



ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بارندگی ماهواره‌ای TRMM برپایه روابط نایستا بین بارندگی و ویژگی‌های سطح زمین

بهاره زنجانی^۱، حسام سیدکابلی^{۲*}، محسن رشیدیان^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

۲. استادیار گروه عمران آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

۳. مربی گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

مشخصات مقاله

پیشینه مقاله:

دریافت: ۲۲ بهمن ۱۳۹۷

پذیرش: ۸ تیر ۱۳۹۸

دسترسی اینترنتی: ۲۰ مرداد ۱۳۹۸

واژه‌های کلیدی:

بارش ماهواره‌ای

رگرسیون وزنی جغرافیایی

حوزه رودخانه دز

دمای سطح زمین

پوشش گیاهی

چکیده

داده‌های بارش ماهواره‌ای به صورت گسترده جهت تخمین بارش بخصوص در مناطقی که پراکنش ایستگاه‌های باران‌سنجی نامناسب و ناکافی هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این وجود، وضوح مکانی کم این نوع داده‌ها، کاربرد آن‌ها را با محدودیت‌هایی در مطالعات هیدرولوژیکی حوزه‌های آبریز و در مقیاس منطقه‌ای مواجه کرده است. بنابراین حفظ دقت برآورد بارش توسط ماهواره‌ها و دستیابی به مقیاس مکانی مناسب در مطالعات هیدرولوژیکی هدف اصلی این مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق روش رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) برای ریزمقیاس‌نمایی مکانی داده‌های بارندگی ماهواره‌ای تی آر ام ام (TRMM-3B42V7) در سال آبی ۹۰-۸۹ برای حوزه آبریز سد دز واقع در جنوب غرب ایران مورد ارزیابی قرار گرفت. ریزمقیاس‌نمایی با ایجاد روابط نایستا بین بارش TRMM و ویژگی‌های به دست آمده از مدل ارتفاع رقومی (DEM)، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، شاخص گیاهی بهبود یافته (EVI) و دمای سطح زمین (LST) انجام شد. نتایج نشان می‌دهند که داده‌های بارش ریزمقیاس شده در مقیاس مکانی ۱ کیلومتر به طور معنی‌داری تفکیک مکانی را بهبود داده و با داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های باران‌سنجی از تطابق خوبی برخوردارند. به طوری که برای بارش تجمعی ۱۶ روزه، مقادیر آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) به ترتیب برابر با ۲۲/۷ و ۷/۴۵ میلی‌متر هستند. با این وجود میزان دقت مدل در مکان‌ها مختلف متفاوت بوده و به شرایط پوشش گیاهی وابستگی زیادی دارد.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: hkabolli@jsu.ac.ir

مقدمه

دهد اما تحقیقات هیدرولوژیک برپایه داده‌های گذشته اهمیت زیرمقیاس کردن داده‌های ثبت‌شده توسط ماهواره‌ها در دهه‌های گذشته را دوچندان می‌کند.

تعداد زیادی از داده‌های سنسج‌ازدور حاوی اطلاعاتی در مورد ویژگی‌های سطح زمین مانند: شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، شاخص سطح برگ (LAI)، نسبت جذب تابش فعال فتوسنتزی (FARPAR)، دمای سطح زمین (LST) و ارتفاع هستند که این ویژگی‌ها با بارندگی در ارتباط بوده و رابطه معنی‌داری بین این متغیرها و بارندگی وجود دارد. از آنجائی که این ویژگی‌ها با قدرت تفکیک مکانی بالاتری (۳۰ متر-۵۰ کیلومتر) در دسترس بوده و بر وقوع و حجم بارندگی از طریق مکانیسم دینامیکی و حرارتی تأثیرگذار هستند (۲۹ و ۳۰). بنابراین از ویژگی‌های سطح زمین می‌توان برای ریزمقیاس کردن داده‌های بارندگی ماهواره‌ای استفاده کرد. مفاهیم ریزمقیاس نمایی داده‌های اقلیمی در مطالعات متعددی از جمله هویتسون و کرین (۱۲)، ویلی و ویگلی (۳۱)، زو (۳۹) و زوریتا و ووناستورچ (۴۰) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این جهت به دست آوردن متغیرهایی مانند: LST (۴، ۲۳، ۳۳ و ۳۴) و رطوبت خاک (۲۶ و ۲۹) در قدرت تفکیک بالا نیز از روش‌های ریزمقیاس نمایی استفاده شده است. ایمرزیل و همکاران (۱۷) رابطه بین بارندگی و پوشش گیاهی را در مقیاس‌های مختلف مکانی موردبررسی قرار دادند و الگوریتمی به‌منظور ریزمقیاس کردن داده‌های بارندگی ماهواره‌ای با استفاده از تابع‌نمایی بین بارندگی و NDVI توسعه دادند. آن‌ها با استفاده از این الگوریتم داده‌های سالانه بارندگی ماهواره TRMM (TRMM3B43) را از قدرت تفکیک ۲۵ کیلومتری به مقیاس ۱ کیلومتری ارتقاء دادند. برپایه این فرضیات، با تعریف توپوگرافی و ایجاد رگرسیون بین بارندگی و توپوگرافی توانستند قدرت تفکیک بارندگی راداری را از ۱۶ کیلومتر به ۴ کیلومتر، ارتقا ببخشند. سپس جیا و همکاران (۱۸) با استفاده از یک مدل رگرسیون خطی چندگانه برپایه دو متغیر مدل ارتفاع رقومی (DEM) و NDVI، قدرت تفکیک مکانی داده‌های بارندگی TRMM3B43 را از ۲۵

بارندگی نقش مهمی در تغییرات هیدرولوژیکی و اکولوژی مناطق مختلف دارد و بسیاری از فرآیندهای سطح زمین توسط بارندگی کنترل می‌شود. در نتیجه در دسترس بودن داده‌های بارندگی یکی از عوامل مهم و کلیدی در مدل‌سازی و برنامه‌ریزی منابع آب در مقیاس یک حوزه آبریز است. اما کسب اطلاعات دقیق از میزان پراکندگی و شدت بارش در مناطق مختلف از جمله کوهستان‌ها یا مناطقی که در آن باران‌سنگ‌ها به‌صورت پراکنده نصب‌شده‌اند، کاری دشوار است. بنابراین دستیابی به نقشه‌های مکانی-زمانی بارش با دقت مناسب یک چالش بزرگ محسوب می‌شود. در دهه‌های اخیر به دلیل توسعه فناوری و فناوری ماهواره‌ها، اطلاعات جامعی را می‌توان از میزان پراکندگی باران در مناطق مختلف به دست آورد. توسعه ماهواره‌های پیشرفته هواسنجی، سنسج‌ازدور را به ابزاری قدرتمند در تخمین بارندگی در مناطق فاقد شبکه باران‌سنگ تبدیل کرده است (۱۱، ۲۵، ۲۶ و ۲۷). بسیاری از مؤسسات تحقیقاتی و سازمان‌های دولتی، یک سری داده بارندگی را در دو مقیاس محلی و جهانی بر اساس سنسج ماهواره‌ای مانند پروژه بارش اقلیم جهانی (GPCP Global; Precipitation Climatology Project) (۱۳ و ۱۴)، نقشه بارش ماهواره جهانی (Global Satellite Mapping of Precipitation-GSMaP) (۱۸) و سنسج بارش گرمسیری (Tropical Rainfall Measuring Mission-TRMM) (۲، ۱۵، ۲۰ و ۲۱) ارائه کردند. اگرچه این داده‌های بارندگی به‌دست‌آمده از ماهواره‌ها باعث شده‌اند قدرت تفکیک مکانی بهتری از بارش در مناطق بدون باران‌سنگ تخمین زده شوند اما قدرت تفکیک مکانی آن‌ها (۰/۲۵ تا ۰/۵ درجه) به‌منظور بررسی تغییرات بارش در یک حوزه آبریز بسیار بزرگ است. آنچه مسلم است چنین مقیاس مکانی برای بررسی دقیق میزان بارندگی غیرکاربردی بوده و چنین داده‌هایی باید با توجه به عوامل تأثیرگذار دیگر بر میزان بارش در مقیاس‌های ریزتر بررسی گردد. البته امروزه توسعه دانش فنی در ساخت سنسجده‌های دقیق توانسته دقت برآوردهای مکانی را افزایش

کیلومتر به ۱ کیلومتر در حوزه قایدام چین ارتقا بخشیدند. دووان و باستیانسن (۸) نیز با معرفی روش‌های کالیبراسیون تحلیل‌های مختلف جغرافیایی (GDA) و تحلیل‌های نسبی جغرافیایی (GRA)، یک الگوریتم ریزمقیاس‌نمایی را برای داده‌های بارندگی TRMM3B43 بهبود بخشیدند و خطاهای داده بارندگی ریزمقیاس شده را کاهش دادند. این مطالعات نشان می‌دهند که در نظر گرفتن عوامل مختلف زیست‌محیطی منجر به افزایش دقت داده‌های خروجی می‌گردد (۵، ۶، ۹ و ۱۷). باین‌وجود فرض بر وجود رابطه ثابت بین ویژگی‌های زیست‌محیطی و بارندگی در این مطالعات بیانگر آن است که این روابط به‌خوبی قادر به نشان دادن اثرگذاری عوامل مختلف بر میزان بارندگی نیستند و بهتر است از روشی به‌منظور نشان دادن اثرگذاری مکانی متغیرها بر میزان بارش استفاده شود. برونسندن و همکاران (۵) با معرفی الگوریتم رگرسیون وزنی جغرافیایی (Geographically Weighted Regression-GWR) توانستند به بهبود روابط نایستای مکانی در بسیاری از زمینه‌های مختلف کمک کنند. به‌عنوان نمونه، ژائو و همکاران (۳۸) با استفاده از رگرسیون وزنی جغرافیایی به بررسی روابط متغیر مکانی بین NDVI و عوامل آب‌وهوایی (بارندگی سالانه و متوسط دمای سالانه) پرداختند و اثبات کردند که برای بیان مسائل متغیر مکانی اکولوژی این روش رگرسیون محلی عملی و کارآمد است. چن و همکاران (۷) نیز از روش رگرسیون وزنی جغرافیایی برای ریزمقیاس کردن بارندگی سالانه در شمال چین استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که روش رگرسیون وزنی جغرافیایی می‌تواند برازش بهتری بین NDVI، DEM و TRMM، نسبت به روش رگرسیون خطی چندگانه ایجاد کند و دقت باران‌های ریزمقیاس شده (تغییر ضریب تعیین (R^2) از ۰/۸ به ۰/۸۲ و میانگین جذر مربعات خطا (RMSE) از ۱۲۵/۴ به ۹۱ میلی‌متر در سال ۲۰۰۱) در مقایسه با ۴۹ ایستگاه اندازه‌گیری باران‌سنج، افزایش یافته است. کوچک‌مقیاس کردن محصولات بارش TRMM با استفاده از ویژگی‌های مختلف سطح زمین به‌ویژه تغییرات پوشش گیاهی (۳۵)، تغییرات ارتفاعی (۱۷) و دمای سطح زمین (۱۹) به دلیل وجود

