



سال شانزدهم، شماره‌ی ۵۴
تابستان ۱۳۹۵، صفحات ۲۱۷-۱۹۵

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی

علی اکبر رسولی^۱
مهدی عرفانیان^۲
بهروز ساری صراف^۳
خدیجه جوان^۴

ارزیابی تطبیقی مقادیر بارندگی برآورد شده TRMM و بارش ثبت شده ایستگاه‌های زمینی در حوضه دریاچه ارومیه

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۱/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۰۲

چکیده

بارندگی با تغییرات زمانی و مکانی زیاد، در چرخه هیدرولوژی نقش اصلی را ایفا کرده و عامل مهمی در مطالعات کشاورزی، منابع آب و اکوسیستم می‌باشد. بنابراین، اندازه‌گیری و برآورد دقیق مقدار آن اهمیت زیادی دارد. امروزه در سنجش از دور ماهواره‌ای روش‌های متعددی در زمینه برآورد مقادیر بارندگی مطرح شده است. هدف این تحقیق، ارزیابی تطبیقی مقادیر بارندگی شش ساعته ماهواره TRMM و بارش مشاهده شده ایستگاه‌های زمینی در حوضه دریاچه ارومیه می‌باشد. برای بررسی صحت عملکرد ماهواره TRMM در برآورد بارش، از شاخص‌های عملکرد خطا (bias)، احتمال تشخیص^۵ (POD)، نسبت اخطار اشتباه^۶ (FAR)، نسبت تشخیص درست^۷ (PC) و

۱- استاد گروه آب و هواشناسی، دانشگاه تبریز.

۲- استادیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشگاه ارومیه.

۳- استاد گروه آب و هواشناسی، دانشگاه تبریز.

۴- استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه ارومیه.

E-mail: kjavan20@gmail.com

5- Probability Of Detection

6- False Alarm Ratio

7- Percentage of Corrects

نمره مهارت هیک^۸ (HSS) استفاده گردید که میانگین این شاخص‌ها در کل حوضه به ترتیب ۰/۶۸، ۰/۱۳، ۰/۵۲، ۰/۶۰ و ۰/۳۹ به دست آمد. اعتبارسنجی داده‌های بارش TRMM با استفاده از معیارهای آماری میانگین خطا (ME)، میانگین خطای مطلق (MAE) و جذر میانگین توان دوم خطا (RMSE) صورت گرفت که به ترتیب برابر ۱/۷۰، -۱/۳۴ و ۲/۸۵ میلی‌متر می‌باشند. کالیبراسیون (واسنجی) برآوردهای ماهواره TRMM نیز با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی و رگرسیون خطی صورت گرفت و ضریب همبستگی آن ۰/۶۹ به دست آمد که نشان دهنده انطباق نسبی داده‌های بارش TRMM با مقادیر زمینی می‌باشد.

کلید واژه‌ها: برآورد بارندگی، ماهواره TRMM، شاخص‌های عملکرد، حوضه دریاچه ارومیه.

