرهای سراسری اضافه می‌باشد، به صورت معادله ۱ است:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^k \beta_j(u_i, v_i)x_{ij} + \sum_{l=1}^m \gamma_l z_{il} + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

که  $y_i$  متغیر وابسته در موقعیت نقطه  $i$  ام،  $x_{ij}$  متغیر مستقل  $j$  ام در موقعیت نقطه  $i$  ام،  $\beta_0(u_i, v_i)$  و  $\beta_j(u_i, v_i)$  به ترتیب؛ شیب و عرض از مبدا تخمین زده شده در نقطه  $i$  ام و  $k$  تعداد متغیرهای مستقل هستند.  $\gamma_l$  ضریب رگرسیونی  $l$

<sup>1</sup> Data point or observation point

<sup>2</sup> Regression point or center point

<sup>3</sup> Kernel function

<sup>4</sup> Selection criteria



ام برای متغیر سرا سری  $l$  ام در موقعیت مکانی  $i$  (یعنی  $Z_{il}$ ) و  $m$  تعداد متغیرهای سرا سری می‌باشد.  $\varepsilon_i$  باقی‌مانده رگرسیون (یا خطای مدل)، در نقطه  $i$  ام است؛ و  $(u_i, v_i)$  مختصات نقطه  $i$  ام در فضا هستند. در این پژوهش، تابع Adaptive bi-square به‌عنوان تابع کرنل و معیار اطلاعاتی اکائیک تصحیح‌شده نمونه کوچک<sup>۱</sup> (AICc)، به‌عنوان معیار انتخاب در نظر گرفته شد (Ma و همکاران، ۲۰۱۷، ۴) و از آخرین نسخه نرم‌افزار GWR یعنی نسخه ۴/۰۹، برای مدل رگرسیونی MGWR که از سایت <http://gwr.maynoothuniversity.ie/gwr4-software> دریافت شد، استفاده گردید.

## روش‌ها

مراحل روش پژوهش شامل: (۱) پردازش داده‌های ماهواره‌ای و آماده‌سازی آن‌ها یعنی یکسان نمودن رزولوشن مکانی تصاویر و سیستم تصویر تمامی لایه‌های مورد استفاده برای استخراج رابطه رگرسیونی، (۲) ریزمقیاس‌نمایی شامل تعیین روابط بین متغیرها، شبیه‌سازی و تخمین بارش در مقیاس سالانه با مدل رگرسیونی و اصلاح باقی‌مانده، (۳) کالیبراسیون نتایج ریزمقیاس‌شده سالانه برای کاهش خطا، و (۴) اعتبارسنجی نتایج، می‌باشد. لازم به ذکر است که در این پژوهش، منظور از رزولوشن مکانی پایین (LR)، رزولوشن ۱۰ کیلومتر  $\times$  ۱۰ کیلومتر و رزولوشن مکانی بالا (HR)، رزولوشن ۱ کیلومتر  $\times$  ۱ کیلومتر، می‌باشد. هر یک از گام‌های اصلی روش پیشنهادی به شرح ذیل است:

(۱) پردازش داده‌ها و ریزمقیاس‌نمایی

مجموعه داده‌های بارش ماهواره‌ای می‌تواند بر اساس این فرض که یک رابطه قوی بین بارش و سایر متغیرهای محیطی مرتبط با آن وجود دارد، ریزمقیاس‌شود (Chen، ۲۰۱۴، ۳۰۷۹؛ Alexakis و Tsanis، ۲۰۱۶، ۴). ریزمقیاس‌نمایی بارش می‌تواند به‌صورت رابطه ۲، بیان شود:

$$P_{HR} = \hat{P}_{HR} + P_{Residual} \quad (2)$$

که  $P_{HR}$  بارش ریزمقیاس‌شده با رزولوشن مکانی بالا (HR)،  $\hat{P}_{HR}$  بارش تخمین زده‌شده در رزولوشن مکانی بالا (HR) از سایر متغیرهای محیطی در مدل ریزمقیاس‌نمایی و  $P_{Residual}$  باقی‌مانده بین بارش اصلی و بارش تخمین زده‌شده در رزولوشن مکانی بالا (HR) است و در واقع بیانگر بارشی است که با متغیرهای محیطی، تخمین زده نمی‌شود. بنابراین:

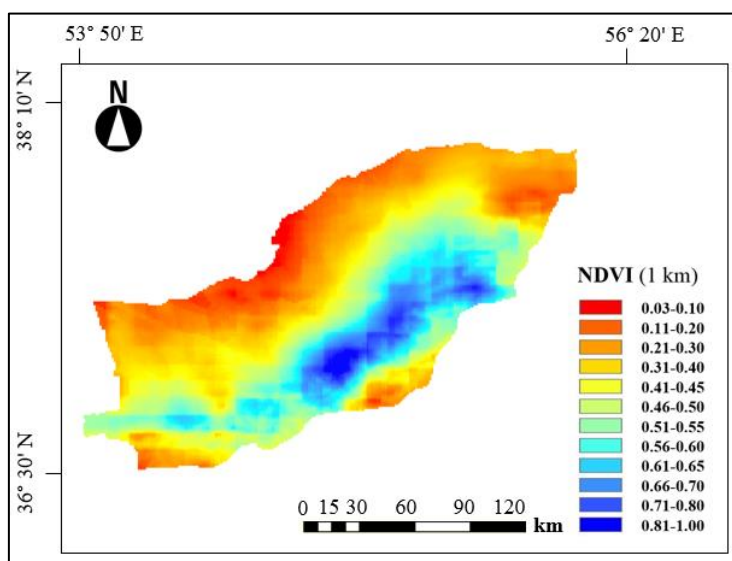
(۱-۱) رزولوشن مکانی تمامی متغیرهای محیطی کمکی به رزولوشن مکانی بالا (HR) نمونه‌گیری مجدد شد.