همبستگی خوب با بارش بخصوص برای بارش‌های تجمعی ماهانه و سالانه (۲۴) مناسب است. همچنین موقعیت مکانی مانند مناطق کوهپایه‌ای (۳۹) و زمان ثبت بارندگی مانند فصل رشد (۳۶) می‌تواند در نوع روش ریزمقیاس‌نمایی مورد استفاده و میزان خطاها مؤثر باشد. باین‌وجود لی و همکاران (۲۴) و زهانگ و همکاران (۳۷) با استفاده از روش‌های رگرسیون وزنی جغرافیایی برای داده‌های بارش ماهانه TRMM ریزمقیاس شده ۱ کیلومتری میزان میانگین جذر مربعات خطا (RMSE) را به ترتیب ۲۵ و ۲۲/۲ میلی‌متر و میانگین مطلق خطا (MAE) را ۱۶ و ۱۳/۵ میلی‌متر گزارش کردند. در تحقیقات پیشین ریزمقیاس‌نمایی بارندگی مبتنی بر رگرسیون وزنی جغرافیایی دو نکته وجود دارد. اولین موضوع محدود بودن تعداد متغیرها (NDVI و DEM) است که باعث شده رابطه بین بارندگی TRMM و DEM در مناطق خاصی اهمیت خود را از دست بدهد. دومین نکته مقیاس زمانی داده‌های ریزمقیاس شده است، بدین‌صورت که بیشتر مطالعات پیشین بر مقیاس سالانه تمرکز داشتند و تعداد کمی از آن‌ها بر ریزمقیاس‌نمایی بارندگی TRMM در مقیاس‌های ماهانه و حتی ریزتر توجه کردند (۱۰).

در این مطالعه منطقه بالادست سد دز به دلیل دارا بودن شرایط توپوگرافی، پوشش گیاهی مرتعی و آب‌وهوای نیمه‌خشک مورد مطالعه قرار گرفت و از رگرسیون وزنی جغرافیایی با در نظر گرفتن ویژگی‌های سطح زمین ریزمقیاس‌نمایی تصاویر بارش TRMM 3B42V7 و تولید داده‌های رستری بارش با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتری و زمانی ۱۶ روزه استفاده شده است. متغیرهای مستقل مورد استفاده شامل NDVI، DEM، شاخص گیاهی بهبودیافته (EVI)، شیب (Slop)، جهت شیب (Aspect)، انحناء (Curvature) و دمای سطح زمین LST هستند. درنهایت مجموعه داده‌های بارندگی ریزمقیاس شده با مشاهدات زمینی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های باران‌سنجی، اعتبارسنجی می‌شوند.

روش تحقیق

رگرسیون وزنی جغرافیایی

رگرسیون وزنی جغرافیایی روشی است که به منظور برآورد ویژگی های نایستا و وابسته به مقیاس موجود در رابطه بین متغیرهای وابسته و کمکی استفاده می شود. در رگرسیون خطی چندگانه، این گونه تصور می شود که رابطه بین متغیر وابسته Y و متغیرهای کمکی $X_i (i=1,2,\dots,p)$ در کل فضا ثابت است و تمامی ضرایب نیز از نظر مکانی پایدار و ثابت هستند؛ اما در روش رگرسیون وزنی جغرافیایی تلاش بر متمایز بودن رابطه بین متغیر وابسته و متغیرهای کمکی از نظر مکانی بوده است که این امر با اضافه نمودن اطلاعات مکانی به روند رگرسیون امکان پذیر است. در نهایت این مدل رگرسیون بصورت زیر تعریف می شود (۲۶).

$$Y_j = \sum_{i=1}^p \beta_i (u_j, v_j) X_{ij} + \varepsilon_j \quad [1]$$

در این رابطه؛ (u_j, v_j) معادل شیب برآورد شده در نقطه j ام؛ j همان باقی مانده رگرسیون در نقطه j ام و در نهایت (u_j, v_j) برابر مختصات نقطه j ام در فضا است. برخلاف روش های رگرسیون های گذشته، ضرایب موجود در رابطه ۱ از طریق مشاهدات موجود در اطراف نقطه j برآورد می شوند که این برآورد از طریق وزن دهی و با استفاده از تابع فاصله به دست می آید. بدین صورت که مشاهدات نزدیک تر به نقطه j اثر بیشتری بر ضرایب محلی برای این مکان دارند. در نتیجه مشاهدات نزدیک تر به نقطه j وزن بیشتری را نسبت به مشاهدات دورتر به خود اختصاص می دهند. مدل های رگرسیون وزنی جغرافیایی وابسته به دو پارامتر مهم هستند. پارامتر اول تابع کرنل بوده که از آن برای به دست آوردن ماتریس وزنی استفاده می شود. دیگر پارامتر مهم برای ایجاد مدل GWR، معیار انتخاب است که این معیار تعیین کننده پهنای باند است. در این پژوهش از تابع گاوسی دو مربعی تطبیقی به عنوان تابع کرنل و معیار آکائیک (AIC_c) به عنوان معیار انتخاب استفاده شد (۲۸). تابع گاوسی دو مربعی تطبیقی

به صورت زیر تعریف می شود.

$$W_{ij} = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d_{ij}}{\theta_{i(k)}} \right)^2 & \rightarrow d_{ij} < \theta_{i(k)} \\ 0 & \rightarrow d_{ij} \geq \theta_{i(k)} \end{cases} \quad [2]$$

که در آن i نشان دهنده نقطه رگرسیون؛ j نشان دهنده موقعیت است؛ W_{ij} برابر مقدار وزن مشاهدات در موقعیت j برای تخمین ضریب در موقعیت i ، d_{ij} فاصله اقلیدسی بین i و j و $i(k)$ اندازه پهنای باند تطبیقی که به صورت k امین فاصله نزدیک تعریف می شود. پهنای باند تطبیقی باعث می شود تا شعاع همسایگی در تراکم کم بیشتر شده تا نقاط بیشتری در فرایند واسنجی شرکت کنند. شاخص AIC_c به صورت رابطه زیر تعریف می شود، که حداقل سازی این شاخص منجر به تعیین میزان پهنای باند بهینه خواهد شد.

[۳]

$$AIC_c = -2 \log[\sum_{i=1}^n L(y_i)] + 2q + 2q(q+1)/(n-q-q)$$

در این رابطه؛ L مقدار تابع درستنمایی برای مقادیر Y_i ، q تعداد پارامترهای برآورد شده برای مدل و n تعداد کل نمونه ها است. حداقل مقدار AIC_c بیانگر نقطه توازن میان نکویی برازش و تعداد پارامترهای برآورده شده است (۲۸).

الگوریتم ریزمقیاس نمایی

الگوریتم ریزمقیاس نمایی استفاده شده در این پژوهش، بر اساس مطالعات ایمرزبل و همکاران (۱۷)، جیا و همکاران (۱۸) بوده و برخلاف الگوریتم های ریزمقیاس قبلی به کارگیری شده بر دو فرض اساسی استوار است. فرض اول اینکه بارندگی با متغیرهای کمکی دارای رابطه مکانی بوده و این رابطه در مکان ثابت نیست. دومین فرض این است که مدل های رگرسیون وزنی جغرافیایی قادر به تشریح رابطه متغیر موجود بین بارندگی و دیگر عوامل هستند و از مدل های رگرسیون وزنی جغرافیایی ایجاد شده در قدرت تفکیک مکانی بزرگ تر می توان جهت پیش بینی بارندگی در قدرت تفکیک

جهت حذف فعالیت‌های انسانی و طبیعی به منظور ایجاد رابطه بین بارندگی و پوشش گیاهی، ایجاد شده است. یکی از تفاوت‌های موجود بین دو شاخص پوشش گیاهی مورد استفاده وجود مناطق برفی است که منجر به کاهش NDVI و درعین حال باعث افزایش EVI خواهند شد. در گام سوم پیکسل‌های آب و برف با مقدار آستانه $NDVI < 0$ شناخته شده و از مجموعه داده حذف می‌گردند. از طرفی وجود مناطق زراعی و اثرات انسانی همانند ساختمان‌ها و جاده‌ها باعث افزایش و یا کاهش مقدار NDVI نسبت به محیط‌های اطراف خود می‌شوند. در مرحله چهارم با استفاده از عملگر فیلتر پایین گذر بیرون‌زدگی از NDVI ناشی از عوامل انسانی شناسایی و از تصاویر حذف می‌شود. به منظور یافتن بهترین اندازه فیلتر، عملگر فیلتر پایین گذر به ازای اندازه‌های مختلف 3×3 تا 9×9 بر NDVI اعمال می‌شود. سپس براساس مقدار حد آستانه بیرون‌زدگی ($2/968$) و بیشترین مقدار اختلاف یک پیکسل کنترلی (پیکسلی که در آن عملیات انسانی صورت گرفته) در اندازه فیلترهای مختلف نسبت به میانگین، بهترین اندازه فیلتر انتخاب می‌شود، که در این مطالعه اندازه 6×6 تعیین گردید. پس از تعیین اندازه فیلتر مناسب، با اعمال حد آستانه $2/968$ محدوده موردنظر به دست آمده و خارج از این محدوده به عنوان بیرون‌زدگی پوشش گیاهی شناسایی می‌شود. در نهایت بیرون‌زدگی‌های ایجاد شده از داده‌های NDVI در کنار یکدیگر قرار گرفتند تا مجدداً یک تصویر واحد از تمامی بیرون‌زدگی ایجاد شود و از این تصویر برای جداسازی و شناسایی بیرون‌زدگی در EVI نیز استفاده می‌گردد. جزئیات بیشتر این روش در مطالعات چن و همکاران (۶ و ۷) ارائه شده است.

