

تحلیل دقت مکانی تصاویر ماهواره TRMM در برآورد شاخص خشکسالی هواشناسی، مطالعه موردی: کشور ایران

مجید کاظمزاده*^۱ و جواد اکبری^۲

^۱ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز-آب، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران و ^۲ کارشناس ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۲۵

چکیده

در قرن اخیر یکی از مهمترین چالش‌های جهان، خشکسالی بوده، پایش و ارزیابی شدت و مدت آن برای مقابله و کاهش اثرات آن بسیار ضروری است. در چند دهه اخیر با توسعه و پیشرفت مباحث سنجش از دور، برآوردهای ماهواره‌ای خشکسالی با دقت مکانی بالا و گام‌های زمانی مختلف به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. لذا هدف پژوهش حاضر، تحلیل خشکسالی هواشناسی و توزیع خطای برآوردی داده‌های ماهواره TRMM با داده‌های زمینی طی دوره آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴ بوده است. در این راستا، به‌منظور ارزیابی صحت و دقت شاخص خشکسالی هواشناسی، برآوردی از ماهواره TRMM از ۴۱ ایستگاه سینوپتیک ایران استفاده شد. در این پژوهش، معیارهای ارزیابی خطا شامل NSE، RMSE، ME، Bias و ضریب همبستگی بوده، برای تحلیل مکانی آن‌ها از روش درونی‌یابی IDW در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 استفاده شده است. نتایج تحلیل شاخص خشکسالی بر اساس داده‌های زمینی نشان داد که از لحاظ شدت خشکسالی، ایستگاه‌های کرمان، بوشهر، کاشمر، قزوین، بجنورد و کاشان در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه یک خشکسالی خیلی شدید را طی دوره ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴ پشت سر گذاشته‌اند و از لحاظ فراوانی ایستگاه کرج بیشترین فراوانی خشکسالی را در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه داشته است. نتایج تحلیل مکانی معیارهای ارزیابی خطا نشان داد که شاخص خشکسالی برآوردی از ماهواره TRMM در مناطق شمال شرقی (در اطراف ایستگاه‌های کاشمر و مشهد) و جنوب غربی (در اطراف ایستگاه‌های شهرکرد، اصفهان، یاسوج، بوشهر و شیراز) کشور خطای کمتری داشته، بیشترین خطا مربوط به مناطق مرکزی کشور (در اطراف ایستگاه‌های بیارجمند، طبس) بوده است. همچنین، در بیشتر مناطق کشور، شاخص خشکسالی برآوردی از TRMM با محاسباتی ایستگاه‌های زمینی تطابق قابل قبولی داشته است و با واسنجی داده‌های TRMM با ایستگاه‌های زمینی، می‌توان از آن برای پایش خشکسالی در مناطق فاقد ایستگاه به‌صورت شبکه‌های ۰/۲۵ × ۰/۲۵ درجه طول و عرض جغرافیایی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی خطا، پایش خشکسالی، توزیع مکانی، سنجش از دور، فراوانی خشکسالی

مقدمه

مختلف چرخه آب در طبیعت رخ دهد (Tallaksen و Van Lanen، ۲۰۰۴؛ Sheffield و Wood، ۲۰۱۱) به‌طور کلی، خشکسالی را به خشکسالی هواشناسی

خشکسالی به‌عنوان کمبود آب در مقایسه با شرایط نرمال تعریف می‌شود که می‌تواند در بخش‌های

بارش با تفکیک مکانی بالا در مقیاس جهانی وجود دارد که یکی از آن‌ها محصولات ماهواره TRMM^۱ است، که توجه بیشتری را از زمان پرتاب آن به فضا در سال ۱۹۹۷ به خود جلب کرده است (Tao و همکاران، ۲۰۱۶). در سال‌های اخیر در سطح جهان، داده‌های بارش ماهواره TRMM در مطالعات زیادی از جمله تحلیل و ارزیابی خشکسالی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که مراتبی از آن‌ها در ادامه آورده می‌شود.

Ghafourian و همکاران (۲۰۱۳) پژوهشی در راستای پایش خشکسالی با استفاده از داده‌های ماهواره TRMM در استان خراسان رضوی انجام داده‌اند. آن‌ها در تحقیق خود از ۱۰ ایستگاه سینوپتیک و ۱۰۷ ایستگاه باران‌سنجی به منظور صحت‌سنجی نتایج شاخص خشکسالی SPI حاصل از ماهواره TRMM استفاده کردند که نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که ماهواره TRMM، خشکسالی به‌وقوع پیوسته سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۸ را به خوبی تشخیص داده است و همچنین، آن‌ها اظهار کردند که داده‌های ماهانه ماهواره TRMM توانایی پایش خشکسالی استان خراسان رضوی را داشته است. Erfanian و همکاران (۲۰۱۴) مطالعه‌ای به منظور ارایه یک روش نوین برای ارزیابی ریسک خشکسالی استان فارس با تلفیق داده‌های ماهانه بارندگی ماهواره TRMM و شاخص پوشش گیاهی انجام دادند که نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که نقشه‌های SPI داده‌های زمینی با SPI مبتنی بر داده‌های TRMM انطباق قابل قبولی داشتند.

با استفاده از داده‌های بارش ماهانه پایگاه TRMM و GPCP^۲ تحقیقی به‌وسیله Naumann و همکاران (۲۰۱۲) به منظور برآورد شاخص خشکسالی SPI انجام شده است که نتایج تحقیق آن‌ها نشان‌دهنده این بود که برآوردهای ماهواره TRMM برای پایش خشکسالی آفریقا منطقی‌تر بوده است. Li و همکاران (۲۰۱۳) شرایط خشکسالی و ترسالی را با استفاده از داده‌های TRMM طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۰ در چین پایش کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که داده‌های روزانه TRMM صحت لازم در خصوص وقوع و مقدار بارش را نداشتند، در صورتی که داده‌های ماهانه TRMM

(کمبود بارش)، خشکسالی رطوبت خاک (رطوبت خاک کمتر از سطح نرمال) و خشکسالی هیدرولوژیکی (کمبود آب یا کمتر از حالت نرمال) تقسیم می‌کنند (Van Loon، ۲۰۱۵). این پدیده یکی از وقایع محیطی و بخش جدایی‌ناپذیر نوسانات اقلیمی بوده، ویژگی‌های اصلی و تکرار شونده اقلیم‌های مختلف به‌شمار می‌رود (Wilhite، ۱۹۹۷؛ Mosaedi و همکاران، ۲۰۰۸) که مطالعه و بررسی علمی آن به‌منظور برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و همچنین، کاهش اثرات آن از اهمیت زیادی برخوردار است (Mosaedi و همکاران، ۲۰۰۸). ارزیابی اثرات خشکسالی نیازمند درک کلی از وقوع خشکسالی‌های تاریخی و تاثیر آن‌ها بر رفتار انسان می‌باشد. روش‌های سنتی ارزیابی خشکسالی بر پایه داده‌ها و شاخص‌های مورد استفاده از سری‌های زمانی بارش بوده است که به‌علت تغییرات مکانی بارش و فقدان ایستگاه‌های باران‌سنجی کافی منجر به خطاهای برآوردی می‌شوند (Naumann و همکاران، ۲۰۱۴؛ Heim، ۲۰۰۲). با توجه به موارد ذکر شده، در سال‌های اخیر تحقیقات در خصوص خشکسالی به‌دلیل تغییرات جهانی اقلیم بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است (Trenberth و همکاران، ۲۰۱۴؛ Bordi و همکاران، ۲۰۰۴).