(۲-۱) یک مسئله مهم در ایجاد مدل رگرسیونی، بررسی و پردازش ناهنجاری مجموعه داده‌های NDVI می‌باشد (Jia

و همکاران، ۲۰۱۱، ۳۰۷۲). فرض اساسی مدل رگرسیونی این است که بین میزان بارش و NDVI در مقیاس‌های مختلف رابطه معنی‌داری وجود دارد. اما، در برخی از مناطق محلی، به دلیل پوشش برف، و یا وجود پیکره‌های آبی مختلف مانند رودخانه‌ها و دریاچه‌ها این رابطه همبستگی معنی‌دار بین بارش و NDVI مختل می‌شود. پس، مناطق

<sup>1</sup> Small sample bias corrected AIC (AICc)

مناسب با استفاده از آستانه مقادیر  $NDVI > 0$  انتخاب شد. شکل ۳، توزیع مکانی  $NDVI$  (یک کیلومتر) را برای سال نمونه نشان می‌دهد.



شکل ۳: توزیع مکانی  $NDVI$  (یک کیلومتر) با آستانه مقادیر  $NDVI > 0$ ، برای استان گلستان و در سال نمونه

(۳-۱) مجموعه داده اصلی بارش در یک رزولوشن  $10^\circ/10^\circ$  درجه به سیستم تصویر مرکاتور معکوس (جانبی)<sup>۱</sup> در یک

رزولوشن مکانی LR تبدیل شد؛ زیرا فاصله اقلیدسی در مدل MGWR استفاده شد.

(۴-۱) متغیرهای محیطی در رزولوشن مکانی بالا (HR) به رزولوشن مکانی پایین (LR) با میانگین تمام مقادیر یک

کیلومتری در هر پیکسل  $10$  کیلومتری، نمونه‌گیری مجدد شدند. در نهایت، مقادیر متغیرهای محیطی و بارش در رزولوشن مکانی مشابه، در همان موقعیت برای تولید مدل MGWR قرار داده شد.

(۵-۱) در رزولوشن مکانی پایین (LR)، مدل رگرسیونی با استفاده از بارش به‌عنوان متغیر وابسته و متغیرهای محیطی

به‌عنوان متغیرهای مستقل، برای سال نمونه ایجاد شد که به‌صورت معادله ۳، است:

$$\hat{P}_{LR} = \beta_{0,LR}(u) + \beta_{1,LR}(u)x_{1,LR} + \beta_{2,LR}(u)x_{2,LR} + \dots + \beta_{k,LR}(u)x_{k,LR} + \gamma z_{LR} \quad (4)$$

که در آن،  $\hat{P}_{LR}$  بارش تخمین زده شده در رزولوشن مکانی پایین (LR)،  $x_{LR}$  بیانگر متغیرهای سطح زمین در رزولوشن

مکانی پایین (LR) و  $K=9$  تعداد این متغیرها است.  $\gamma$  ضریب رگرسیونی و  $z_{LR}$  متغیر سرعت باد در رزولوشن مکانی پایین

(LR) می‌باشد. همچنین،  $\beta_{LR}(u)$  پارامترهای مدل در رزولوشن مکانی پایین (LR) است.

<sup>1</sup> Transverse Mercator (TM) projection

۶-۱) پارامترهای مدل یعنی  $\beta_{LR}(u)$  در رزولوشن مکانی پایین (LR) که از مدل به دست آمدند، با روش نمونه‌گیری مجدد نزدیک‌ترین همسایه<sup>۱</sup> (Chen و همکاران، ۲۰۱۸، ۱۵۸)، به پارامترهای مدل با رزولوشن مکانی بالا (HR) یعنی  $\beta_{HR}(u)$  تبدیل شدند.

۷-۱) تخمین بارش سالانه با رزولوشن مکانی بالا (HR) با اعمال متغیرهای کمکی در رزولوشن مکانی بالا (HR) و استفاده از پارامترهای مدل با رزولوشن مکانی بالا (HR) که در گام (۶-۱) به دست آمد. بنابراین داریم:

$$\hat{P}_{HR} = \beta_{0,HR}(u) + \beta_{1,HR}(u)x_{1,HR} + \beta_{2,HR}(u)x_{2,HR} + \dots + \beta_{k,HR}(u)x_{k,HR} + \gamma Z_{HR} \quad (۴)$$

که  $\hat{P}_{HR}$  بارش سالانه ریزمقیاس شده در رزولوشن مکانی بالا (HR) قبل از اصلاح باقی‌مانده به‌جز برای پیکسل‌های حذف شده در گام (۲-۱)،  $X_{HR}$  بیانگر متغیرهای کمکی سطح زمین در رزولوشن مکانی بالا (HR) و K تعداد این متغیرها است.  $\gamma$  ضریب رگرسیونی و  $Z_{HR}$  متغیر سرعت باد در رزولوشن مکانی بالا (HR) است. همچنین،  $\beta_{HR}(u)$  پارامترهای مدل در رزولوشن مکانی بالا (HR) است.