در مرحله پنجم داده‌های بازسازی شده در مقیاس مکانی ۱ کیلومتر به قدرت تفکیک ۲۵ کیلومتری بزرگ مقیاس می‌شوند. سپس در گام ششم به منظور انتخاب بهترین پهنای باند مناسب، مدل‌های رگرسیون وزنی جغرافیایی برپایه داده‌ها با مقیاس ۲۵ کیلومتر ساخته می‌شود و همبستگی بین داده‌های کمکی و داده اصلی (بارندگی) در قدرت تفکیک مکانی ۲۵ کیلومتری موردبررسی قرار خواهد گرفت. در این مرحله

مکانی ریزتر استفاده نمود. با استناد به این دو فرض رابطه ۱ با در نظر گرفتن ۷ متغیر مستقل شامل NDVI، DEM، EVI، Slope، Aspect، Curvature و LST به صورت زیر بازنویسی شد.

$$P_{est} = a \times NDVI + b \times EVI + c \times DEM + d \times LST + f \times Aspect + g \times Slope + h \times Curvature + \varepsilon \quad [4]$$

در این رابطه؛ a, b, c, d, f, g, h پارامترهای ثابت رابطه و P_{est} مقدار بارش تخمینی توسط مدل است. الگوریتم ریزمقیاس معرفی شده در ۹ مرحله برپایه روش GWR پیاده‌سازی می‌شود. در گام اول منطقه موردنظر از لحاظ تغییرات پوشش گیاهی به منظور شناسایی مناطق با تغییرپذیری بالا نسبت به میزان بارندگی موردبررسی قرار می‌گیرد؛ پاسخ پوشش گیاهی به بارندگی در شرایط خشک، نیمه خشک و نیمه شرجی سریع است (۱). بنابراین از شاخص‌های NDVI و EVI به عنوان شاخص‌هایی برای نشان دادن پویایی زمانی-مکانی بارندگی استفاده می‌شود. روابط NDVI و EVI به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad [5]$$

$$EVI = 2.5 \times (NIR - R) / (NIR + R - 7.5 \times B + 1) \quad [6]$$

در این رابطه‌ها؛ R باند قرمز، NIR باند فروسرخ و B باند آبی هستند. در مرحله دوم داده‌های ارتفاعی، LST و بارندگی TRMM برای محدوده شناسایی شده در گام اول استخراج می‌گردد. توپوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت شیب و انحناء) و LST دارای رابطه معنی‌داری با بارش هستند. رشد پوشش گیاهی اغلب متأثر از LST (۳) و بارندگی بوده، بنابراین اضافه کردن LST در روند ریزمقیاس نمایی باعث ارتقا در فهم تعامل پیچیده بین NDVI و بارندگی به ویژه در مقیاس روزانه و ماهانه می‌شود که انتظار می‌رود، نتایج ریزمقیاس نمایی مکانی واقعی‌تری به دست آید.

به علت ویژگی‌های پیچیده سطح زمین، دو گام بعدی

در ریزمقیاس کردن داده های TRMM در مقیاس ۱ کیلومتر بررسی می شود. بدین منظور با استفاده از بارش های ثبت شده در ایستگاه های باران سنجی منطقه مورد مطالعه و مقدار بارش های ریزمقیاس شده ۱ کیلومتری در محل ایستگاه، دو شاخص خطای مطلق میانگین (MAE) و میانگین خطای جذر مربعات (RMSE) محاسبه گردید.

$$MAE = \sum_{k=1}^n |Y_k - O_k| / n \quad [V]$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{k=1}^n (Y_k - O_k)^2 / n} \quad [A]$$

در این رابطه ها؛ Y_k برابر مشاهدات زمینی ایستگاه k و O_k برابر بارندگی تخمین زده شده در موقعیت باران سنج k و n برابر میانگین تمامی بارندگی های مشاهداتی و \bar{O} معادل میانگین تمام بارندگی های تخمین زده شده است.

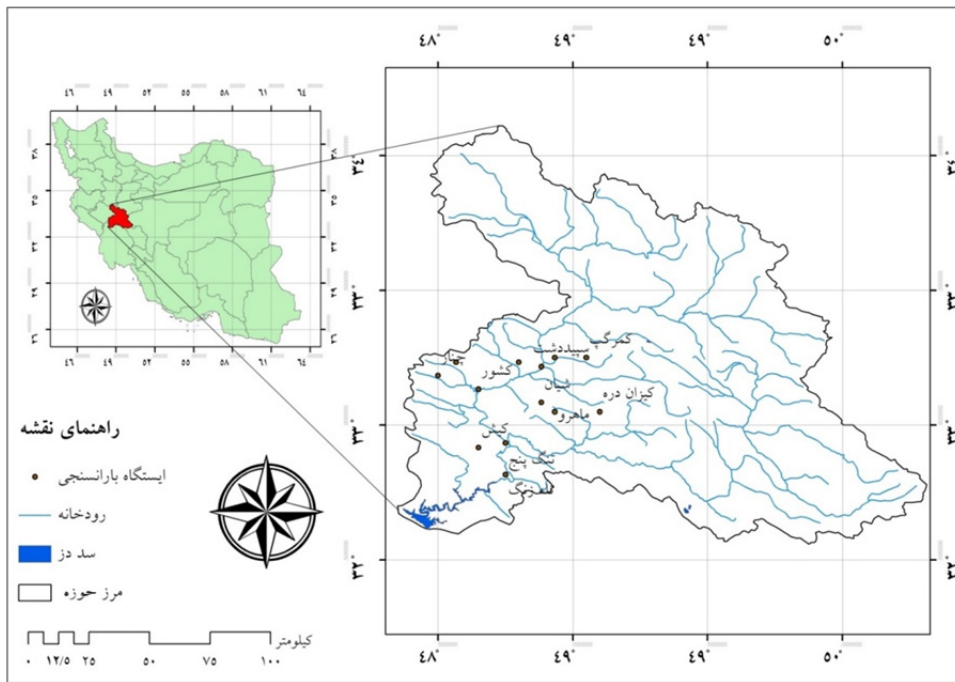
منطقه مورد مطالعه

منطقه بالادست حوزه آبریز سد دز واقع در جنوب غرب ایران به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. این سد در شمال استان خوزستان و در فاصله ۲۳ کیلومتری شمال غربی اندیمشک واقع شده است. این سد اراضی پایین دست را آبیاری می نماید و نقش مهمی در کنترل سیلاب های بالادست خود دارد. حوزه آبریز رودخانه دز به عنوان یک حوزه درجه سه، زیرمجموعه ای از حوزه کارون بزرگ محسوب می شود. این منطقه در بین عرض جغرافیایی $57^{\circ} 32'$ تا $11^{\circ} 33'$ و طول جغرافیایی $29^{\circ} 48'$ تا $08^{\circ} 49'$ قرار دارد (شکل ۱) که ارتفاع از سطح دریا این منطقه محدوده ای از $1127/76$ - $1554/48$ متر است. میانگین میزان بارش سالانه در این منطقه حدود 357 میلی متر است که اغلب این بارش ها در ماه های آذر تا اردیبهشت اتفاق می افتد که بخش زیادی از مزارع کشاورزی در این منطقه به دلیل کشت دیم به میزان بارندگی وابسته است.

مدل های رگرسیون براساس متغیرهای کمکی برای هر پیکسل با تفکیک مکانی ۱ کیلومتری به همراه پهنای باند محاسبه شده در گام قبلی ساخته می شوند و میزان بارش با قدرت تفکیک ۱ کیلومتری (به نام P_{IKM}) برآورد می گردد. سپس در گام هشتم مقدار بارش P_{IKM} پیکسل های حذف شده در گام های سوم و چهارم از طریق درون یابی P_{IKM} ایجاد شده در گام قبل و با استفاده از عملگر درون یابی اسپلین، تخمین زده می شود. در نهایت در گام نهم مقدار باقی مانده مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی که همان مقدار بارندگی در پیکسل های حذف شده در مرحله شناسایی سطوح آبی و اثرات انسانی است، بایستی به مقدار بارش P_{IKM} به دست آمده از روش GWR اضافه شود (۱۷). مقدار باقی مانده ها در اصل همان بارندگی هایی است که با استفاده از متغیرهای کمکی قابل برآورد نیست و اصلاح مقدار بارندگی با استفاده از مقدار باقی مانده به دست آمده یک گام ضروری برای روند ریزمقیاس نمایی است (۸، ۱۷ و ۱۸). از اختلاف میزان بارندگی TRMM و میزان بارش محاسبه شده از روش GWR اعمال شده بر روی داده های بزرگ مقیاس (۲۵ کیلومتری) به منظور برآورد میزان باقی مانده استفاده می شود. در نهایت چنین میزان باقی مانده بزرگ مقیاس نیز با استفاده از درون یابی خطی به مقیاس ۱ کیلومتری ریزمقیاس شده و به مقدار بارش محاسبه شده ریزمقیاس شده ۱ کیلومتری اضافه می شوند.