مقدمه

بارندگی یکی از عناصر پیچیده و حیاتی اتمسفر زمین محسوب می‌گردد و تغییرات زمانی و مکانی آن می‌تواند ویژگی‌های محیطی هر ناحیه جغرافیایی را کنترل کند. از این رو، خیلی از اقلیم‌شناسان بارندگی را به عنوان مهم‌ترین پدیده جوی و یکی از اصلی‌ترین عناصر اقلیمی تلقی می‌کنند. بررسی منابع تحقیقاتی مبین این واقعیت است که جنبه‌های کاربردی مختلفی نظیر: پیش‌بینی شرایط جوی، محیط‌زیست، هیدرولوژی، کشاورزی، مدیریت حوضه‌های آبریز، برآورد احتمال وقوع سیلاب و حتی بررسی تغییرات اقلیمی در اقصی نقاط دنیا با مقوله بارندگی در ارتباط است (رسولی، ۱۳۹۰: ۱۱۷). روش‌های سنتی که برای بررسی بارندگی مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولاً مبتنی بر ایستگاه‌های سینوپتیک، کلیماتولوژی و باران‌سنجی بوده و دارای مشکلاتی از قبیل هزینه‌بر بودن، کمبود ایستگاه، عدم استقرار دستگاه‌های ثبت‌کننده در مناطق صعب‌العبور و عدم توانایی ثبت بارندگی‌های رگباری و سنگین همرفتی می‌باشند (رسولی و حاجی میررحیمی، ۱۳۸۶: ۸۸). رادارهای بارندگی برخی از این مشکلات را برطرف می‌کنند، اما آن‌ها هم دارای مشکلاتی هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به نیازمندی به تاسیسات، گران‌قیمت بودن و داشتن خطاهای معنی‌دار، ناهمگنی جمع‌آوری داده به خاطر پراکندگی مکانی و خطای تبدیل بازتاب پذیری به نرخ بارندگی و محدودیت پوشش مکانی اشاره نمود (مارچی^۹، ۲۰۰۶: ۲) امروزه، با ظهور فن‌آوری‌های پیشرفته در فرآیند دریافت اطلاعات هواشناسی ماهواره‌ای، روش‌های متعددی در زمینه پردازش داده‌ها و برآورد مقادیر بارندگی مطرح شده است. سنجش از دور ماهواره‌ای به عنوان یک ابزار مؤثر، شکاف‌های اندازه‌گیری‌های زمینی را

8- Heidke's Skill Score

9- Marchi

کاهش داده و مشکلات موجود را تا حدودی برطرف می‌نماید. مزیت بررسی بارندگی با استفاده از روش‌های سنجش از دور، شناخت بهتر پدیده بارش و پارامترهای موثر در آن در یک گستره مکانی وسیع است، به همین دلیل طی دهه‌های اخیر محققان زیادی به تلاش و تحقیق در زمینه‌ی تخمین بارندگی توسط ماهواره پرداخته‌اند. استفاده از سنجش از دور در برآورد بارش پیشینه طولانی دارد. شرح کاملی از این مطالعات را می‌توان در کار لویزانی و همکاران^{۱۰} (۲۰۰۲) مشاهده کرد.

سروشیان و همکاران^{۱۱} (۲۰۰۰) با استفاده از داده‌های سنجش از دور و شبکه‌های عصبی مصنوعی، مدل تخمین بارش پرشین^{۱۲} PERSIANN را ارائه کردند. آن‌ها در تحقیق خود از تصاویر مادون قرمز ماهواره GOES و داده‌های بارش تجمعی روزانه ماهواره TRMM استفاده کردند. ضریب همبستگی بین بارش برآورد شده توسط مدل و داده‌های رادارهای هواشناسی مرکز ملی داده‌های اقلیمی آمریکا حدود ۰/۷ بود. همچنین آن‌ها در مناطق با تراکم بالای ایستگاه‌های هواشناسی، ضرایب همبستگی بالاتر (از ۰/۷۷ تا ۰/۹) را بین مقادیر مدل پرشین و داده‌های بارش ماهانه سازمان جهانی هواشناسی به دست آوردند.

هافمن و همکاران^{۱۳} (۲۰۰۶) مدل^{۱۴} TMPA را برای تخمین بارش ارائه دادند که از طریق ترکیب بارش برآورد شده از طریق ماهواره‌های مختلف و نیز بارش ثبت شده توسط ایستگاه‌های زمینی، داده‌های قابل قبولی تولید می‌کند. نتایج اعتبار سنجی اولیه نشان داد که این داده‌ها عملکرد قابل قبولی در مقیاس ماهانه دارند. همچنین در تشخیص حوادث روزانه بزرگ مقیاس کارایی خوبی دارند، ولی در برآورد مقدار بارش در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر و وقایع کوچک مقیاس نسبت به سایر روش‌های تخمین بارش ضعیف‌تر عمل می‌کنند.

فیداس و همکاران^{۱۵} (۲۰۰۸) برای تخمین بارش در مدیترانه از الگوریتم^{۱۶} CST استفاده کردند. این الگوریتم مبتنی بر داده‌های مادون قرمز است که با استفاده از داده‌های رادار بارش ماهواره TRMM، کالیبره شده است. مقایسه بین داده‌های به دست آمده از این روش و داده‌های زمینی نشان داد که ضریب همبستگی در فصل تابستان، بهار و تابستان به ترتیب ۰/۸۸، ۰/۷۶ و ۰/۷۳ می‌باشد ولی در فصل زمستان پایین است.