۸-۱) بارش ریزمقیاس شده در رزولوشن مکانی بالا (HR) بر روی پیکسل‌های حذف شده در گام (۲-۱)، با درون‌یابی بارش تخمین زده شده در رزولوشن مکانی بالا (HR) یعنی  $\hat{P}_{HR}$  تولید شده در گام (۷-۱)، با استفاده از درون‌یابی اسپلاین کششی ساده<sup>۲</sup> (Xu و همکاران، ۲۰۱۵، ۱۲۳)، برای پر کردن شکاف این پیکسل‌ها، در نرم‌افزار ArcGIS 10.3.1، تخمین زده شد.

۹-۱) مرحله اصلاح باقی‌مانده<sup>۳</sup>. باقی‌مانده‌ها از کم کردن مقادیر بارش تخمین زده شده در رزولوشن مکانی پایین (LR) از مقادیر اصلی، به دست می‌آید. بنابراین، معادله ۵ را به‌صورت زیر داریم:

$$\varepsilon_{LR} = P_{LR} - \hat{P}_{LR} \quad (۵)$$

که در آن،  $\varepsilon_{LR}$  باقی‌مانده رگرسیون در رزولوشن مکانی پایین (LR) و مقدار بارشی است که با متغیرهای محیطی تخمین زده نمی‌شود.  $P_{LR}$  بارش ماهواره‌ای اصلی و  $\hat{P}_{LR}$  بارش تخمین زده شده، در رزولوشن مکانی پایین (LR) هستند. باقی‌مانده‌های مدل در رزولوشن مکانی پایین (LR) به شبکه‌ای از پیکسل‌ها با رزولوشن مکانی بالا (HR) یعنی  $\varepsilon_{HR}$ ، با استفاده از روش درون‌یابی اسپلاین کششی ساده (Duan و Bastiaanssen، ۲۰۱۳، ۵)، درون‌یابی شد.

۱۰-۱) در نهایت، باقی‌مانده‌های درون‌یابی شده در گام (۹-۱) به نتایج حاصل از گام (۸-۱) اضافه شد و نتایج ریزمقیاس شده نهایی پس از اصلاح باقی‌مانده، به دست آمد. رابطه ۶ به‌صورت زیر است:

$$P_{HR} = \hat{P}_{HR} + \varepsilon_{HR} \quad (۶)$$

<sup>1</sup> The nearest neighbor resampling method

<sup>2</sup> The simple spline tension interpolation

<sup>3</sup> Residual correction

که در آن،  $P_{HR}$  بارش سالانه ریزمقیاس شده نهایی در رزولوشن مکانی بالا (HR) بعد از اصلاح باقی‌مانده،  $\hat{P}_{HR}$  بارش ریزمقیاس شده در رزولوشن مکانی بالا (HR) قبل از اصلاح باقی‌مانده و  $\varepsilon_{HR}$  باقی‌مانده‌های درون‌یابی شده در رزولوشن مکانی بالا (HR) است.

(۲) مرحله کالیبراسیون

در مرحله قبل، بارش سالانه ریزمقیاس شده نهایی در رزولوشن مکانی یک کیلومتر بعد از اصلاح باقی‌مانده و کالیبره نشده ( $P_{DS}^{uncal-1\text{ Km}}$ )، به دست آمد. روش کالیبراسیون تجزیه و تحلیل اختلاف جغرافیایی (GDA) که توسط Cheema و Bastiaanssen (۲۰۱۲) توسعه یافت، به شرح زیر است:

**الف)** طبق رابطه ۷، محاسبه اختلاف بین مقادیر  $P_{DS}^{uncal-1\text{ Km}}$  و بارش اندازه‌گیری شده از ایستگاه‌های باران‌سنجی ( $P^{point}$ ؛ یعنی) برای مناطق جغرافیایی که شامل حداقل یک باران‌سنج است (یعنی؛  $P_{error}^{point}$ ).

$$P_{error}^{point} = P_{DS}^{uncal-1\text{ Km}} - P^{point} \quad (7)$$

**ب)** درون‌یابی کردن  $P_{error}^{point}$  به یک شبکه یک کیلومتری (یعنی؛  $P_{error}^{1\text{ Km}}$ ) با استفاده از تکنیک درون‌یابی IDW<sup>۱</sup> (Duan و Bastiaanssen، ۲۰۱۳، ۵).

**ج)** افزودن خطاهای احتمالی  $P_{error}^{1\text{ Km}}$  به  $P_{DS}^{uncal-1\text{ Km}}$  کالیبره نشده برای به دست آوردن بارش کالیبره شده نهایی (یعنی؛  $P_{cal-GDA}$ ).