اعتبارسنجی

حفظ و یا ایجاد کمترین تغییر در الگوهای اطلاعاتی موجود در تصاویر ورودی از ضرورت اصلی تمام ریزمقیاس نمایی است. اعتبارسنجی روش در دو مرحله صورت می گیرد: مرحله اول بررسی صحت مدل GWR در مقیاس ۲۵ کیلومتری است که براساس میزان ضریب همبستگی و ضریب تعیین بین مقادیر بارش TRMM و خروجی مدل GWR در کل دوره موردنظر انجام می گیرد. در مرحله بعدی صحت مدل GWR



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در بالادست سد دز

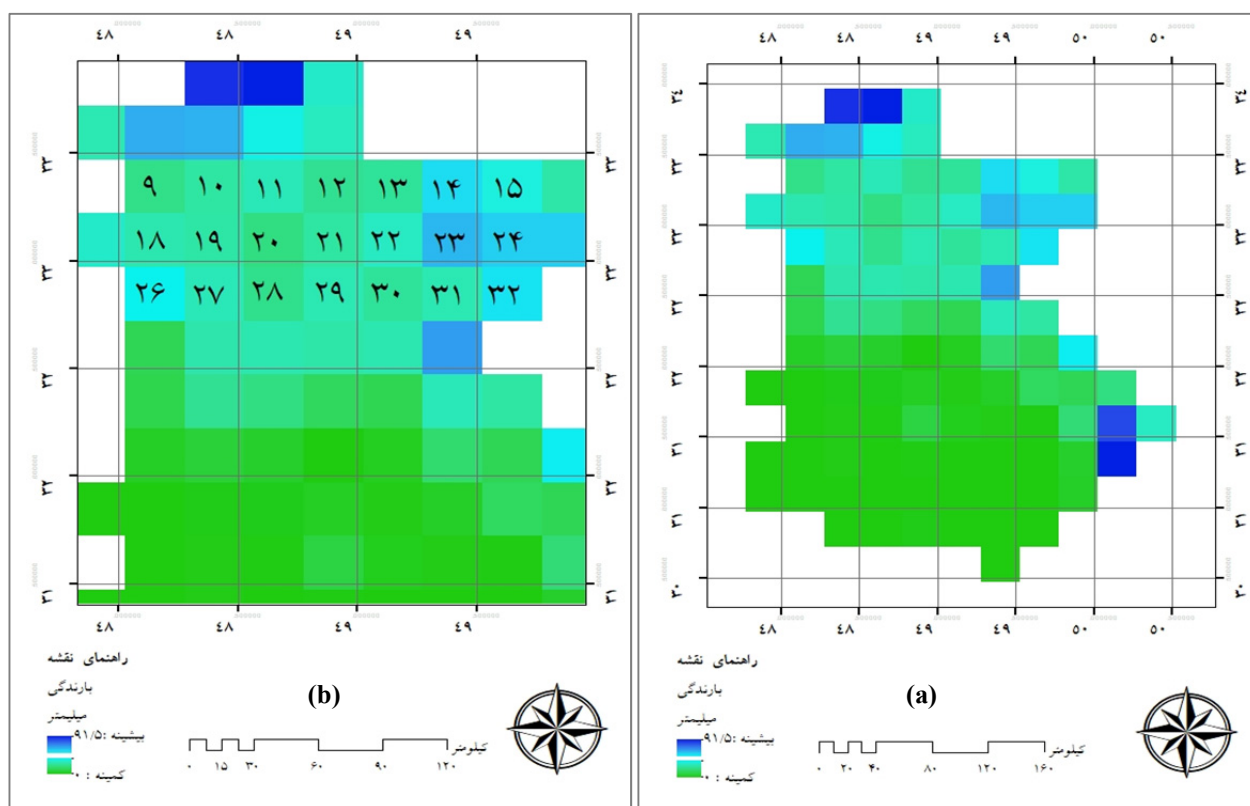
همچنین سایر داده‌ها نیز در این بازه زمانی (۱۲ آذرماه ۱۳۸۹ تا ۱۹ خرداد ۱۳۹۰) استخراج و در مدل‌سازی GWR مورداستفاده قرار گرفتند. به دلیل توپوگرافی پیچیده این منطقه، شبکه‌های باران‌سنج به صورت پراکنده قرار دارند که توزیع آن در منطقه مورد مطالعاتی شکل ۱ ارائه شده است. در این منطقه با لحاظ محدودیت‌های ذکر شده ۱۳ ایستگاه باران‌سنجی جهت صحت‌سنجی خروجی مدل GWR در نظر گرفته شد.

داده‌های بارندگی ماهواره TRMM از سری 3B42V7 برای محدود مکانی و زمانی مشابه داده‌های مشاهداتی زمینی دریافت شده است. داده بارندگی مربوط به 3B42V7 داده‌های با پردازش سطح سوم هستند، در نتیجه این نوع داده‌ها نیازی به اصلاحات اولیه‌ای شامل: تصحیحات هندسی و رادیومتریکی ندارد، در واقع این سری از داده‌ها به‌عنوان محصولات TRMM بشمار می‌آیند (۱۶). مقیاس زمانی این نوع از داده‌ها روزانه بوده و دارای مرجع WGS84 همراه با وضوح مکانی ۲۵ کیلومتری است (۲۲). از آنجائی که یکی از مهم‌ترین عوامل در مدل ریزمقیاس میزان پاسخ پوشش گیاهی به تغییرات بارندگی است و مقیاس روزانه برای مدل‌سازی آن با خطای زیادی

داده‌های موردنیاز در این تحقیق شامل داده‌های باران‌سنجی، داده‌های بارش ماهواره‌ای NDVI، TRMM، DEM و LST هستند. مشاهدات زمینی مورداستفاده در این پژوهش از سازمان مدیریت منابع آب ایران برای سال‌های آبی مختلف در ایستگاه‌های بالادست سد دز دریافت شد. برای انتخاب سال آبی دو موضوع بایستی در نظر گرفته شود: اول اینکه سال آبی بایستی جزو سال‌های پربارش بوده، و دوم اینکه در این سال بارش‌های سراسری در سطح حوزه اتفاق افتاده باشد. از طرفی نیاز به داده‌های بارندگی در سال‌های گذشته برای مدل‌سازی صحیح هیدرولوژیک حوزه آبریز و برآورد رواناب ورودی به سد مخزنی دز مشهود و حائز اهمیت است. همچنین تمامی مدل‌های هیدرولوژیک از روش‌های درون‌یابی برای تهیه نقشه‌های بارش استفاده می‌کنند، که همواره باعث عدم قطعیت‌های فراوان بخصوص در برآورد حجم بارش خواهد بود. بنابراین با توجه به هدف اصلی این تحقیق که کمک به بهبود مدل‌سازی هیدرولوژیک با ایجاد نقشه‌های مکانی-زمانی بارش با قدرت تفکیک مناسب است، این روش ریزمقیاس برای سال آبی ۸۹-۹۰ مورد ارزیابی قرار گرفت.

وابسته به بارندگی است و انتظار می رود با توجه به حجم بارندگی قابل توجه در این منطقه مقادیر NDVI زیاد باشد، که این خود دلیلی بر وجود رابطه مثبت بین بارندگی و NDVI و بارندگی و EVI است. داده های پوشش گیاهی مورد استفاده در این پژوهش نسخه ۶ سری MOD13Q1 از ماهواره ترا سنجنده مودیس با قدرت تفکیک زمانی ۱۶ روزه همراه با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متری در بازه مورد نظر از سایت <http://modis-Land.gsfc.nasa.gov/vi.html> استخراج شدند.

روبوست. لی وهمکاران (۲۴) بر روی ریز مقیاس کردن بارش های TRMM ماهانه و سالانه در مقیاس ۱ کیلومتری به مطالعه پرداخته اند. از این رو در این تحقیق، مقیاس زمانی ۱۶ روزه در نظر گرفته شد و متغیر مستقل در روش GWR بارش TRMM تجمعی ۱۶ روزه است. نمونه ای از داده های بارندگی دوره اول (۱۶ روزه) در بازه زمانی مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است. پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه اغلب مرتعی و کشت دیم است. بنابراین رشد پوشش گیاهی سبز آن



شکل ۲. نمونه ای از داده 3B42V7 در بازه ۱۶ روزه: (a) استان لرستان و خوزستان؛ (b) پیکسل های واقع شده در منطقه مورد مطالعه اثرات توپوگرافی بر الگوهای بارندگی را می توان با استفاده از داده DEM بررسی کرد.

سنجنده مودیس نسخه شش از MOD11A2 و از سایت Modis استخراج شد. این داده ها دارای قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتری و قدرت تفکیک زمانی هشت روزه است که به صورت تجمعی به داده های شانزده روزه تبدیل شدند.