بنابراین، به‌منظور پایش و ارزیابی خشکسالی روش‌ها و تکنیک‌های زیادی وجود داشته، در تحقیقات مختلف از آن‌ها استفاده می‌شود. در میان انواع خشکسالی، برای پایش خشکسالی هواشناسی بیشتر شاخص‌هایی که مورد استفاده قرار می‌گیرد، نیازمند داده‌های بارش است که با وجود طول دوره آماری کافی، اغلب در بیشتر مناطق دنیا شبکه ایستگاه‌های موجود (دقت مکانی) نشان‌دهنده تغییرات مکانی بارش نبوده است. علت آن امر این است که راه‌اندازی، حفظ و نگهداری از ایستگاه‌های مذکور هزینه زیادی دارد (Stampoulis و Anagnostou، ۲۰۱۲). در چند دهه اخیر با توسعه و پیشرفت مباحث سنجش از دور، برآوردهای ماهواره‌ای بارش با دقت مکانی بالا و گام‌های زمانی مختلف به‌طور گسترده در مطالعات هیدرولوژی و اقلیم مورد استفاده قرار گرفته است (Naumann و همکاران، ۲۰۱۲؛ Zhao و Yatatgai، ۲۰۱۴). در حال حاضر تعدادی از محصولات

^۱Tropical Rainfall Measuring Mission

^۲Global Precipitation Climatology Centre

کردند و روی این کاوشگر حس‌گرهایی همچون رادار بارشی (PR)، نگارگر ریزموج، پوشش‌گر فروسرخ و مرئی (VIRS) راه‌اندازی شده است. طرح اندازه‌گیری بارش استوا (TRMM) از سال ۱۹۹۷ شروع به کار کرد که این بخشی از طرح بین‌المللی NASA با هدف برآورد دقیق‌تر از بارش در پهنه‌های استوایی و مناطق جنب حاره‌ای بوده است. این پایگاه دارای نسخه‌های گوناگونی است از جمله فرآورده TRMM 3A12 مقادیر میانگین بارش را فراهم می‌آورد و قدرت تفکیک داده‌های این فرآورده بارشی 0.5×0.5 درجه طول و عرض جغرافیایی است که بازه‌های ماهانه را پوشش می‌دهد. نسخه دیگر آن TRMM 3B42 است که این داده‌ها نیز در بازه زمانی ماهانه و دارای قدرت تفکیک 0.25×0.25 درجه طول و عرض جغرافیایی بوده است. در این نسخه از داده‌های ایستگاه‌های زمینی نیز استفاده کرده‌اند (Masoudian و همکاران، ۲۰۱۴).

داده‌های بارش شبکه‌ای TRMM 3B43 از اول ژانویه ۱۹۹۸ تا کنون با تاخیر دو ماهه و تفکیک مکانی 0.25×0.25 درجه طول و عرض جغرافیایی در دسترس است و پوشش مکانی این داده‌ها از 50° درجه جنوبی تا 50° درجه شمالی و از 180° درجه غربی تا 180° درجه شرقی است. بنابراین، در تحقیق حاضر شروع و پایان دوره آماری از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴ انتخاب شده و داده‌های ماهانه از پایگاه سازمان فضایی آمریکا استخراج شدند.

شاخص خشکسالی هواشناسی: شاخص خشکسالی SPI یکی از شاخص‌های ساده و کاربردی پایش وقایع خشکسالی است که به‌وسیله McKee و همکاران (۱۹۹۳) ارائه شده است. مقادیر مثبت این شاخص نشان‌دهنده بارش بیشتر از میانگین و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده بارش کمتر از میانگین می‌باشد (Patel و همکاران، ۲۰۰۷). جدول ۱، طبقه‌بندی میزان خشکسالی را ارائه می‌دهد. در تحقیق حاضر برای محاسبه شاخص خشکسالی سه، شش، نه و ۱۲ ماهه از داده‌های ماهانه ماهواره TRMM و ۴۱ ایستگاه سینوپتیک استفاده شد.

همبستگی بهتری با داده‌های ایستگاه‌های زمینی داشتند. در نهایت، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که داده‌های ماهانه TRMM می‌تواند به‌طور قابل قبولی شرایط مختلف ترسالی و خشکسالی را شناسایی کند. Tao و همکاران (۲۰۱۶) مطالعه‌ای را به‌منظور ارزیابی داده‌های بارش TRMM برای پایش خشکسالی طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴ در استان جیانگسو^۱ انجام دادند. آن‌ها به‌منظور تحلیل خشکسالی هواشناسی از شاخص SPI^۲ و برای ارزیابی نتایج تحقیق خود از ۶۵ ایستگاه هواشناسی در این منطقه استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که همبستگی زمانی بین مقادیر بارش مشاهداتی و برآوردی حاصل از TRMM برای سری‌های زمانی مختلف قابل قبول بوده است. با تکیه بر موارد ذکر شده و اینکه در سال‌های اخیر شدت و مدت خشکسالی‌ها تغییر کرده، تحت تاثیر تغییرات اقلیم بوده است و از طرف دیگر با توجه اهمیت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به‌منظور پایش خشکسالی، هدف پژوهش حاضر تحلیل خشکسالی هواشناسی و توزیع خطای برآوردی آن از داده‌های ماهانه ماهواره TRMM با داده‌های زمینی طی دوره آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴ می‌باشد.

مواد و روش‌ها

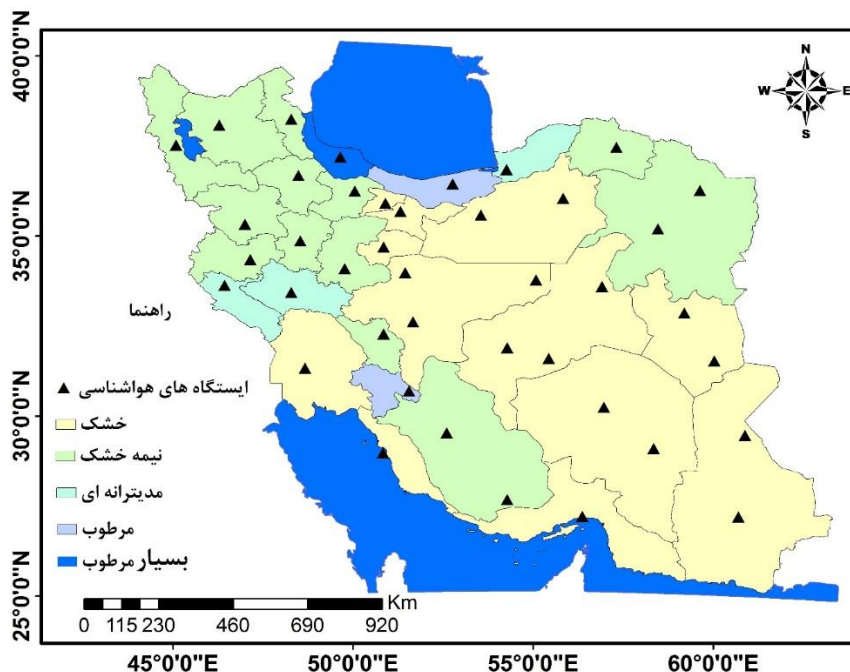
منطقه مورد پژوهش: منطقه مورد مطالعه کشور جمهوری اسلامی ایران با مساحت تقریباً $1/64$ میلیون کیلومتر مربع می‌باشد که با توجه به اقلیم‌بندی دوماترن، شامل پنج اقلیم مختلف خشک، نیمه‌خشک، مدیترانه‌ای، مرطوب و بسیار مرطوب است (Khamchin Moghadam و Rezaei Pjand، ۲۰۰۹).