(۳) مرحله اعتبارسنجی نتایج

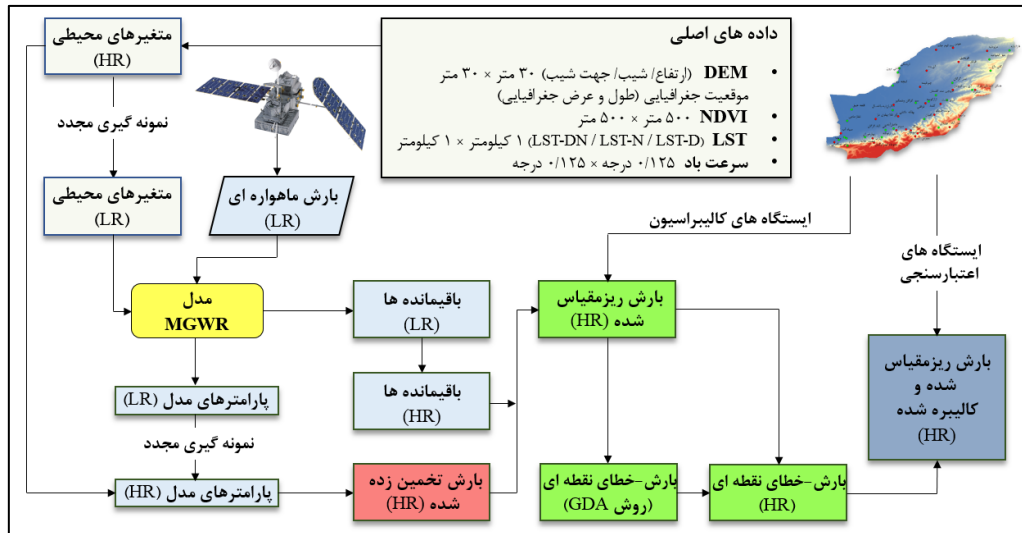
داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی که برای کالیبراسیون استفاده نشدند (یعنی؛ RGS های اعتبارسنجی)، برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده در مراحل قبل، مورد استفاده قرار گرفت. معیارهای ضریب همبستگی<sup>۲</sup> (CC)، جذر میانگین مربعات خطا<sup>۳</sup> (RMSE) و بایاس (bias) به منظور ارزیابی نتایج، استفاده شد. به دلیل آن که معیار RMSE بیشتر به مقادیر شدید حساس است، معیار میانگین خطای مطلق<sup>۴</sup> (MAE) نیز برای ارزیابی محاسبه گردید. مراحل اصلی روش پیشنهادی، در شکل ۴ نشان داده شده است.

<sup>1</sup> The Inverse Distance Weight (IDW)

<sup>2</sup> Correlation Coefficients (CC)

<sup>3</sup> Root Mean Square Error (RMSE)

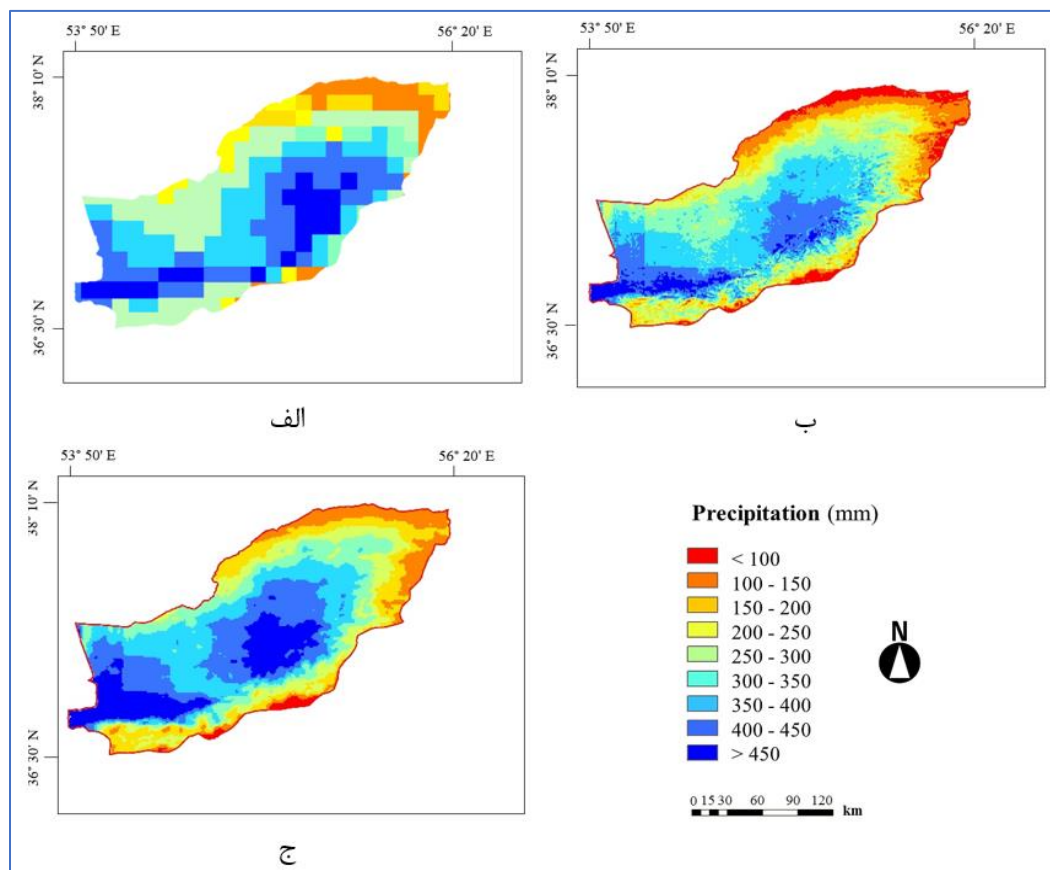
<sup>4</sup> Mean Absolute Error (MAE)