این داده از سایت <http://srtm.csi.cgiar.org> با قدرت تفکیک هر سه ثانیه انحنای (تقریباً ۹۰ متر) استخراج گردید. در این پژوهش داده DEM به قدرت تفکیک ۱ کیلومتری به منظور تطابق مقیاس مکانی با داده NDVI بزرگ مقیاس شد (۱۶). سپس متغیرهای شیب، جهت شیب و انحنای داده DEM استخراج می شوند. داده های LST نیز در بازه زمانی مورد نظر از

نتایج و بحث

سطح زمین دارای رابطه مثبتی است لذا برای درک بهتر روند تغییرات پوشش گیاهی و چگونگی رابطه با دمای سطح زمین و بارندگی مقادیر این پارامترها برای طول بازه زمانی مورد بررسی در شکل ۳ رسم شد. البته مقادیر متفاوت ضریب همبستگی برای هر پیکسل نشان می‌دهد که دیگر اثرات زیست‌محیطی همانند توپوگرافی، شوری خاک و جهت تابش خورشید باید در بررسی ارتباط بین تغییر پوشش گیاهی و بارندگی مورد توجه قرار گیرد. بدین منظور شکل ۳ برای دو پیکسل ۱۰ و ۳۱ که دارای مشخصات توپوگرافی متفاوت هستند ترسیم شده است.

جدول ۱ ضریب همبستگی پیرسون را بین این متغیرها در قدرت تفکیک ۲۵ کیلومتری نشان می‌دهد. مقادیر مثبت ضریب همبستگی نشان‌دهنده این است که NDVI همبستگی بالا و مثبتی با بارندگی TRMM دارد. به طوری که اگر داده‌های پوشش گیاهی شانزده روزه به میزان تنها یک دوره نسبت به بارندگی با تأخیر رسم شوند، میزان همبستگی ارتقا می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت در این منطقه پاسخ پوشش گیاهی به بارندگی با یک دوره تأخیر شانزده روز همراه است. همچنین مقادیر ضریب همبستگی بین LST و EVI بیانگر وجود رابطه مثبت است. از آنجائی که میزان پوشش با بارندگی و دمای

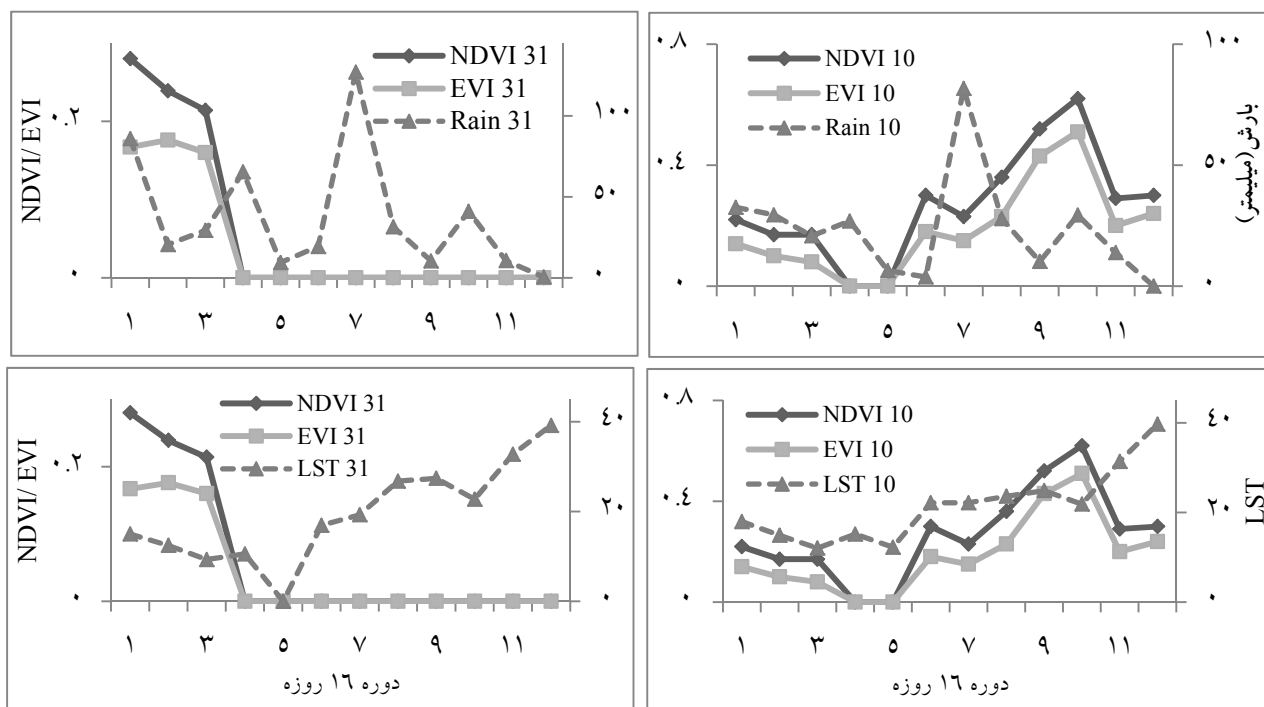
جدول ۱. ضرایب همبستگی پیرسون بین متغیرهای مورد بررسی

بارندگی و NDVI	بارندگی و NDVI با یک دوره تأخیر	EVI و LST	بارندگی و LST	شماره پیکسل
۰/۱۸	۰/۳	۰/۲۵	-۰/۴۳	۹
۰/۱	۰/۱۷	۰/۵۳	-۰/۲۳	۱۰
۰/۱۴	۰/۴۶	۰/۶۶	-۰/۵۳	۱۱
۰/۳	۰/۳۸	۰/۵۳	-۰/۴۲	۱۲
۰/۲۴	۰/۳۲	۰/۷	-۰/۳۴	۱۳
۰/۱۷	۰/۲۲	۰/۱۱	-۰/۲۳	۱۴
۰/۴۱	۰/۴۴	۰/۱	-۰/۱۵	۱۵
۰/۱۴	۰/۲۹	۰/۶۴	-۰/۴۶	۱۸
۰/۱	۰/۲۲	۰/۳۵	-۰/۶	۱۹
۰/۲۷	۰/۴۹	۰/۳۱	-۰/۴۳	۲۰
۰/۴۳	۰/۴۹	۰/۱۲	-۰/۴۳	۲۱
N.D	N.D	N.D	-۰/۴۹	۲۲
۰/۴۲	N.D	۰/۵۹	-۰/۳۸	۲۳
۰/۲۹	۰/۴۲	۰/۷۱	-۰/۱۶	۲۴
۰/۲۶	۰/۱۳	۰/۱۳	-۰/۷۴	۲۶
۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۶۴	-۰/۶۷	۲۷
۰/۲	۰/۲۴	۰/۵۵	-۰/۴	۲۸
۰/۱۷	۰/۲۸	۰/۳۴	-۰/۶	۲۹
۰/۱۷	۰/۲۲	۰/۱۷	-۰/۵	۳۰
۰/۱۷	۰/۶	۰/۳۹	-۰/۲۳	۳۱
۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۵۴	-۰/۲۳	۳۲

علامت N.D به معنای تعریف نشده است و بدان معنی است که یکی از متغیرها ثابت بوده است.

زمین و کاهش بارندگی میزان پوشش گیاهی روندکاهشی خواهد داشت. این نتایج نشان می‌دهد که از شاخص‌های گیاهی به شرط در نظر گرفتن اثرات زیست‌محیطی مکانی می‌توان در ریزمقیاس کردن بارندگی استفاده کرد. همچنین مقدار همبستگی به دست آمده بین بارندگی و دمای سطح زمین نشان‌دهنده وجود رابطه خطی معکوس در منطقه مورد مطالعه است؛ به طوری که در این منطقه به دلیل افزایش ارتفاع، میزان دمای سطح زمین کاهش می‌یابد و این در حالی است که بارندگی با افزایش میزان ارتفاع افزایش پیدا خواهد کرد.

روند تغییرات NDVI با EVI در طول بازه زمانی یکسان است و تنها تفاوت بین این دو شاخص این است که شاخص NDVI واکنش سریع‌تر نسبت به تغییرات بارندگی و دمای سطح زمین دارد. پیکسل ۱۰ نسبت به پیکسل ۳۱ دارای پوشش گیاهی بیشتری است لذا واکنش تغییر پوشش گیاهی به دمای سطح زمین و بارندگی واضح‌تر است. به طوری که با افزایش دما و بارندگی از دوره ۵ به بعد در پیکسل شماره ۳۱ هیچ تغییری در پوشش گیاهی اتفاق نمی‌افتد. از دوره ۵ به بعد با افزایش تدریجی دما و بارندگی میزان پوشش گیاهی در پیکسل ۱۰ روند افزایشی دارد اما از دوره ۱۰ به بعد با افزایش دمای سطح



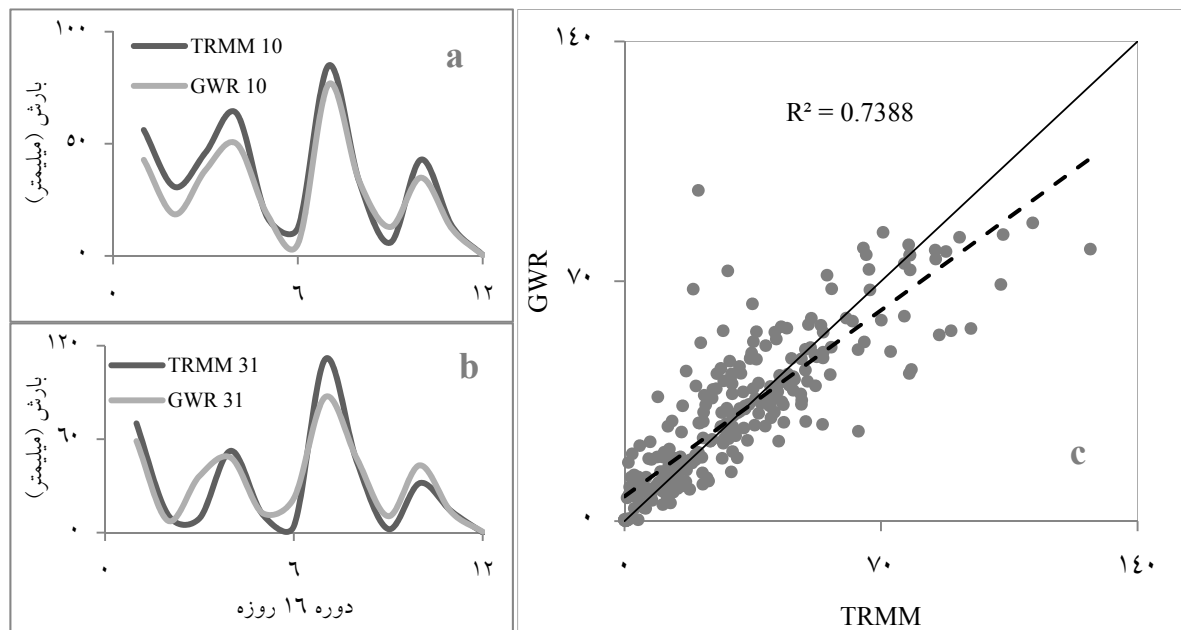
شکل ۳. تغییرات NDVI، EVI، LST و بارندگی TRMM در قدرت تفکیک ۲۵ کیلومتری در بازه زمانی مورد بررسی