در پژوهش حاضر، برای ارزیابی خطای داده‌های برآوردی حاصل از ماهواره TRMM از داده‌های بارش ماهانه ۴۱ ایستگاه سینوپتیک کشور استفاده شده است که به‌صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.

داده‌های بارش TRMM: ماهواره TRMM را ایالات متحده آمریکا و ژاپن در سال ۱۹۹۶ به فضا پرتاب

¹ Jiangsu

² Standardized Precipitation Index



شکل ۱- توزیع مکانی ایستگاه‌های مورد مطالعه تحقیق حاضر

جدول ۱- طبقه‌بندی مختلف خشکسالی (McKee و همکاران، ۱۹۹۳)

مقادیر شاخص	طبقه خشکسالی
$-1 \leq SPI < 1$	تقریباً نرمال
$-1/5 \leq SPI < -1$	خشکسالی متوسط
$-2 \leq SPI < -1/5$	خشکسالی شدید
$SPI \leq -2$	خشکسالی خیلی شدید

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (3)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{N} \quad (4)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (5)$$

که در آن‌ها، O_i و P_i به ترتیب مقادیر برآوردی و مشاهده‌ای و i و n مربوط به رتبه داده‌ها می‌باشند (Kazemzadeh و همکاران، ۲۰۱۴).

تحلیل توزیع مکانی معیارهای ارزیابی خطا:

به منظور پهنه‌بندی و تحلیل مکانی نتایج معیارهای ارزیابی خطای شاخص خشکسالی حاصل از ماهواره TRMM از روش وزن‌دهی نسبت عکس فاصله^۶ در نرم‌افزار Arc GIS استفاده شد. روش IDW از جمله

معیارهای ارزیابی خطا: در این پژوهش، به منظور ارزیابی دقت برآورد شاخص خشکسالی از داده‌های ماهواره TRMM از پنج معیار ارزیابی خطا شامل ریشه دوم میانگین مربع خطا^۱، ضریب ناش-ساتکلِف^۲، ضریب همبستگی^۳، میانگین خطا^۴ و خطای بایاس^۵ استفاده شده است که روابط آن‌ها به شرح ذیل است.

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

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (2)$$

¹ Root mean squared error

² Nash-Sutcliffe

³ Correlation coefficient

⁴ Mean error

⁵ Bias error

⁶ Inverse Distance Weighting (IDW)

شاخص خشکسالی ۱۲ ماهه نیز نشان داد که کرمان، بوشهر، کاشمر و قزوین بیشترین شدت خشکسالی را در بین ۴۱ ایستگاه داشتند و بیشترین فراوانی خشکسالی نیز در شاخص ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های کرج و اراک مشاهده شد. بنابراین، نتایج تحلیل شاخص خشکسالی مشخص کرد که از لحاظ شدت خشکسالی ایستگاه‌های کرمان، بوشهر، کاشمر، قزوین، بجنورد و کاشان در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه یک خشکسالی خیلی شدید را طی ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴ پشت سر گذاشته‌اند و از لحاظ فراوانی خشکسالی ایستگاه کرج بیشترین فراوانی را در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه داشته است.

مقایسه نتایج شاخص خشکسالی محاسباتی از ایستگاه‌های زمینی با برآوردی ماهواره TRMM:

باتوجه به اهمیت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در پایش و ارزیابی خشکسالی‌ها، در این بخش نتایج شاخص خشکسالی حاصل از ماهواره TRMM با نتایج شاخص خشکسالی محاسباتی از ایستگاه‌های زمینی در جداول ۴ و ۵ ارایه شده است. نتایج معیارهای ارزیابی خطا نشان داد که در بیشتر ایستگاه‌ها شاخص برآوردی از ماهواره TRMM با نتایج ایستگاه‌های زمینی مطابقت قابل قبولی داشتند، بدین صورت که در ۲۳ ایستگاه سینوپتیک در بین ۴۱ ایستگاه معیار ارزیابی خطای ناش-ساتکلیم بیش از ۰/۶ بوده است. در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه کمترین خطا را بر اساس ضریب ناش-ساتکلیم ایستگاه‌های یاسوج، شیراز، مشهد، اصفهان، کاشمر، بوشهر و نهبندان داشتند که بیشتر از ۰/۸ بوده است. همچنین، ایستگاه‌های مذکور بر اساس معیار ارزیابی RMSE نیز کمترین خطا را بین بقیه ایستگاه‌های مورد مطالعه داشتند. از طرفی دیگر بیشترین خطا و کمترین مقادیر ضریب ناش-ساتکلیم در ایستگاه سینوپتیک طبس با اقلیم خشک بوده است. نتایج معیارهای بایاس و میانگین خطا (ME) با توجه به ماهیت داده‌ها (منفی و مثبت بودن اعداد و بیشتر در رنج ۲ تا -۲ بودند) در تعیین خطای برآوردی شاخص خشکسالی SPI از داده‌های ماهواره‌ای زیاد کارا نبوده‌اند.

روش‌های درون‌یابی است که در آن برآورد بر اساس مقادیر نقاط نزدیک به نقطه برآورد که بنابر عکس فاصله وزن‌دهی می‌شوند، می‌باشد (Yousefi و همکاران، ۲۰۱۵). هدف از این بخش تحلیل و تعیین مقادیر خطای شاخص خشکسالی حاصل از ماهواره TRMM در اقلیم‌های مختلف ایران و مقایسه نتایج آن‌ها در مناطق مختلف کشور است.

نتایج و بحث

نتایج شاخص خشکسالی: به‌منظور تحلیل و شناسایی خشکسالی طی دوره مورد مطالعه، نتایج شاخص‌های سه، شش، نه و ۱۲ ماهه خشکسالی ایستگاه‌های سینوپتیک کشور در جداول ۲ و ۳ ارایه شده است. با توجه به جداول مذکور، نتایج نشان می‌دهد که در شاخص خشکسالی سه ماهه شرایط خشکسالی خیلی شدید در هیچ‌کدام از ایستگاه‌های مورد مطالعه وجود نداشته است. همچنین، در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه طبقه خشکسالی شدید نیز وجود نداشته، بیشترین فراوانی در این طبقه در ایستگاه‌های اراک و کاشان با فراوانی دو بوده است. در طبقه خشکسالی متوسط شاخص سه ماهه، ایستگاه‌های کرج و شیراز بیشترین فراوانی (چهار بار طی دوره ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴) و ایستگاه‌های همدان و سنندج کمترین فراوانی را داشتند. نتایج شاخص خشکسالی شش ماهه نیز نشان داد که ایستگاه‌های تهران و کرج بیشترین فراوانی (پنج سال طی دوره ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴) خشکسالی متوسط را پشت سر گذاشتند. از لحاظ شدت خشکسالی نیز در شاخص خشکسالی شش ماهه، ایستگاه‌های تبریز، گرگان و کاشان در بالاترین وضعیت، یکسال خشکسالی خیلی شدید را تجربه کردند.