شکل ۴: فلوجارت روش پیشنهادی

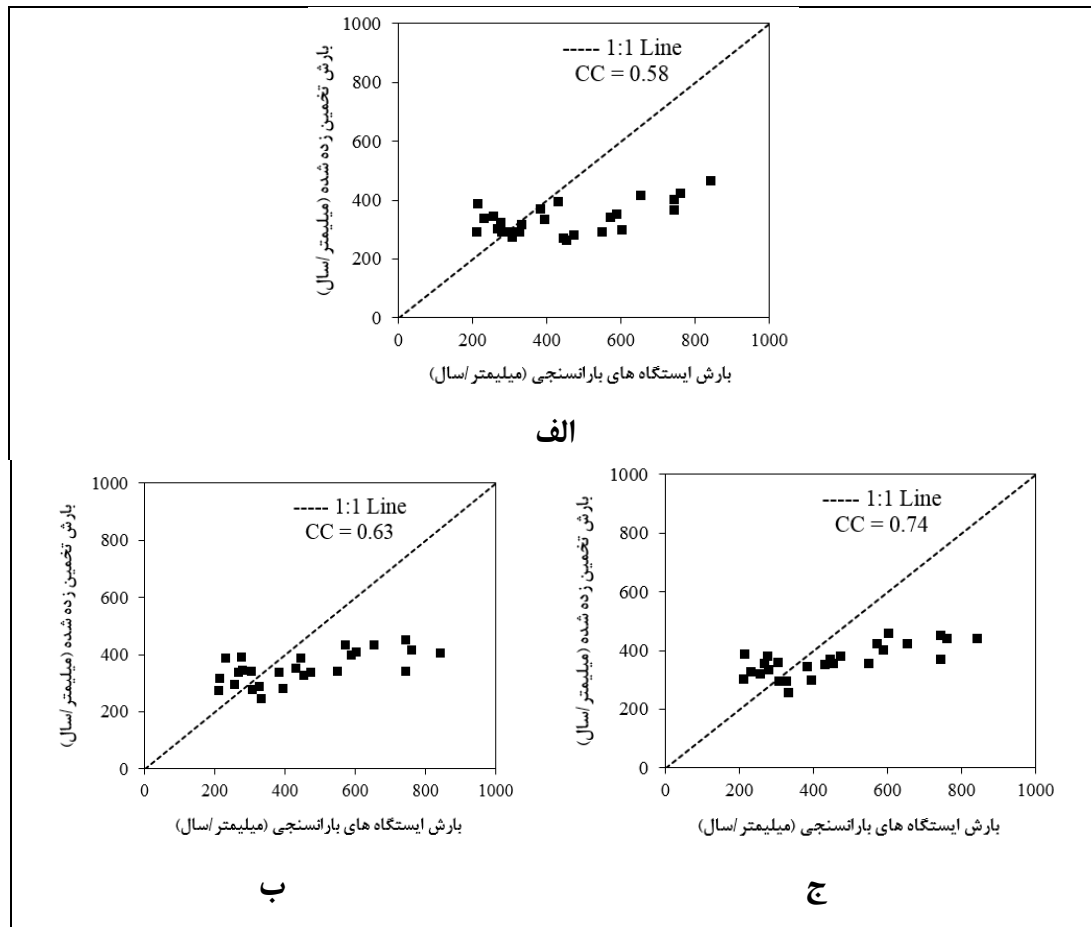
## بحث و یافته‌ها

در این پژوهش برای سال نمونه در نظر گرفته شده برای استان گلستان، به منظور به دست آوردن بهترین تخمین‌های بارش ماهواره‌ای GPM در رزولوشن مکانی یک کیلومتر و در مقیاس زمانی سالانه، بر اساس مطالعات پیشین روش ریزمقیاس‌نمایی - کالیبراسیون پیشنهادی با در نظر گرفتن رابطه مکانی نا ایستا بین بارش و متغیرهای محیطی مرتبط با آن، با استفاده از مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی مختلط (MGWR) به کار برده شد. در شکل ۵، نقشه بارش سالانه به دست آمده از داده‌های اصلی 3IMERGM در رزولوشن مکانی ۱۰ کیلومتر، همچنین، بارش سالانه ریزمقیاس شده نهایی در رزولوشن مکانی یک کیلومتر بعد از اصلاح باقی‌مانده و کالیبره نشده ( $P_{DS}^{uncal-1 Km}$ )، و بارش ریزمقیاس شده و کالیبره شده در رزولوشن مکانی یک کیلومتر با روش GDA (یعنی؛  $P_{cal-GDA}$ ) و با استفاده از مدل MGWR نشان داده شده است. در حالی که اکثر مناطق دارای بارش سالانه کمتر از ۴۵۰ میلی‌متر هستند، تنها بخش کوچکی از قسمت میانی استان دارای بارش سالانه بیش از ۴۵۰ میلی‌متر است. ملاحظه می‌شود که معمولاً همه بارش‌های تخمینی دارای الگوی مکانی یکسانی هستند؛ در بخش شمالی بارش کمتری اتفاق می‌افتد و در بخش میانی استان گلستان بارش بیشتر اتفاق می‌افتد.