با بارندگی به دست آمده از مدل GWR را نشان می‌دهد. ضریب تعیین و ضریب همبستگی برای تمام دوره زمانی و در تمام پیکسل‌ها به ترتیب حدود ۰/۷۴ و ۰/۸۶ است که نشان می‌دهد این روش دارای کارایی خوب و بخصوص برای بارش‌های کمتر از ۷۰ میلی‌متر مناسب‌تر خواهد بود. شکل‌های c-4 و b-4 مقایسه بارندگی مدل شده را با TRMM برای دو

پس از بررسی میزان همبستگی بین متغیرها، گام‌های ۳، ۴ و ۵ الگوریتم پیشنهادی به منظور آماده‌سازی و بازسازی داده‌ها در مقیاس ۲۵ کیلومتری انجام شد. سپس مدل‌سازی مکانی-زمانی GWR برای هر پیکسل با تفکیک ۲۵ کیلومتری و در هر دوره زمانی به منظور بررسی اثرات توپوگرافی زمین و ایجاد پهنای باند مناسب انجام شد. شکل ۴ مقایسه بارندگی TRMM

همبستگی بالاتری نسبت به دیگر متغیرهای کمکی در مدل GWR است. باین وجود در هر دو مکان روند برآورد بارش در طول دوره زمانی مناسب است.

پیکسل ۱۰ و ۳۱ نشان می‌دهد. با توجه به میزان بارندگی و روند تغییر پوشش گیاهی (شکل ۳). در این دو پیکسل می‌توان نتیجه گرفت که بارندگی با میزان تغییر توده زیستی دارای

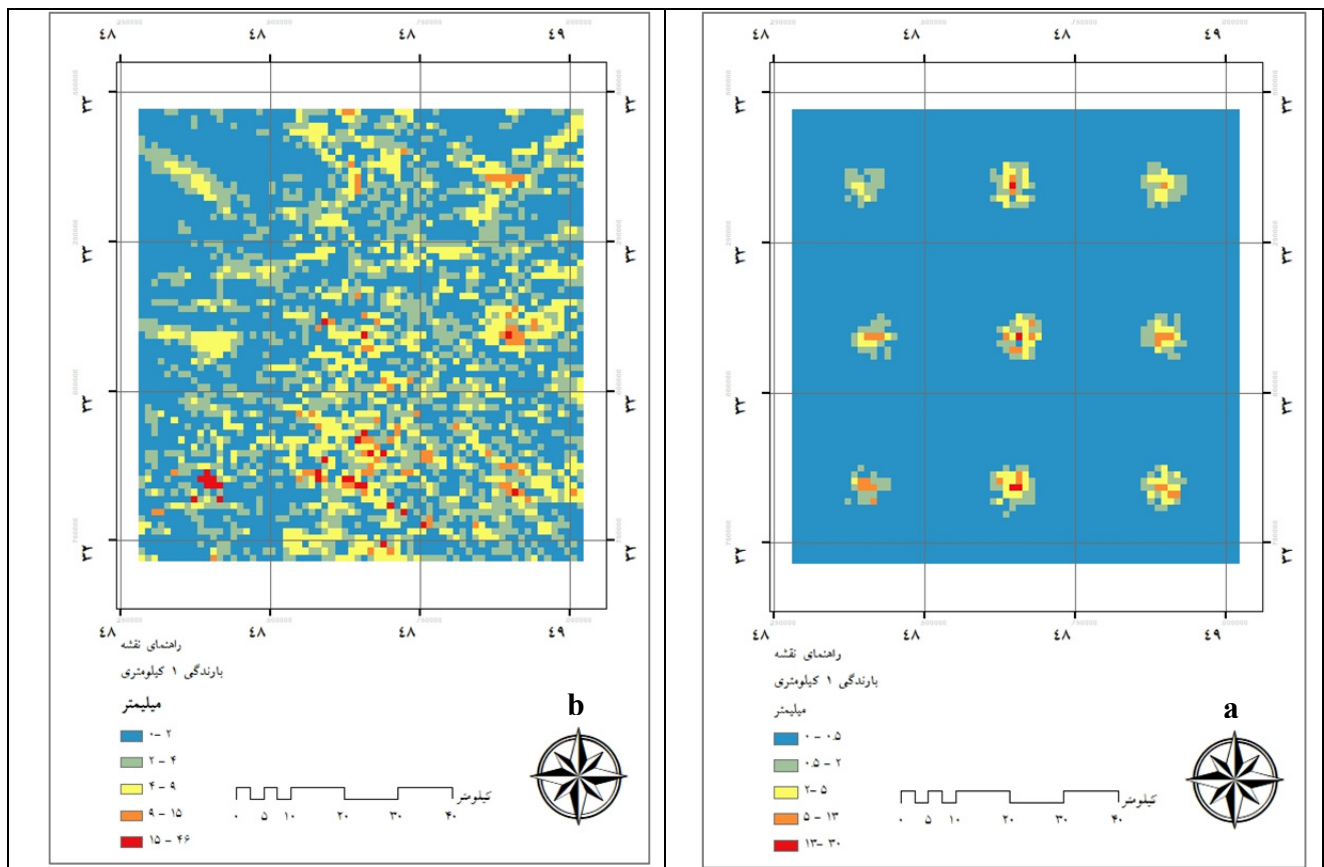


شکل ۴. مقایسه بارندگی TRMM با GWR (a) کل دوره زمانی و تمام پیکسل‌ها (b) پیکسل ۱۰ (c) پیکسل ۳۱

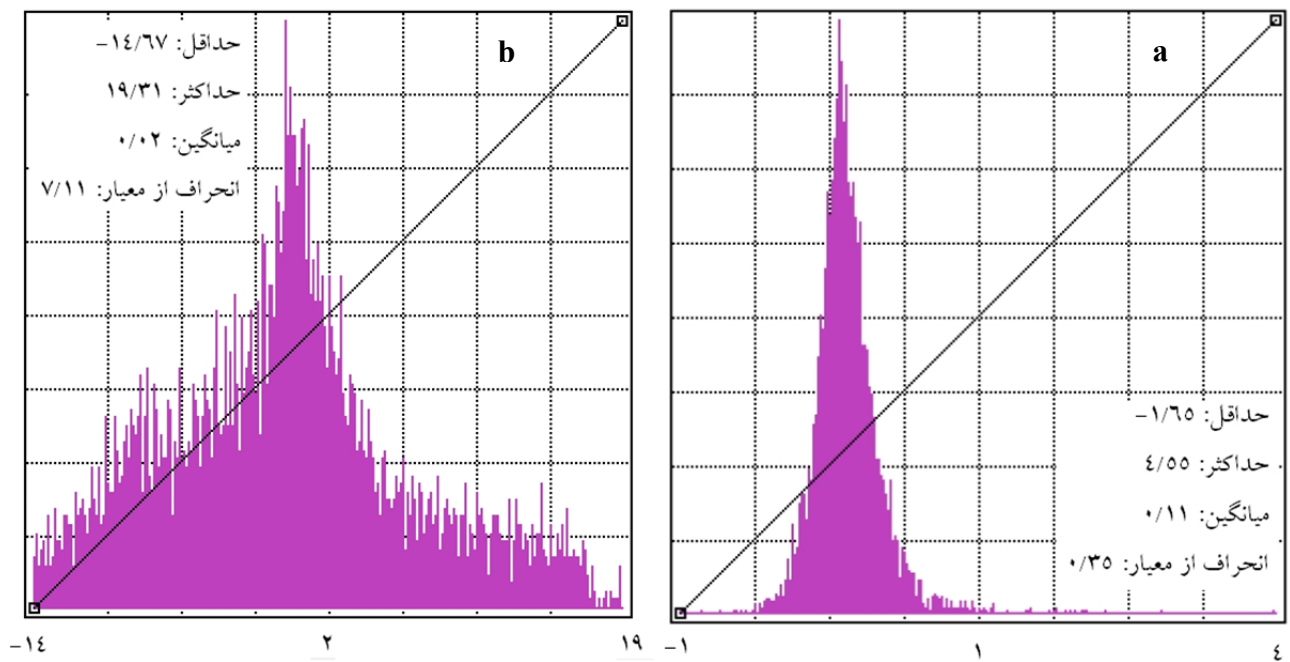
بدون در نظر گرفتن این پهنای باند تفاوت معنی‌داری دارند. در روش ارائه‌شده توسط ایمرزیل و همکاران (۱۷) مرحله‌ای به‌عنوان اضافه نمودن مقدار باقی‌مانده وجود دارد. مقادیر باقی‌مانده برابر بارندگی رخ داده در پیکسل‌های حذف‌شده در مرحله شناسایی سطوح آبی و اثرات انسانی است که برپایه درون‌یابی خطی به مقدار بارندگی ۱ کیلومتری برآورد شده با استفاده از روش GWR اضافه می‌شوند. اثربخشی این روش برای داده‌های به‌دست‌آمده را می‌توان با هیستوگرام تشکیل شده بررسی نمود (شکل ۶). هیستوگرام به‌دست‌آمده از داده‌های بارندگی و مقادیر باقی‌مانده به‌صورت توزیع نرمال است و شکل زنگوله‌ای دارد. این ویژگی نشان‌دهنده توزیع مناسب داده‌ها در تصویر است و بر کیفیت داده‌های خروجی تأثیرگذار است. این موضوع باعث می‌شود مقدار کتراتست داده‌ها بسیار خوب باشد و مقدار انحراف از معیار نیز با توجه به حجم زیاد اطلاعات بارندگی کم است.