نتایج شاخص خشکسالی نه ماهه نیز نشان داد که از شدت خشکسالی، ایستگاه‌های بجنورد و کاشان طی دوره آماری مورد مطالعه، یک خشکسالی خیلی شدید داشتند و از لحاظ فراوانی نیز مشخص شد که ایستگاه کرج بیشترین فراوانی خشکسالی متوسط در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه داشته است. همچنین، نتایج

جدول ۲- نتایج شاخص خشکسالی هواشناسی ایستگاه های سینوپتیک اقلیم های مختلف کشور

ایستگاه	۳ ماهه			۶ ماهه			۹ ماهه			۱۲ ماهه		
	خ.ش*	خ.خ.ش	م.خ	خ.ش	خ.خ.ش	م.خ	خ.ش	خ.خ.ش	م.خ	خ.ش	خ.خ.ش	م.خ
رشت	۲	-	-	۴	-	-	۱	-	-	۱	-	-
یاسوج	۲	۱	-	۲	-	-	۲	-	-	۱	-	-
قائم شهر	۳	-	-	۳	-	۱	۴	-	-	۱	-	-
خرم آباد	۳	-	-	۲	-	۱	۳	-	-	۳	-	-
گرگان	۱	۱	-	۲	-	۱	۲	-	-	۲	-	-
ایلام	۱	۱	-	۱	-	-	۱	-	-	۲	-	-
اراک	۱	۲	-	۳	-	۱	۳	-	-	۴	-	-
اردبیل	۳	-	-	۲	-	۱	۳	-	-	۳	-	-
بجنورد	۲	-	-	۱	-	۱	۱	-	-	۱	-	-
تبریز	۲	-	-	۱	-	۱	۱	-	-	۱	-	-
همدان	-	-	-	۳	-	-	۲	-	-	۳	-	-
سنندج	-	-	-	۳	-	-	۱	-	-	۲	-	-
شهرکرد	۲	-	-	۲	-	-	۲	-	-	۱	-	-
شیراز	۴	-	-	۲	-	۱	۲	-	-	۱	-	-
زنجان	۳	-	-	۲	-	۱	۲	-	-	۲	-	-
مشهد	۲	-	-	۲	-	۱	۲	-	-	۲	-	-
قزوین	۱	۱	-	۳	-	۱	۲	-	-	۲	-	-
کرمانشاه	۳	-	-	۲	-	۱	۲	-	-	۲	-	-
ارومیه	۱	-	-	۳	-	-	۳	-	-	۲	-	-

*خ.خ.ش = خشکسالی خیلی شدید، خ.ش = خشکسالی شدید و م.خ = خشکسالی متوسط

جدول ۳- نتایج شاخص خشکسالی هواشناسی ایستگاه های سینوپتیک اقلیم خشک

ایستگاه	۳ ماهه			۶ ماهه			۹ ماهه			۱۲ ماهه		
	خ.ش*	خ.خ.ش	م.خ	خ.ش	خ.خ.ش	م.خ	خ.ش	خ.خ.ش	م.خ	خ.ش	خ.خ.ش	م.خ
اصفهان	۱	۱	-	۱	-	۲	۲	-	-	۱	-	-
اهواز	۲	۱	-	۲	-	۱	۲	-	-	۲	-	-
ایرانشهر	۳	-	-	۴	-	-	۴	-	-	۲	-	-
بافق	۱	-	-	۳	-	-	۳	-	-	۱	-	-
بم	۲	-	-	۲	-	-	۲	-	-	۳	-	-
بندرعباس	۱	-	-	۳	-	-	۳	-	-	۲	-	-
بوشهر	۲	-	-	۱	-	-	۱	-	-	-	-	-
بیجارجمند	۱	۱	-	۱	-	۲	۱	-	-	۲	-	-
بیرجند	۱	۱	-	۲	-	۱	۲	-	-	۳	-	-
خوربیابانک	۲	-	-	۴	-	-	۴	-	-	۲	-	-
زاهدان	۲	-	-	۲	-	-	۲	-	-	۲	-	-
سمنان	۲	۱	-	۱	-	۱	۱	-	-	۲	-	-
طیس	۲	-	-	۱	-	-	۱	-	-	۲	-	-
قم	۳	-	-	۳	-	۲	۳	-	-	۱	-	-
کاشان	۱	۲	-	۱	-	-	۱	-	-	۱	-	-
کاشمر	۲	-	-	۲	-	۲	۲	-	-	۱	-	-
کرج	۴	-	-	۵	-	-	۵	-	-	۴	-	-
کرمان	۲	-	-	۳	-	-	۳	-	-	۲	-	-
لار	۳	-	-	۳	-	-	۳	-	-	۱	-	-
یزد	۱	-	-	۲	-	-	۲	-	-	۲	-	-
تهران	۱	۱	-	۵	-	۴	۵	-	-	۲	-	-
نهبندان	۳	-	-	۳	-	-	۳	-	-	۲	-	-

*خ.خ.ش = خشکسالی خیلی شدید، خ.ش = خشکسالی شدید و م.خ = خشکسالی متوسط

استفاده کرد. در این راستا، Ghafourian و همکاران (۲۰۱۳) پژوهشی به منظور پایش خشکسالی هواشناسی با استفاده از داده‌های ماهواره TRMM در استان خراسان رضوی انجام داده‌اند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که ماهواره TRMM خشکسالی به‌وقوع پیوسته سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۸ را به‌خوبی تشخیص داده است. نتایج تحقیق Erfanian و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد که نقشه‌های SPI داده‌های زمینی با SPI مبتنی بر داده‌های TRMM انطباق قابل قبولی داشتند. در سطح جهان نیز مطالعاتی در خصوص استفاده از داده‌ها ماهواره TRMM به‌منظور پایش خشکسالی استفاده شده است که شامل تحقیق Naumann و همکاران (۲۰۱۲) در آفریقا، Li و همکاران (۲۰۱۳) و Tao و همکاران (۲۰۱۶) در چین بوده که نتایج پژوهش آن‌ها همانند تحقیق حاضر نشان داد که پایش خشکسالی هواشناسی از طریق برآوردهای ماهواره TRMM قابل قبول و منطقی‌تر بوده است.