10- Levizzani et al

11- Sorooshian, et al

12- Precipitation Estimation from Remotely Sensed information using Artificial Neural Networks

13- Haffman, et al

14- TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA)

15- Feidas, et al

16- Convective-Stratiform Technique (CST)

هیل و همکاران^{۱۷} (۲۰۱۰) با استفاده از سنجش از دور چندطیفی به تشخیص و تخمین بارندگی در حوضه رود نیل در اتیوپی پرداختند و بدین منظور از داده‌های TRMM و تصاویر ماهواره متئوست استفاده نمودند. آن‌ها همچنین از مدل نمایی برای تخمین بارندگی از باند مادون قرمز حرارتی استفاده نموده و داده‌های به دست آمده از این مدل را با مشاهدات به دست آمده از ایستگاه‌های هواشناسی مقایسه نمودند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که برای تشخیص نرخ بارش بالاتر از یک میلی‌متر در ساعت، شاخص‌های دمای درخشندگی ۱۰/۸ میکرون و نرخ تغییر دمای درخشندگی ۱۰/۸ میکرون بهتر از سایر شاخص‌ها عمل می‌کند.

جوآنمرد و همکاران (۲۰۱۰) به منظور ارزیابی بارش برآورد شده توسط ماهواره TRMM، به مقایسه این داده‌ها با داده‌های بارش شبکه‌بندی شده زمینی در ایران در طول دوره زمانی ۱۹۹۸-۲۰۰۸ پرداختند. آن‌ها دو رژیم بارشی را بر روی دریای خزر و رشته کوه زاگرس تشخیص دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مقادیر بارش توسط TRMM، در کل کشور، منطقه دریای خزر و مناطق کوهستانی زاگرس به ترتیب ۰/۱۷، ۰/۳۹ و ۰/۱۵ میلی‌متر در روز کم‌تر برآورد شده و ضریب همبستگی آن‌ها نیز در این مناطق به ترتیب ۰/۷۷، ۰/۵۷ و ۰/۷۵ می‌باشد.

جنیفر و همکاران^{۱۸} (۲۰۱۰) با ترکیب باند مادون قرمز ماهواره متئوست و باند میکروویو غیرفعال ماهواره TRMM به تخمین بارندگی در تانزانیا پرداختند. آن‌ها برای ترکیب این داده‌ها از تابع رگرسیون استفاده کرده و برای این تابع، یک آستانه دمایی را به عنوان بالاترین حد دمای فوقانی ابر که در آن باران رخ می‌دهد، مشخص کردند. ضریب همبستگی این روش ترکیبی و داده‌های ایستگاه‌های زمینی، در حدود ۰/۸۰ می‌باشد.

المزروی (۲۰۱۱) به واسنجی بارش‌های TRMM در عربستان در بازه زمانی ۲۰۰۹-۱۹۹۸ پرداخت و به این نتیجه رسید که در مقیاس روزانه و سالانه، بارش‌های TRMM مطابقت زیادی با بارش ایستگاه‌های زمینی دارد ولی در دوره مرطوب (نوامبر تا آوریل)، این ماهواره بارش را کم‌تر برآورد می‌کند. ضریب همبستگی داده‌های TRMM و ایستگاه‌های زمینی در حدود ۰/۹۰ به دست آمد.

در ایران مطالعات انجام شده در مورد تخمین بارش، بیش‌تر با استفاده از روش‌های آماری، زمین آماری و شبکه‌های عصبی صورت گرفته است از این دسته می‌توان به کارهای رضایی بنفشه و رجایی اصل (۱۳۸۱)، اردکانی و همکاران (۱۳۸۴)، صادقی حسینی و همکاران (۱۳۸۴)، مرادی (۱۳۸۴)، فلاح قاله‌ری و خوشحال (۱۳۸۸)، قلی زاده و دارند (۱۳۸۹) و طوفانی و همکاران (۱۳۹۰) اشاره کرد.