داده‌های مورد پردازش قرارگرفته ریزمقیاس (قدرت تفکیک ۱ کیلومتری) همراه با داده‌های بارندگی بزرگ‌مقیاس (۲۵ کیلومتری) در مدل GWR فراخوانی شدند و در نهایت داده‌های بارندگی ریزمقیاس (۱ کیلومتری) براساس پهنای باند اولیه استخراج گردیدند. شکل ۵ نمایی از بارندگی ریزمقیاس شده با وضوح ۱ کیلومتری است و همان‌گونه که مشخص است مقدار بارندگی نسبت به پیکسل‌های اطراف دارای توزیع مناسبی نبوده و این تصویر نمی‌تواند پهنه‌بندی مناسبی از مقدار بارش رخ داده از منطقه را در اختیار ما بگذارد. به همین دلیل در این قسمت از روند ریزمقیاس نمایی، پهنای باند داده‌های ۱ کیلومتری با توجه به متغیرهای کمکی ۱ کیلومتری مجدداً (پهنای باند ثانویه) محاسبه می‌شود.

همان‌گونه که از شکل ۵ مشخص است با انتخاب مجدد پهنای باند (ثانویه)، توزیع بارندگی مناسب‌تری نسبت به حالت اولیه حاصل می‌گردد. مقدار بارندگی به‌دست‌آمده با استفاده از پهنای باند محاسبه‌شده از داده‌های ۲۵ کیلومتری (اولیه) و



شکل ۵. بارندگی ریزمقیاس شده با وضوح ۱ کیلومتری (a) پهنای باند اولیه (b) پهنای باند ثانویه



شکل ۶. هیستوگرام (a) بارندگی درون یابی شده (b) مقادیر باقی مانده

زمانی برای سه ایستگاه باران‌سنجی شاخص در منطقه موردمطالعه شامل: تنگ پنج، تله زنگ و سپیددشت مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۲). شاخص بودن ایستگاه باران‌سنجی براساس قابل توجه بودن مقدار بارندگی و اثرگذاری بر روی رواناب ورودی به مخزن سد از انتخاب شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد ریزمقیاس نمایی باید بدون در نظر گرفتن پهنای باند محاسبه شده در مقیاس بزرگ داده‌ها (اولیه) و با لحاظ مقادیر باقی مانده انجام شود. همچنین جدول ۳ مقادیر دو شاخص MAE و RMSE را در ۴ دوره زمانی و برای محدوده سه ایستگاه فوق نشان می‌دهد. این مقادیر نشان می‌دهد که زمان و مکان بارندگی بر روی مقادیر ریزمقیاس شده و نحوه مدل‌سازی آن تا چه اندازه مؤثر است.

به منظور صحت سنجی میزان بارندگی‌های ریزمقیاس شده ۱ کیلومتری، دو شاخص RMSE و MAE برای بارش‌های تجمعی ثبت شده در ۱۲ دوره ۱۶ روزه در ۱۳ ایستگاه باران‌سنجی (شکل ۱) و بارش‌های ریزمقیاس شده در محل همان ایستگاه محاسبه شد. میزان شاخص‌های RMSE و MAE به ترتیب ۲۲/۷ و ۷/۴۵ میلی‌متر است. از آنجائی که مطالعات لی و همکاران (۲۴) و زهانگ و همکاران (۳۷) دامنه تغییرات RMSE و MAE را برای بارش ماهانه به ترتیب بین ۲۵-۲۲/۲ میلی‌متر و ۱۶-۱۳/۵ گزارش کرده‌اند، و با توجه به دوره زمانی ۱۶ روزه بارش تجمعی در این مطالعه، بنابراین میزان شاخص‌های خطا در محدوده مناسبی قرار داد. همچنین به منظور مقایسه اثرگذاری پهنای باند و مقدار باقی مانده، میزان بارندگی در وضوح ۱ کیلومتری در ۴ حالت و در یک دوره

جدول ۲. مقایسه مقدار بارندگی ریزمقیاس شده با و بدون پهنای باند (اولیه)

نام ایستگاه	مقدار بارندگی		مقدار بارندگی بدون پهنای باند اولیه	
	مشاهداتی (میلی‌متر)	بدون باقی مانده	با باقی مانده	بدون باقی مانده
تنگ پنج	۱۷/۵	۱۳/۳۹۶	۱۶/۳	۱۰/۷۸
سپیددشت	۶۰	۴۵/۱۲	۵۳/۱۶	۳۵/۲۸
تله زنگ	۲۸	۲۴/۸۹	۲۵/۹۲	۱۳/۷۳

جدول ۳. مقادیر آماره‌های MAE و RMSE برای سه ایستگاه مشاهداتی

نام ایستگاه	MAE (میلی‌متر)				RMSE (میلی‌متر)			
	دوره زمانی (۱۶ روزه)				دوره زمانی (۱۶ روزه)			
	اول	دوم	سوم	چهارم	اول	دوم	سوم	چهارم
تنگ پنج	۰/۷۷	۰/۶۷	۰/۶	۰/۹۴	۲۴/۴۳	۷/۲۲	۳۶/۸۳	۲۲/۳۲
سپیددشت	۱۱/۸۸	۰/۹۵	۲۲/۵۵	۱۳/۳۳	۲۰/۵۷	۱/۶۴	۳۹	۲۳
تله زنگ	۰/۸۳	۲	۱۶/۹۴	۱۷/۶	۱/۴۴	۳/۴۶	۲۹/۳۴	۳۰/۴۹

نتیجه‌گیری

گذشته و کاهش عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژیک باشد. با این وجود کاربردی شدن داده‌های بارش ماهواره‌ای در مدل‌سازی حوزه آبریز رودخانه‌ای منوط به ریزمقیاس کردن این داده‌ها است. از آنجائی که داده‌های ویژگی زمین با دقت مکانی بالاتری به نسبت داده‌های بارندگی ماهواره‌ای ثبت می‌شوند. ریزمقیاس کردن داده‌های بارندگی TRMM به منظور

همواره میزان بارندگی در سطح یک حوزه آبریز در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیک به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت مطرح است. لذا استفاده از نقشه‌های بارش برپایه داده‌های بارش ماهواره‌ای می‌تواند رهیافتی در تکمیل داده‌های

۲. مددی غ، س. حمزه و ع. ا. نوروزی. ۱۳۹۴. ارزیابی بارش در مقیاس های روزانه، ماهانه و سالانه با استفاده از تصاویر ماهواره ای (مطالعه موردی: حوزه مرزی غرب ایران). نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۷۴-۵۹: (۲)۶.
۳. میجانی ن، س. حمزه و م. کریمی فیروزجانی. ۱۳۹۸. کمی سازی تأثیرپذیری پارامترهای سطحی و شرایط اقلیمی بر دمای سطح زمین با استفاده از داده های انعکاسی و حرارتی سنجش از دور. نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۰(۱): ۳۶-۵۹.
4. Agam N, Kustas WP, Anderson MC, Li F, Neale CM. 2007. A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery. *Remote Sensing of Environment*, 107(4): 545-558.
5. Brunsdon C, Fotheringham AS, Charlton ME. 1996. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. *Geographical Analysis*, 28(4): 281-298.
6. Chen C, Zhao S, Duan Z, Qin Z. 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*, 8(9): 4592-4604.
7. Chen F, Liu Y, Liu Q, Li X. 2014. Spatial downscaling of TRMM 3B43 precipitation considering spatial heterogeneity. *International Journal of Remote Sensing*, 35(9): 3074-3093.
8. Duan Z, Bastiaanssen W. 2013. First results from Version 7 TRMM 3B43 precipitation product in combination with a new downscaling-calibration procedure. *Remote Sensing of Environment*, 131: 1-13.
9. Foody G. 2003. Geographical weighting as a further refinement to regression modelling: An example focused on the NDVI-rainfall relationship. *Remote sensing of Environment*, 88(3): 283-293.
10. Goodrich DC, Faurès J-M, Woolhiser DA, Lane LJ, Sorooshian S. 1995. Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability. *Journal of Hydrology*, 173(1-4): 283-308.
11. Guan H, Wilson JL, Xie H. 2009. A cluster-optimizing regression-based approach for precipitation spatial downscaling in mountainous terrain. *Journal of Hydrology*, 375(3-4): 578-588.
12. Hewitson B, Crane RG. 1996. Climate downscaling: techniques and application. *Climate Research*, 7(2): 85-95.
13. Huffman GJ, Adler RF, Arkin P, Chang A, Ferraro R, Gruber A, Janowiak J, McNab A, Rudolf B, Schneider U. 1997. The global precipitation