به‌عنوان مثال، همبستگی و نتایج شاخص خشکسالی محاسباتی با ایستگاه سینوپتیک مشهد و برآوردی حاصل از ماهواره TRMM در شکل‌های ۲ و ۳ ارایه شده است. همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، شاخص خشکسالی برآوردی با استفاده از داده‌های ماهواره TRMM به نحو قابل قبولی توانسته است، خشکسالی‌های به‌وقوع پیوسته را طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴ ارایه کند. همچنین، نتایج همبستگی (شکل ۳) نشان می‌دهد که ضریب همبستگی برای شاخص خشکسالی سه، شش و نه ماهه بیشتر از ۰/۹۴ و برای شاخص خشکسالی ۱۲ ماهه بیشتر از ۰/۸۹ بوده است. بنابراین، نتایج تحقیق نشان داد که در بیشتر مناطق کشور، شاخص خشکسالی برآوردی حاصل از TRMM با محاسباتی ایستگاه‌های زمینی تطابق قابل قبولی داشته است و با واسنجی داده‌های TRMM با ایستگاه‌های زمینی، می‌توان از آن برای پایش خشکسالی در مناطق فاقد ایستگاه به‌صورت شبکه‌های ۰/۲۵×۰/۲۵ درجه طول و عرض جغرافیایی

جدول ۴- نتایج معیارهای ارزیابی خطای شاخص خشکسالی برآوردی TRMM در اقلیم‌های مختلف

ایستگاه	اقلیم	ME	Bias	RMSE	NSE
رشت	بسیار مرطوب	۰/۰۰	-۷/۸۷	۰/۵۵	۰/۶۹
یاسوج	مرطوب	۰/۰۰	-۰/۶۶	۰/۳۸	۰/۸۶
قراخیل قائم‌شهر	مرطوب	۰/۰۰	-۰/۰۶	۰/۷۸	۰/۳۹
خرم‌آباد	مدیترانه‌ای	۰/۰۰	۱/۰۳	۰/۵۷	۰/۶۷
گرگان	مدیترانه‌ای	۰/۰۰	-۰/۱۰	۰/۴۸	۰/۷۷
ایلام	مدیترانه‌ای	۰/۰۰	۱/۲۱	۰/۷۳	۰/۴۷
اراک	نیمه‌خشک	۰/۰۰	-۰/۰۵	۰/۵۵	۰/۷۰
اردبیل	نیمه‌خشک	۰/۰۰	۹/۰۰	۰/۷۵	۰/۴۴
بجنورد	نیمه‌خشک	۰/۰۰	۰/۲۶	۰/۷۱	۰/۵۰
تبریز	نیمه‌خشک	۰/۰۰	۰/۱۷	۰/۶۸	۰/۵۴
همدان	نیمه‌خشک	۰/۰۰	۰/۵۳	۰/۶۱	۰/۶۲
سنندج	نیمه‌خشک	۰/۰۰	-۰/۵۶	۰/۷۶	۰/۴۳
شهرکرد	نیمه‌خشک	۰/۰۰	-۷/۶۴	۰/۵۱	۰/۷۴
شیراز	نیمه‌خشک	۰/۰۰	-۰/۵۱	۰/۴۱	۰/۸۳
زنجان	نیمه‌خشک	۰/۰۰	-۰/۵۰	۰/۵۵	۰/۷۰
مشهد	نیمه‌خشک	۰/۰۰	-۲/۸۹	۰/۳۶	۰/۸۷
قزوین	نیمه‌خشک	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۷۴	۰/۴۵
کرمانشاه	نیمه‌خشک	۰/۰۰	-۰/۲۱	۰/۷۴	۰/۴۵
ارومیه	نیمه‌خشک	۰/۰۰	۱/۵۶	۰/۷۲	۰/۴۸

جدول ۵- نتایج معیارهای ارزیابی خطای شاخص خشکسالی برآوردی TRMM در اقلیم خشک

ایستگاه	اقلیم	ME	Bias	RMSE	NSE
اصفهان	خشک	۰/۰۰	-۲/۰۹	۰/۴۵	۰/۸۰
اهواز	خشک	۰/۰۰	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۷۰
ایرانشهر	خشک	۰/۰۰	۰/۴۸	۰/۵۹	۰/۶۵
بافق	خشک	۰/۰۰	۰/۲۲	۰/۶۱	۰/۶۳
بم	خشک	۰/۰۰	-۰/۶۹	۰/۶۱	۰/۶۳
بندرعباس	خشک	۰/۰۰	-۰/۲۳	۰/۷۴	۰/۴۵
بوشهر	خشک	۰/۰۰	-۲۶/۶۷	۰/۲۹	۰/۹۲
بیارجمند	خشک	۰/۰۰	-۰/۰۵	۰/۹۹	۰/۰۲
بیرجند	خشک	۰/۰۰	۰/۱۱	۰/۵۵	۰/۷۰
خوربیبانک	خشک	۰/۰۰	-۰/۷۲	۰/۷۴	۰/۴۶
زاهدان	خشک	۰/۰۰	۰/۳۳	۰/۷۲	۰/۴۹
سمنان	خشک	۰/۰۰	۱/۳۸	۰/۵۷	۰/۶۷
طیس	خشک	۰/۰۰	-۱۱۴/۰۰	۱/۰۷	-۰/۱۴
قم	خشک	۰/۰۰	۰/۱۷	۰/۷۱	۰/۴۹
کاشان	خشک	۰/۰۰	۵۵/۱۳	۰/۵۶	۰/۶۹
کاشمر	خشک	۰/۰۰	-۰/۹۰	۰/۲۶	۰/۹۳
کرج	خشک	۰/۰۰	-۰/۱۹	۰/۴۷	۰/۷۸
کرمان	خشک	۰/۰۰	۰/۹۲	۰/۷۰	۰/۵۱
لار	خشک	۰/۰۰	-۰/۵۷	۰/۶۷	۰/۵۶
یزد	خشک	۰/۰۰	-۱/۰۷	۰/۶۳	۰/۶۰
مهرآباد تهران	خشک	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۶۵	۰/۵۷
نهبندان	خشک	۰/۰۰	۰/۵۳	۰/۴۱	۰/۸۳