شکل ۵: نقشه بارش سالانه برای سال نمونه در استان گلستان (الف) به دست آمده از داده‌های اصلی 3IMERGM در رزولوشن مکانی ۱۰ کیلومتر، (ب) بارش سالانه ریزمقیاس شده نهایی در رزولوشن مکانی یک کیلومتر بعد از اصلاح باقی‌مانده و کالیبره نشده و (ج) بارش ریزمقیاس شده کالیبره شده در رزولوشن مکانی یک کیلومتر با روش GDA و با استفاده از مدل MGWR

در شکل ۶، بارش سالانه اندازه‌گیری شده توسط RGS های اعتبارسنجی مستقل با مقادیر متناظر از بارش سالانه به دست آمده از داده‌های اصلی 3IMERGM در رزولوشن مکانی ۱۰ کیلومتر، همچنین، بارش سالانه ریزمقیاس شده نهایی در رزولوشن مکانی یک کیلومتر بعد از اصلاح باقی‌مانده و کالیبره نشده ( $P_{DS}^{uncal-1\text{ Km}}$ )، و بارش ریزمقیاس شده و کالیبره شده در رزولوشن مکانی یک کیلومتر با روش GDA (یعنی؛  $P_{cal-GDA}$ ) و با استفاده از مدل MGWR برای سال نمونه مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بارش سالانه ریزمقیاس شده نهایی در رزولوشن مکانی یک کیلومتر با استفاده از مدل MGWR به خط ۱:۱ نسبت به 3IMERGM نزدیک‌تر است. به‌علاوه، بارش ریزمقیاس شده و کالیبره شده در رزولوشن مکانی یک کیلومتر با روش GDA و با استفاده از مدل MGWR بهترین تطابق را با RGS های اعتبارسنجی دارد.



**شکل ۶:** مقایسه بارش سالانه به دست آمده از ۲۶ RGS اعتبارسنجی برای سال نمونه در استان گلستان با (الف) بارش 3IMERGM، (ب) بارش سالانه ریزمقیاس شده نهایی در رزولوشن مکانی یک کیلومتر بعد از اصلاح باقی مانده و کالیبره نشده و (ج) بارش ریزمقیاس شده و کالیبره شده در رزولوشن مکانی یک کیلومتر با روش GDA و با استفاده از مدل MGWR

در ادامه؛ شاخص‌های آماری برای بارش سالانه به دست آمده از داده‌های اصلی 3IMERGM در رزولوشن مکانی ۱۰ کیلومتر، بارش سالانه ریزمقیاس شده نهایی در رزولوشن مکانی یک کیلومتر بعد از اصلاح باقی مانده و کالیبره نشده ( $P_{DS}^{uncal-1\text{ Km}}$ )، و بارش ریزمقیاس شده و کالیبره شده در رزولوشن مکانی یک کیلومتر با روش GDA (یعنی؛  $P_{cal-GDA}$ ) و با استفاده از مدل MGWR و ۲۶ RGS اعتبارسنجی برای سال نمونه در استان گلستان در جدول ۱، ارائه شده است.

**جدول ۱:** نتایج اعتبارسنجی با استفاده از ۲۶ RGS اعتبارسنجی در مقیاس سالانه، برای سال نمونه و در استان گلستان

| مدل  | بارش                         | میانگین | CC   | RMSE (MM) | MAE (MM) | Bias |
|------|------------------------------|---------|------|-----------|----------|------|
| -    | RGS                          | ۴۴۹/۱۵  | -    | -         | -        | -    |
| -    | 3IMERGM                      | ۳۳۴/۴۳  | ۰/۵۸ | ۱۹۸/۵۲    | ۱۵۵/۳۲   | ۰/۳۵ |
| MGWR | $P_{DS}^{uncal-1\text{ Km}}$ | ۳۵۱/۵۷  | ۰/۶۳ | ۱۸۴/۷۵    | ۱۴۶/۸۷   | ۰/۲۸ |
|      | $P_{cal-GDA}$                | ۳۷۰/۴۵  | ۰/۷۴ | ۱۷۴/۵۹    | ۱۴۰/۱۵   | ۰/۲۳ |

مطابق جدول ۱، نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی برای تخمین‌های بارش سالانه با افزایش CC و کاهش شاخص‌های خطای RMSE، MAE و بایاس (bias) دقت را بهبود داده است. همچنین، مدل رگرسیونی MGWR عملکرد خوبی ارائه کرده و از طرفی، مرحله کالیبراسیون موجب کاهش خطا شده است. می‌توان مشاهده کرد که میانگین بارش سالانه به دست آمده بعد از مرحله کالیبراسیون به میانگین بارش ثبت شده توسط ایستگاه‌های باران‌سنجی نزدیک‌تر شده است.

## نتیجه‌گیری

به‌منظور رفع محدودیت کاربرد محصولات بارش ماهواره‌ای، یعنی درشت بودن رزولوشن مکانی آن‌ها برای کاربرد در مناطق محلی و حوضه‌های آبریز، در این پژوهش یک روش ریزمقیاس نمایی - کالیبراسیون تجمیع شده و یکپارچه با در نظر گرفتن رابطه مکانی نا ایستا بین بارش و متغیرهای محیطی مرتبط با آن، با استفاده از مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی مختلط (MGWR) به‌منظور به دست آوردن بهترین تخمین‌های بارش در رزولوشن مکانی یک کیلومتر و در مقیاس زمانی سالانه، از محصول 3IMERGM برای استان گلستان توسعه داده شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی نه تنها رزولوشن مکانی بارش را بهبود داد، بلکه دقت نیز افزایش پیدا کرد. همچنین، بارش ریزمقیاس شده و کالیبره شده عملکرد بهتری از داده‌های اصلی در برابر مشاهدات زمینی داشتند و مرحله کالیبراسیون باعث کاهش خطا شد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده مدل‌های یادگیری ماشین نظیر GUIDE و CHAID در R مورد بررسی قرار گیرد و همچنین، خصوصیات ابر (Sharifi و همکاران، ۲۰۱۹، ۷۹۰؛ Ma و همکاران، ۲۰۲۰، ۲) و رطوبت خاک (Zhang و همکاران، ۲۰۱۸، ۲۲) نیز به‌عنوان متغیرهای محیطی در فرآیند ریزمقیاس نمایی در مقیاس‌های روزانه و ماهانه بررسی و در نظر گرفته شود.