17- Haile, et al

18- Jeniffer, et al

عده‌ای از پژوهشگران نیز از تصاویر ماهواره‌ای در برآورد بارش استفاده کرده‌اند. رسولی (۱۳۸۴) جهت مشخص نمودن الگوهای توزیع زمانی بارش‌های رعد و برقی شهر تبریز از آمارهای ایستگاه‌های زمینی و داده‌های TRMM استفاده کرد و به این نتیجه رسید که توزیع مکانی این نوع بارش‌ها توسط عوامل فیزیوگرافیک متأثر می‌شوند. رسولی و حاجی میررحیمی (۱۳۸۶) برای برآورد مقدار بارش در شمال غرب کشور از سیستم‌های رادار زمینی استفاده نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که همبستگی داده‌های رادار با داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک در شعاع ۲۰۰ کیلومتری برابر ۰/۸ و در شعاع ۱۵۰ کیلومتری برابر ۰/۹۵ است و با افزایش فاصله از سیستم مرکزی رادار از دقت داده‌ها کاسته می‌شود.

پورباقری و همکاران (۱۳۸۶) برای استخراج آب قابل بارش در ایستگاه مهرآباد، از باندهای مادون قرمز نزدیک تصاویر سنجنده MODIS^{۱۹} و برای اعتبارسنجی آب قابل بارش حاصل از تصاویر ماهواره‌ای، از داده‌های رادیوسوند استفاده نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که باندهای ۱۸ و ۱۹ MODIS، برای استخراج آب قابل بارش ابر در شرایط جوی ایستگاه مهرآباد مناسب می‌باشند.

عسکری و همکاران (۱۳۸۷) به منظور تخمین بارش در ایران، داده‌های رادار بارش ماهواره TRMM را با داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک کشور مقایسه، اعتبارسنجی و کالیبره کردند. آن‌ها از داده‌های سه ساعته بارش آذر ماه سال ۱۳۸۶ استفاده نموده و به این نتیجه رسیدند که عمده بارش‌های آذرماه در نواحی مرکز به سمت شمال غرب رخ داده است. همچنین میزان همبستگی بین مقادیر بارش ماهواره‌ای با بارش زمینی در حدود ۷۰ درصد می‌باشد.

آذری و همکاران (۱۳۸۸) برای برآورد بارش در حوزه رودخانه مادرسو در استان گلستان از تصاویر ماهواره NOAA سنجنده AVHRR^{۲۰} استفاده نمودند. آن‌ها برای تشخیص و طبقه‌بندی ابر و تخمین بارش، طبقه‌بندی شی‌گرا^{۲۱} و روش شاخص ابر^{۲۲} را مورد استفاده قرار داده و به این ترتیب میزان نرخ بارش توسط هر یک از ابرهای طبقه‌بندی شده را برآورد نمودند. نتایج تحقیق نشان داد که به کمک طبقه‌بندی ابر به روش شی‌گرا می‌توان به نتایج قابل قبولی دست یافت به طوری که در تحقیق آن‌ها دقت کلی طبقه‌بندی در حد ۰/۹ و ضریب کاپا در حد ۰/۸ برآورد شد.

19- Moderate- Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

20- Advanced Very High Resolution Radiometer

21- Object Oriented Classification

22- Cloud- Indexing Technique

متکان و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از روش همسان‌سازی احتمالات، داده‌های مادون قرمز ماهواره متئوست و میکروویو غیرفعال TRMM را ترکیب کرده و برای تخمین بارش در حوضه آبریز مادرسو در استان گلستان استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که بین تخمین ماهواره و مشاهدات زمینی همبستگی ۰/۵۳ وجود دارد. همچنین معیارهای آماری RMSE و MAE به ترتیب معادل ۹/۷۴ و ۶/۶۷ به دست آمد.

غضنفری مقدم و همکاران (۱۳۹۰) به مقایسه مدل PERSIANN با روش‌های درونیابی برای تخمین بارندگی در خراسان شمالی پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که همبستگی خروجی‌های PERSIANN با داده‌های واقعی بارندگی ۰/۸۰۵ است، در حالی که در روش معکوس فواصل ۰/۴۸۸ و برای کریجینگ ۰/۵۶۵ می‌باشد.