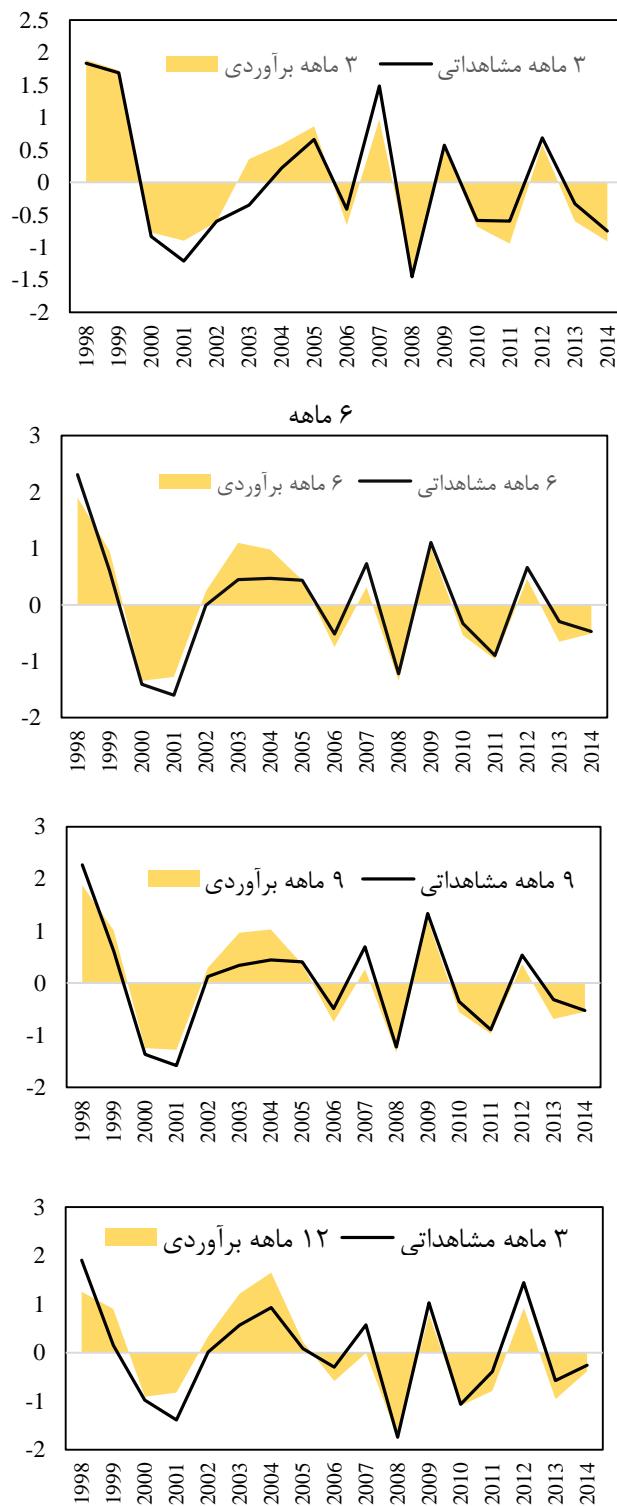
تحلیل مکانی خطای بین نتایج شاخص

مشاهداتی زمینی و ماهواره TRMM: همانطور که در بخش‌های قبلی ذکر شد، به منظور تحلیل مکانی خطای شاخص خشکسالی برآوردی از ماهواره TRMM از روش‌های درونیابی استفاده شد که نتایج آن‌ها در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ آورده شده است. نتایج معیار ارزیابی NSE در شکل ۴ نشان می‌دهد که شاخص خشکسالی برآوردی از ماهواره TRMM در مناطق شمال شرقی (در اطراف ایستگاه‌های کاشمر و مشهد) و جنوب غربی (در اطراف ایستگاه‌های شهرکرد، اصفهان، یاسوج، بوشهر و شیراز) کشور خطای کمتر و ضریب ناش-ساتکلیف بیشتری نسبت به سایر مناطق (۰/۷۳ تا ۰/۹۳) داشتند. همچنین، بیشترین خطا مربوط به مناطق مرکزی کشور (در اطراف ایستگاه‌های بیارجمند، طیس) بوده است.

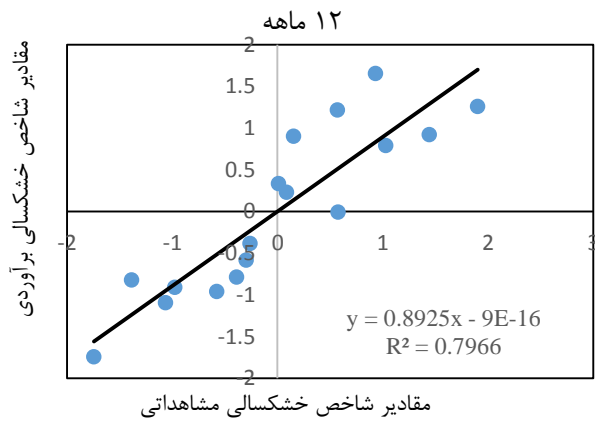
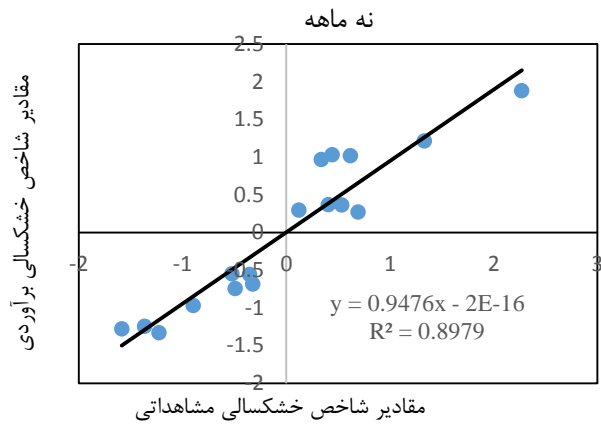
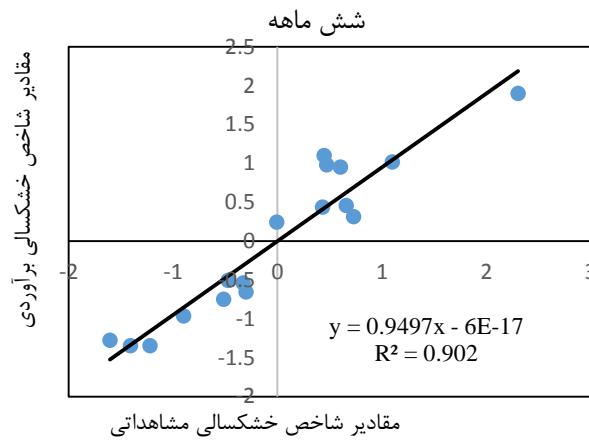
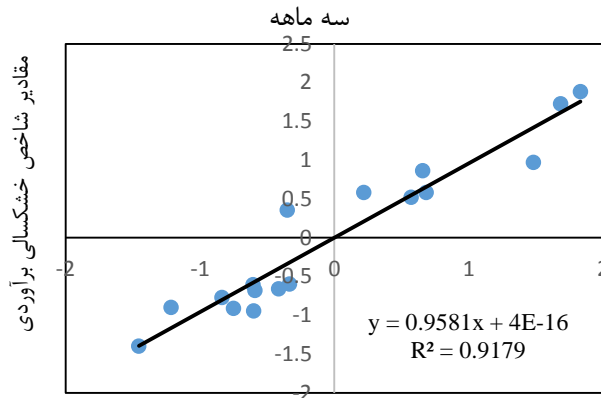
بنابراین، با توجه به نتایج پهنه‌بندی ضریب ناش-ساتکلیف، بیشترین مساحت کشور دارای ضریب قابل قبول و بیشتر از ۰/۵۱ داشته است. همان‌طور که در شکل ۵ ارائه شده است، نتایج معیار ارزیابی RMSE نیز تایید کننده نتایج ضریب ناش-ساتکلیف بوده، به عبارتی در مناطقی که ضریب ناش-ساتکلیف بیشتر بوده، مقدار RMSE کمتری را نشان دادند. همچنین، نتایج پهنه‌بندی معیار ارزیابی خطای بایاس نیز نشان‌دهنده مناطقی که بیشترین خطا در مناطق مرکزی کشور (اطراف ایستگاه طیس) است. بنابراین، نتایج تحلیل مکانی خطای برآوردی شاخص خشکسالی نشان داد که ایستگاه‌های طیس و بیارجمند بیشترین خطا را در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه داشتند. علت این امر می‌تواند بیش برآوردی بارش به وسیله ماهواره TRMM در این مناطق باشد.

می‌شود (Tesfagiorgis و همکاران، ۲۰۱۱؛ Moazami و همکاران، ۲۰۱۳).