تکمیل داده های گذشته برپایه این داده ها می تواند درست باشد. بررسی میزان همبستگی بین متغیر اصلی (بارندگی) با دیگر متغیرها مشخص شد که بیشترین میزان همبستگی بارندگی در ابتدا با پوشش گیاهی و سپس دمای سطح زمین و در نهایت خصوصیات فیزیوگرافی وجود دارد. پوشش گیاهی با بارندگی دارای همبستگی مثبت و دمای سطح زمین با بارندگی دارای همبستگی منفی است. البته این میزان همبستگی براساس تغییرات مکانی و زمانی متفاوت هستند که این موضوع استفاده از الگوریتم رگرسیون وزنی جغرافیایی دو چندان می کند. مدل سازی GWR در قدرت تفکیک ۲۵ کیلومتری نشان داد که در زمان و مکانی که روند تغییر پوشش گیاهی با بارندگی همبستگی بیشتری دارد، میزان برآوردها با خطای کمتری همراه است. همچنین اصلاح پهنای باند اولیه در قدرت تفکیک ۲۵ کیلومتری و اضافه کردن مقدار باقی مانده به کاهش خطا و پراکنش مناسب بارندگی کمک کرده است. مقایسه شاخص های خطا در این تحقیق با نتایج تحقیقات زو و همکاران (۳۲)، چن چنگ و همکاران (۶ و ۷)، لی و همکاران (۲۴) و زهانگ و همکاران (۳۷) بیانگر مناسب بودن کاربرد روش GWR در ریزمقیاس کردن داده ها و به دست آوردن نقشه های بارندگی در پهنه یک حوزه آبریز است. البته بررسی روش های دیگر و استفاده از دامنه وسیع تری از داده ها می تواند به ارزیابی میزان خطا به دست آمده در این منطقه کمک کند. همچنین در این مطالعه بارندگی با مقیاس زمانی ۱۶ روزه و بعد مکانی ۱ کیلومتر مورد هدف قرار گرفت که کاهش مقیاس زمانی و استفاده از روش های دیگر ریزمقیاس کردن و مقایسه با روش GWR برای ادامه کار پیشنهاد می شود.

منابع مورد استفاده

۱. عسکری زاده د، ح. ارزانی، م. جعفری، ج. بذرافشان و آ. ک. پرنایس. ۱۳۹۷. بررسی گذشته، حال و آینده تغییرات پوشش گیاهی مراتع البرز مرکزی در ارتباط با تغییر اقلیم. نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۹(۳): ۱-۱۸.

- climatology project (GPCP) combined precipitation dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(1): 5-20.
14. Huffman GJ, Adler RF, Bolvin DT, Gu G. 2009. Improving the global precipitation record: GPCP version 2.1. *Geophysical Research Letters*, 36(17): 1-5.
 15. Huffman GJ, Bolvin DT, Nelkin EJ, Wolff DB, Adler RF, Gu G, Hong Y, Bowman KP, Stocker EF. 2007. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1): 38-55.
 16. Hunink J, Immerzeel W, Droogers P. 2014. A High-resolution Precipitation 2-step mapping Procedure (HiP2P): Development and application to a tropical mountainous area. *Remote Sensing of Environment*, 140: 179-188.
 17. Immerzeel W, Rutten M, Droogers P. 2009. Spatial downscaling of TRMM precipitation using vegetative response on the Iberian Peninsula. *Remote Sensing of Environment*, 113(2): 362-370.
 18. Jia S, Zhu W, Lü A, Yan T. 2011. A statistical spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on NDVI and DEM in the Qaidam Basin of China. *Remote sensing of Environment*, 115(12): 3069-3079.
 19. Jing W, Zhang P, Jiang H, Zhao X. 2017. Reconstructing satellite-based monthly precipitation over Northeast China using machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 9(8): 781.
 20. Kubota T, Shige S, Hashizume H, Aonashi K, Takahashi N, Seto S, Hirose M, Takayabu YN, Ushio T, Nakagawa K. 2007. Global precipitation map using satellite-borne microwave radiometers by the GSMaP project: Production and validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(7): 2259-2275.
 21. Kummerow C, Barnes W, Kozu T, Shiue J, Simpson J. 1998. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(3): 809-817.
 22. Kummerow C, Simpson J, Thiele O, Barnes W, Chang ATC, Stocker E, Adler RF, A. Hou, Kakar R, Wentz F, Ashcroft P, Kozu T, Hong Y, Okamoto K, Iguchi T, Kuroiwa H, Im E, Haddad Z, Huffman G, Ferrier B, Olson WS, Zipser E, Smith EA, Wilhelm TT, North G, Krishnamurti T, Nakamura K. 2000. The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit. *Journal of Applied Meteorology*, 39(12): 1965-1982.
 23. Kustas WP, Norman JM, Anderson MC, French AN. 2003. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship. *Remote Sensing of Environment*, 85(4): 429-440.
 24. Li S, Zhao Z, Miaomiao X, Wang Y. 2010. Investigating spatial non-stationary and scale-dependent relationships between urban surface temperature and environmental factors using geographically weighted regression. *Environmental Modelling & Software*, 25(12): 1789-1800.
 25. Li Y, Zhang Y, He D, Luo X, Ji X. 2019. Spatial Downscaling of the Tropical Rainfall Measuring Mission Precipitation Using Geographically Weighted Regression Kriging over the Lancang River Basin, China. *Chinese Geographical Science*, 29(3): 446-462.
 26. Merlin O, Al Bitar A, Walker JP, Kerr Y. 2009. A sequential model for disaggregating near-surface soil moisture observations using multi-resolution thermal sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(10): 2275-2284.
 27. Michaelides S, Levizzani V, Anagnostou E, Bauer P, Kasparis T, Lane J. 2009. Precipitation: Measurement, remote sensing, climatology and modeling. *Atmospheric Research*, 94(4): 512-533.
 28. Nakaya T. 2015. Geographically weighted generalised linear modelling. *Geocomputation: A practical primer*, 217: 20.
 29. Piles M, Sánchez N, Vall-llossera M, Camps A, Martínez-Fernández J, Martínez J, González-Gambau V. 2014. A downscaling approach for SMOS land observations: Evaluation of high-resolution soil moisture maps over the Iberian Peninsula. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(9): 3845-3857.
 30. Richard Y, Pocard I. 1998. A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 19(15): 2907-2920.
 31. Wilby RL, Wigley T. 1997. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, 21(4): 530-548.
 32. Xu S, Wu C, Wang L, Gonsamo A, Shen Y, Niu Z. 2015. A new satellite-based monthly precipitation downscaling algorithm with non-stationary relationship between precipitation and land surface characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 162: 119-140.
 33. Zhan W, Chen Y, Wang J, Zhou J, Quan J, Liu W, Li J. 2012. Downscaling land surface temperatures with multi-spectral and multi-resolution images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18: 23-36.
 34. Zhan W, Chen Y, Zhou J, Wang J, Liu W, Voogt J, Zhu X, Quan J, Li J. 2013. Disaggregation of remotely sensed land surface temperature: Literature survey, taxonomy, issues, and caveats. *Remote Sensing of Environment*, 131: 119-139.

35. Zhang Q, Shi P, Singh VP, Fan K, Huang J. 2017. Spatial downscaling of TRMM-based precipitation data using vegetative response in Xinjiang, China. *International Journal of Climatology*, 37(10): 3895-3909.
36. Zhang T, Li B, Yuan Y, Gao X, Sun Q, Xu L, Jiang Y. 2018. Spatial downscaling of TRMM precipitation data considering the impacts of macro-geographical factors and local elevation in the Three-River Headwaters Region. *Remote Sensing of Environment*, 215: 109-127.
37. Zhang Y, Li Y, Ji X, Luo X, Li X. 2018. Fine-resolution precipitation mapping in a mountainous watershed: geostatistical downscaling of TRMM products based on environmental variables. *Remote Sensing*, 10(1): 119.
38. Zhao Z, Gao J, Wang Y, Liu J, Li S. 2015. Exploring spatially variable relationships between NDVI and climatic factors in a transition zone using geographically weighted regression. *Theoretical and Applied Climatology*, 120(3-4): 507-519.
39. Zhou X, Ni G-H, Shen C, Sun T. 2017. Remapping annual precipitation in mountainous areas based on vegetation patterns: a case study in the Nu River basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(2): 999-1015.
40. Zorita E, von Storch H. 1997. A survey of statistical downscaling techniques. *GKSS-Forschungszentrum*, 42 pp.



Downscaling TRMM satellite-based precipitation data using non-stationary relationships between precipitation and land surface characteristics

B. Zanjani ¹, H. Seyed Kaboli ^{2*}, M. Rashidian ³

1. MSc. Student of Water Resource Engineering, Faculty of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology

2. Assist. Prof. Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology

3. Lecturer, Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 February 2019

Accepted 22 June 2019

Available online 11 August 2019

Keywords:

Satellite-based precipitation
Geographically weighted regression
DEZ river basin
Land surface temperature
Land cover

ABSTRACT

Satellite-based precipitation dataset have been widely used to estimate precipitation, especially over regions with sparse rain gauge networks. However, the low spatial resolution of these datasets has limited their application in localized regions and watersheds. So, having an accurate estimation of precipitation by satellites along with the adequate spatial scale in hydrologic studies is the main goal of this study. In this research, Geographically weighted regression (GWR) method was investigated to downscale the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM-3B42 Version 7) over the DEZ river basin in southwest of IRAN for 2010-2011. Downscaling was performed based on the non-stationary relationships between the TRMM precipitation and the Digital elevation model (DEM) derived products, the Normalized difference vegetation index (NDVI), the Enhanced vegetation index (EVI) and the Land surface temperature (LST). The result shows that the downscale precipitation at 1 km spatial scale had significantly improved spatial resolution, and agreed well with data from the rain gauge stations. For the 16-day precipitation, Mean square root mean square error (RMSE) and absolute mean error (MAE) values are 22.7 mm and 7.45 mm, respectively. However, the accuracy of the model varies in different location and depends on the vegetation condition.

* Corresponding author e-mail address: hkaboli@jsu.ac.ir