عرفانیان و همکاران (۱۳۹۲) به ارزیابی و کالیبراسیون داده‌های باران ماهواره TRMM در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران پرداختند. آنان برای ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای از معیارهای خطا (MAE، ME، R، RMSE) و شاخص‌های عملکرد (POD، FAR، SR، CSI و TSS) استفاده نموده و به این نتیجه رسیدند که ماهواره TRMM، مقادیر بارندگی ماهانه را در ۸۰ درصد از ایستگاه‌های سینوپتیک بیش‌تر از مقدار مشاهده‌ای برآورد می‌کند.

کثیرایی بروجردی (۱۳۹۲) به مقایسه داده‌های بارش ماهانه ماهواره‌ای به دست آمده از روش PERSIANN و داده‌های زمینی در شبکه‌ای با تفکیک زیاد در ایران پرداخت. مقایسه نقشه میانگین بارش سالانه این دو شبکه روی ایران نشان داد که PERSIANN الگوی تغییرات مکانی بارش سالانه را به خوبی می‌شناسد ولی مقدار آن را در اغلب نقاط ایران کم برآورد و در بعضی مناطق خشک کویری بیش‌برآورد می‌کند.

بررسی مطالعات انجام شده در ایران نشان می‌دهد که پژوهشگران کم‌تر به استفاده از سنجش از دور در برآورد بارندگی پرداخته‌اند. در این تحقیق سعی شده است با توجه به توانمندی مدل فوق و با به‌کارگیری داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای، کارایی آن‌ها را در حوضه دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار داد تا بتوان به تخمینی مناسب و یکپارچه برای منطقه مورد مطالعه دست یافت.

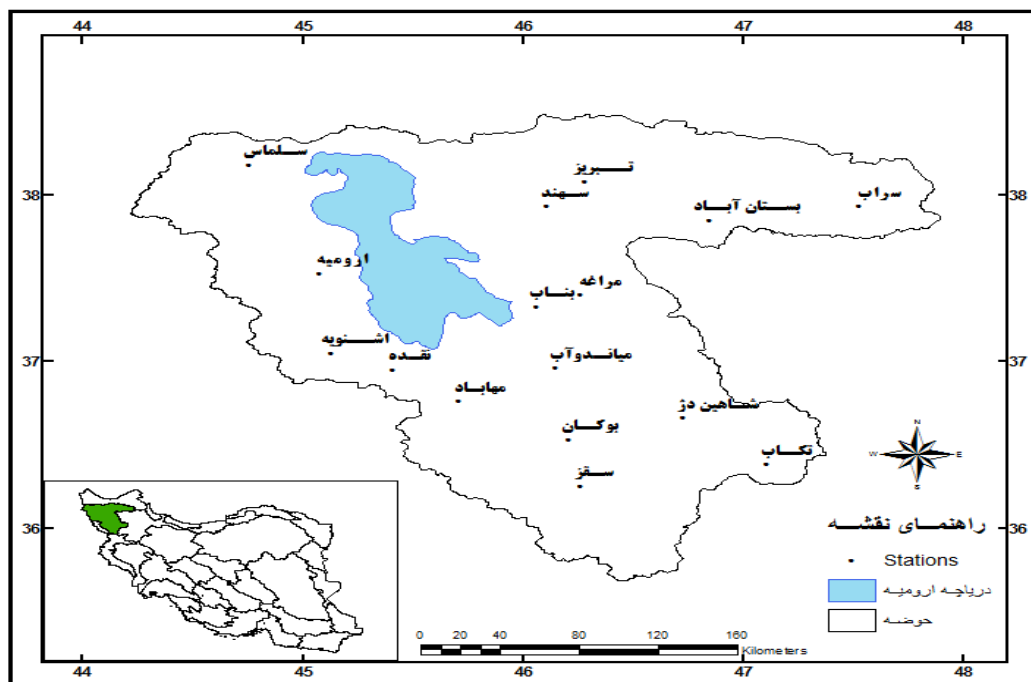
حوضه آبریز دریاچه ارومیه به سبب داشتن موقعیت خاص جغرافیایی، توپوگرافی ویژه، بارش‌های متنوع، قطب مهم کشاورزی و تراکم بالای جوامع روستایی و شهری اهمیت خاصی دارد. در یک دهه گذشته، کاهش چشم‌گیر ریزش‌های جوی، بروز خشک‌سالی‌ها، افزایش بی‌رویه طرح‌های توسعه و احداث سد‌های متعدد، بهره‌برداری از آب جهت مصارف کشاورزی و سایر کاربری‌ها، منجر به کاهش جریان‌ات ورودی به دریاچه ارومیه شده است که این امر مشکلات فراوانی را در حوضه آبریز این دریاچه به وجود آورده است. مجموع این عوامل ضرورت برآورد دقیق مقادیر بارندگی در این حوضه را آشکار می‌سازد. بنابراین این تحقیق در پی آن است تا با استفاده از محصول 3B42