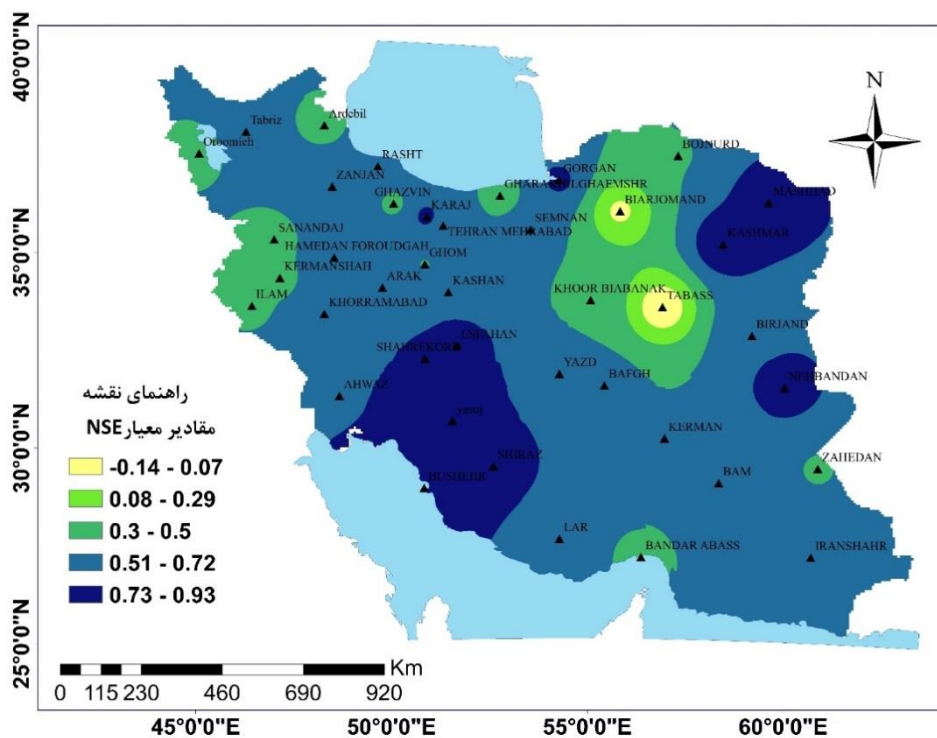
چرا که در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک قبل از رسیدن قطرات باران به سطح زمین، تبخیر می‌شوند و این امر منجر به بیش برآوردی بارش به‌وسیله ماهواره



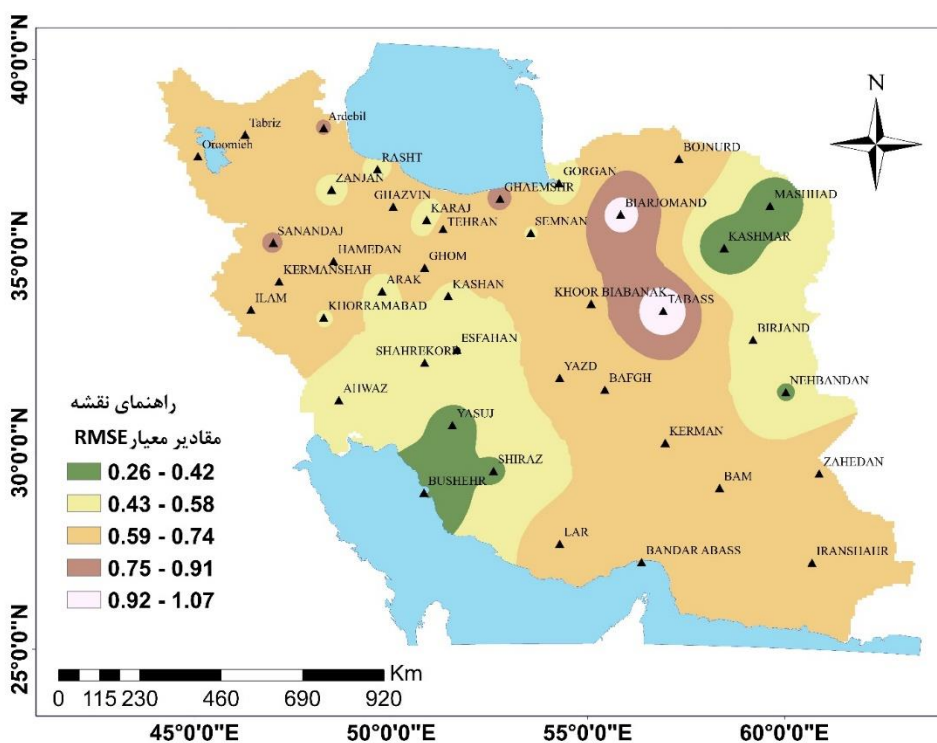
شکل ۲- مقایسه نتایج شاخص خشکسالی مشاهداتی و برآوردی حاصل از ماهواره TRMM در ایستگاه مشهد



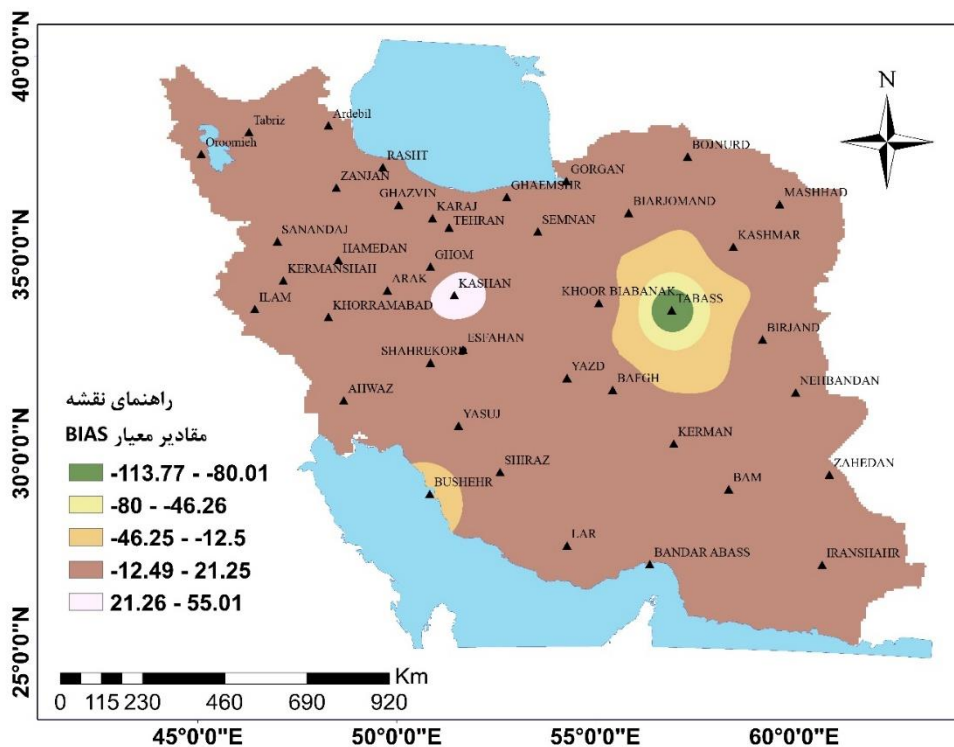
شکل ۳- همبستگی بین شاخص خشکسالی مشاهده‌ای و برآوردی از ماهواره TRMM در ایستگاه مشهد