## منابع

- ۱- اکبری، مهدی. آقایی، محمدمهدی. فرهنگ، حمید. تجربی، مسعود. (۱۳۹۵): ریزمقیاس نمودن محصول بارش ماهواره TRMM به کمک داده‌های ثبت شده زمینی و مدل رقوم ارتفاعی. اولین کنفرانس بین‌المللی آب، محیط‌زیست و توسعه پایدار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، ۶ تا ۸ مهر.
- ۲- علی بخشی، سیده مریم. فرید حسینی، علیرضا. داوری، کامران. علیزاده، امین. گاسچا، هنری مونیکا. (۱۳۹۵): مقایسه آماری بین محصولات IMERG و TMPA 3B42V7 در سطح سه داده‌های بارش GPM و TRMM (مطالعه موردی: حوضه آبریز کشف رود، استان خراسان رضوی). مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران، دوره ۶۹، شماره ۴.



۲- قرابگیلی، فریده. وظیفه دوست، مجید. بیرمرادیان، نادر. اشرف زاده، افشین. (۱۳۹۲): ریزمقیاس کردن داده‌های ماهواره‌ای بارندگی TRMM و مقایسه آن با داده‌های رادار هواشناسی داپلر در مناطق ساحلی دریای خزر. رساله دوره دکتری، دانشگاه گیلان، دانشکده علوم کشاورزی، گروه مهندسی آب (آبیاری و زهکشی).

- 4- Abdollahipour, Arman. Ahmadi, Hassan. Aminnejad, Babak. (2020): Evaluating The Hydrological Utility Of Satellite-Based Rainfall Products Using Neural Network Models Over The Ghare Ghieh River Basin, Iran. *Journal Of Water And Climate Change*.
- 5- Abdollahipour, Arman. Ahmadi, Hassan. Aminnejad, Babak. (2021): A Review Of Downscaling Methods Of Satellite-Based Precipitation Estimates, *Earth Science Informatics*: 1-20.
- 6- Abdollahipour, Arman. Ahmadi, Hassan. Aminnejad, Babak. (2021): Evaluating The Reconstruction Method Of Satellite-Based Monthly Precipitation Over Golestan Province, Northern Iran, *Acta Geophysica* 69, No. 6: 2305-2323.
- 7- Alexakis, D.D. Tsanis, I.K. (2016): Comparison Of Multiple Linear Regression And Artificial Neural Network Models For Downscaling TRMM Precipitation Products Using MODIS Data. *Environmental Earth Sciences*, 75(14), Pp.1-13.
- 8- Cheema, Muhammad Jehanzeb Masud. And Bastiaanssen, Wim GM. (2012): Local Calibration Of Remotely Sensed Rainfall From The TRMM Satellite For Different Periods And Spatial Scales In The Indus Basin. *International Journal Of Remote Sensing*, 33(8), Pp.2603-2627.
- 9- Chen, Cheng. Zhao, Shuhe. Duan, Zheng. Qin, Zhihao. (2015): An Improved Spatial Downscaling Procedure For TRMM 3B43 Precipitation Product Using Geographically Weighted Regression, *IEEE Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing*, 1939-1404.
- 10- Chen, Fengrui. Liu, Yu. Liu, Qiang. Li, Xi. (2014): Spatial Downscaling Of TRMM 3B43 Precipitation Considering Spatial Heterogeneity, Taylor & Francis, *International Journal Of Remote Sensing*, 35:9, 3074-3093.
- 11- Chen, Shaodan. Zhang, Liping. She, Dunxian. Chen, Jie. (2019). Spatial Downscaling Of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Annual And Monthly Precipitation Data Over The Middle And Lower Reaches Of The Yangtze River Basin, China. *Water*, 11(3), P.568.
- 12- Chen, Yuanyuan. Huang, Jingfeng. Sheng, Shaoxue. Mansaray, Lamin R. Liu, Zhixiong. Wu, Hongyan. Wang, Xiuzhen. (2018): A New Downscaling-Integration Framework For High-Resolution Monthly Precipitation Estimates: Combining Rain Gauge Observations, Satellite-Derived Precipitation Data And Geographical Ancillary Data. *Remote Sensing Of Environment*, 214, Pp.154-172.
- 13- Duan, Zheng. Bastiaanssen, W.G.M. (2013): First Results From Version 7 TRMM 3B43 Precipitation Product In Combination With A New Downscaling-Calibration Procedure, Elsevier, *Scencedirect, Remote Sensing Of Environment*, 131, 1-13.
- 14- Duan, Zheng. Liu, Junzhi. Tuo, Ye. Chiogna, Gabriele. Disse, Markus. (2016): Evaluation Of Eight High Spatial Resolution Gridded Precipitation Products In Adige Basin (Italy) At Multiple Temporal And Spatial Scales, Elsevier, *Scencedirect, Science Of The Total Environment*, 0048-9697.
- 15- Fang, Jian. Du, Juan. Xu, Wei. Shi, Peijun. Li, Man. Ming, Xiaodong. (2013): Spatial Downscaling Of TRMM Precipitation Data Based On The Orographical Effect And Meteorological Conditions In A Mountainous Area, Elsevier, *Scencedirect, Advances In Water Resources*, 61, 42-50.
- 16- Immerzeel, W.W. Rutten, M.M. Droogers, P. (2009): Spatial Downscaling Of TRMM Precipitation Using Vegetative Response On The Iberian Peninsula, Elsevier, *Scencedirect, Remote Sensing Of Environment*, 113, 362-370.