شکل ۴- توزیع مکانی مقادیر NSE حاصل از شاخص خشکسالی ماهداتی و برآوردی TRMM



شکل ۵- توزیع مکانی مقادیر RMSE حاصل از شاخص خشکسالی ماهداتی و برآوردی TRMM



شکل ۶- توزیع مکانی مقادیر Bias حاصل از شاخص خشکسالی مشاهداتی و برآوردی TRMM

نتیجه‌گیری

یکی از مهمترین چالش‌های جهان در قرن اخیر، خشکسالی بوده که برای مقابله و کاهش اثرات آن نیاز به پایش و ارزیابی شدت و مدت آن طی سنوات گذشته است. بنابراین، به‌منظور پایش و ارزیابی خشکسالی روش‌ها و تکنیک‌های زیادی وجود داشته و در تحقیقات مختلف از آن‌ها استفاده می‌شود. بدین منظور در چند دهه اخیر با توسعه و پیشرفت مباحث سنجش از دور، برآوردهای ماهواره‌ای خشکسالی با دقت مکانی بالا و گام‌های زمانی مختلف به‌طور گسترده در مطالعات زیادی مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اهمیت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به‌منظور پایش خشکسالی، هدف پژوهش حاضر تحلیل خشکسالی هواشناسی و توزیع خطای برآوردی خشکسالی حاصل از داده‌های ماهواره TRMM با داده‌های زمینی طی دوره آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴ بوده است. در این راستا، به‌منظور ارزیابی صحت و دقت شاخص خشکسالی هواشناسی برآوردی حاصل از ماهواره TRMM از ۴۱ ایستگاه سینوپتیک ایران طی دوره ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴ استفاده شد. در این پژوهش،

معیارهای ارزیابی خطا شامل NSE، RMSE، ME، Bias و ضریب همبستگی بوده، برای تحلیل مکانی آن‌ها از روش درون‌یابی IDW در نرم‌افزار Arc GIS استفاده شده است. نتایج تحلیل شاخص خشکسالی بر اساس داده‌های زمینی نشان داد که از لحاظ شدت خشکسالی، ایستگاه‌های کرمان، بوشهر، کاشمر، قزوین، بجنورد و کاشان در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه یک خشکسالی خیلی شدید را طی دوره ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴ پشت سر گذاشته‌اند و از لحاظ فراوانی ایستگاه کرج بیشترین فراوانی خشکسالی را در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه داشته است. همچنین، نتایج تحلیل مکانی معیارهای ارزیابی خطا نشان داد که شاخص خشکسالی برآوردی از ماهواره TRMM در مناطق شمال شرقی (در اطراف ایستگاه‌های کاشمر و مشهد) و جنوب غربی (در اطراف ایستگاه‌های شهرکرد، اصفهان، یاسوج، بوشهر و شیراز) کشور خطای کمتری داشته، بیشترین خطا مربوط به مناطق مرکزی کشور (در اطراف ایستگاه‌های بیارجمند، طبس) بوده است. همچنین، در بیشتر مناطق کشور، شاخص خشکسالی برآوردی حاصل از TRMM با

محاسباتی ایستگاه‌های زمینی تطابق قابل قبولی داشته است و با واسنجی داده‌های TRMM با ایستگاه‌های زمینی، می‌توان از آن برای پیش‌گویی خشکسالی در مناطق فاقد ایستگاه به‌صورت شبکه‌های $۰/۲۵ \times ۰/۲۵$ درجه طول و عرض جغرافیایی استفاده کرد.

منابع مورد استفاده

1. Mosaedi, A., M. Khalilzadeh and A. Mohammadi Ostad Kelayeh. 2008. The meteorological drought monitoring Golestan Province. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 15(2): 176-182 (in Persian).
2. Khamchin Moghadam, F. and H. Rezaei Pajand. 2009. Review of climate Domarten of l-moment method for precipitation maximum in Iran. *Journal of Engineering and Technology*, Islamic Azad University of Mashhad, 2(2): 21-35 (in Persian).
3. Erfanian, M.A. 2014. New method for assessing the drought risk by using integration TRMM satellite monthly rainfall data with data of vegetation index NDVI of MODIS/Terra sensor in Fars Province. *Journal of Physical Geography Research Quarterly*, 46(1): 16-17.
4. Ghafourian, E., S.H. Sanaiejad and K. Davari. 2013. The Study of drought monitoring using TRMM satellite data in Khorasan Razavi Province. MSc Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, 102 pages.
5. Kazemzadeh, M., V. Azimi and Sh. Khalighi Sigaroudi. 2014. Evaluate the effectiveness of the M5 and MLP models in estimation of total dissolved solids, case study: Lighvan Watershed. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 8(27): 1-10.
6. Yousefi, H., A. Nohegar, G. Khosravi and M. Azizabad Farahani. 2015. Management and mapping drought using SPI and RDI index, case study: Central Province. *Iran Journal of Ecohydrology*, 2(3): 337-344.
7. Bordi, I., K. Fraedrich, J.M. Jiang and A. Sutera. 2004. Spatio-temporal variability of dry and wet periods in eastern China. *Theoretical and Applied Climatology*, 79: 81-91.
8. Heim, Jr.R.R. 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83: 1149-1165.
9. McKee, T.B, N.J. Doesen and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, California, USA, 179-184.
10. Moazami, S., S. Golian, M.R. Kavianpour and Y. Hong. 2013. Comparison of PERSIANN and V7 TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products with rain gauge data over Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 34(22): 8156-8171.
11. Naumann, G., E. Dutra, P. Barbosa, F. Pappenberger, F. Wetterhall and J.V. Vogt. 2014. Comparison of drought indicators derived from multiple data sets over Africa. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18: 1625-1640.
12. Naumann, G., P. Barbosa, H. Carrao, A. Singleton and J. Vogt. 2012. Monitoring drought conditions and their uncertainties in Africa using TRMM data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51: 1867-1874.
13. Li, X., Q. Zhang and X. Ye. 2013. Dry/wet conditions monitoring based on TRMM rainfall data and its reliability validation over Poyang Lake Basin, China. *Water*, 5: 1848-1864.
14. Patel, N.R., P. Chopra and V.K. Dadhwal. 2007. Analyzing spatial patterns of meteorological drought using standardized precipitation index. *Meteorological Applications*, 14: 329-336.
15. Sheffield, J. and E. Wood. 2011. Drought: past problems and future scenarios. Earthscan, London, UK, Washington DC, USA, 233 pages.
16. Stampoulis, D., E.N. Anagnostou. 2012. Evaluation of global satellite rainfall products over continental Europe. *Journal of Hydrometeorology*, 13: 588-603.
17. Tallaksen, L.M. and H.A.J. Van Lanen. 2004. Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater. Elsevier (Developments in Water Science, 48), 626 pages.
18. Tao, H., T. Fischer, Y. Zeng and K. Fraedrich. 2016. Evaluation of TRMM 3B43 precipitation data for drought monitoring in Jiangsu Province, China. *Water*, 8(6): 221.
19. Tesfagiorgis, K., S.E. Mahani, N.Y. Krakauer and R. Khanbilvardi. 2011. Bias correction of satellite rainfall estimates using a radar-gauge product, a case study in Oklahoma (USA). *Hydrology and Earth System Sciences*, 15: 2631-2647.
20. Trenberth, K.E., A.G. Dai, G. van der Schrier, P.D. Jones, J. Barichivich, K.R. Briffa and J. Sheffield. 2014. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4: 17-22.
21. Van Loon, A. 2015. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2: 359-392.

22. Wilhite, D.A. 1997. Responding to drought: common threads from the past, vision for the future. *Journal of the American Water Resources Association*, 33(5): 951-959.
23. Zhao, T.B. and A. Yatagai. 2014. Evaluation of TRMM 3B42 product using a new gauge-based analysis of daily precipitation over China. *International Journal of Climatology*, 34: 2749-2762.