- 17- Jia, Shaofeng. Zhu, Wenbin. Lü, Aifeng. Yan, Tingting. (2011): A Statistical Spatial Downscaling Algorithm Of TRMM Precipitation Based On NDVI And DEM In The Qaidam Basin Of China, Elsevier, Sciencedirect, Remote Sensing Of Environment, 115, 3069–3079.
- 18- Jing, Wenlong. Yang, Yaping. Yue, Xiafang. Zhao, Xiaodan. (2016): A Spatial Downscaling Algorithm For Satellite-Based Precipitation Over The Tibetan Plateau Based On NDVI, DEM, And Land Surface Temperature, MDPI, Remote Sensing, 8, 655.
- 19- Liu, Jinping. Zhang, Wanchang. Nie, Ning. (2018): Spatial Downscaling Of TRMM Precipitation Data Using An Optimal Subset Regression Model With NDVI And Terrain Factors In The Yarlung Zangbo River Basin, China, Hindawi, Advances In Meteorology, Article ID 3491960, 13 Pages.
- 20- Ma, Ziqiang. Xu, Jintao. He, Kang. Han, Xiuzhen. Ji, Qingwen. Wang, Tsechun. Xiong, Wentao. Hong, Yang. (2020): An Updated Moving Window Algorithm For Hourly-Scale Satellite Precipitation Downscaling: A Case Study In The Southeast Coast Of China. Journal Of Hydrology, 581, P.124378.
- 21- Ma, Ziqiang. He, Kang. Tan, Xiao. Xu, Jintao. Fang, Weizhen. He, Yu. Hong, Yang. (2018): Comparisons Of Spatially Downscaling TMPA And IMERG Over The Tibetan Plateau. Remote Sensing, 10(12), P.1883.
- 22- Ma, Ziqiang. Shi, Zhou. Zhou, Yin. Xu, Junfeng. Yu, Wu. Yang, Yuanyuan. (2017): A Spatial Data Mining Algorithm For Downscaling TMPA 3B43 V7 Data Over The Qinghai Tibet Plateau With The Effects Of Systematic Anomalies Removed, Elsevier, Sciencedirect, Remote.
- 23- Sharifi, Ehsan. Saghafian, B. Steinacker, R. (2019): Downscaling Satellite Precipitation Estimates With Multiple Linear Regression, Artificial Neural Networks, And Spline Interpolation Techniques. Journal Of Geophysical Research: Atmospheres, 124(2), Pp.789-805.
- 24- Shi, Yuli. Song, Lei. Xia, Zhen. Lin, Yurong. B. Myneni, Ranga. Choi, Sungho. Wang, Lin. Ni, Xiliang. Lao, Cailian. Yang, Fengkai. (2015): Mapping Annual Precipitation Across Mainland China In The Period 2001–2010 From TRMM3B43 Product Using Spatial Downscaling Approach, MDPI, Remote Sensing, 7, 5849-5878.
- 25- Xu, Shiguang. Wu, Chaoyang. Wang, Li. Gonsamo, Alemu. Shen, Yan. Niu, Zheng. (2015): A New Satellite-Based Monthly Precipitation Downscaling Algorithm With Non-Stationary Relationship Between Precipitation And Land Surface Characteristics, Elsevier, Sciencedirect, Remote Sensing Of Environment, 162, 119–140.
- 26- Zhan, Chesheng. Han, Jian. Hu, Shi. Liu, Liangmeizi. Dong, Yuxuan. (2018): Spatial Downscaling Of GPM Annual And Monthly Precipitation Using Regression-Based Algorithms In A Mountainous Area, Hindawi, Advances In Meteorology, Volume 2018, Article ID 1506017, 13 Pages.
- 27- Zhang, Yueyuan. Li, Yungang. Ji, Xuan. Luo, Xian. Li, Xue. (2018): Fine-Resolution Precipitation Mapping In A Mountainous Watershed: Geostatistical Downscaling Of TRMM Products Based On Environmental Variables, MDPI, Remote Sensing, 10, 119.
- 28- Zhao, Na. (2021): An Efficient Downscaling Scheme For High-Resolution Precipitation Estimates Over A High Mountainous Watershed, Remote Sensing, 13(2), P.234.
- 29- Zhao, Xiaodan. Jing, Wenlong. Zhang, Pengyan. (2017): Mapping Fine Spatial Resolution Precipitation From TRMM Precipitation Datasets Using An Ensemble Learning Method And MODIS Optical Products In China, MDPI, Sustainability, 9, 1912.