ماهواره TRMM، مقدار بارندگی در حوضه را برآورد نموده و نتایج آن‌ها را با داده‌های ایستگاه‌های زمینی مقایسه نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وسعت حدود ۵۱۸۰۱ کیلومتر مربع بین مختصات $35^{\circ}40'$ تا $38^{\circ}30'$ عرض شمالی و $44^{\circ}14'$ تا $47^{\circ}53'$ طول شرقی واقع شده است. این حوضه در شمال غربی ایران قرار گرفته و به وسیله بخش شمالی کوه‌های زاگرس، دامنه جنوبی کوه سبلان و دامنه‌های شمالی، غربی و جنوبی کوه سهند احاطه شده است. این حوضه از سمت شمال به حوضه آبریز رودخانه ارس، از سمت شرق به حوضه آبریز رودخانه سفیدرود، از جنوب به حوضه آبریز رودخانه‌های سفیدرود و سیروان و از غرب به حوضه آبریز رودخانه زاب محدود گشته است. (مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۸۷: ۱).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز دریاچه ارومیه و ایستگاه‌های مورد مطالعه

بر اساس گزارش‌های موجود، دریاچه ارومیه به دلیل وقوع خشک‌سالی‌های دهه اخیر، کاهش مقادیر آب رودخانه‌های زهکش کننده آن و احداث سدهای مخرنی متعدد، در شرایط بحرانی قرار داشته و کاهش سطح آب

دریاچه و افزایش میزان تلفات تبخیر به دلیل گرم شدن هوا، باعث افزایش شوری آب و تاثیرات منفی آن بر اکوسیستم‌های منطقه شده است (برنامه مدیریت جامع دریاچه ارومیه، ۱۳۸۹: ۱۸). دریاچه ارومیه در سال‌های اخیر در معرض تغییرات قابل ملاحظه‌ای به‌ویژه در شرق و جنوب‌شرقی آن قرار گرفته است. به طور متوسط حدود ۲۳ درصد (تقریباً ۱۲۰۰ کیلومتر مربع) مساحت دریاچه کاهش یافته است، به طوری که در طول ده سال گذشته، به طور متوسط حدود ۶۰ کیلومتر از مجموع خطوط ساحلی دریاچه جابجا شده و جزیره اسلامی که بزرگ‌ترین جزیره این دریاچه است به طور کامل از آب خارج شده است (رسولی و همکاران، ۱۳۸۷: ۶۸). موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و پراکنش مکانی ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی واقع حوضه دریاچه ارومیه

ردیف	نام ایستگاه	ارتفاع (متر)	عرض جغرافیایی*	طول جغرافیایی
۱	ارومیه	۱۳۲۸	۳۷/۵۳	۴۵/۰۸
۲	اشنویه	۱۴۱۵/۹	۳۷/۰۵	۴۵/۱۳
۳	بستان آباد	۱۷۵۰	۳۷/۸۵	۴۶/۸۵
۴	بناب	۱۲۹۰	۳۷/۳۳	۴۶/۰۶
۵	بوکان	۱۳۸۶/۱	۳۶/۵۳	۴۶/۲۱
۶	تبریز	۱۳۶۱	۳۸/۰۸	۴۶/۲۸
۷	تکاب	۱۸۱۷/۲	۳۶/۳۸	۴۷/۱۱
۸	سراب	۱۶۸۲	۳۷/۹۳	۴۷/۵۳
۹	سقز	۱۵۲۲/۸	۳۶/۲۵	۴۶/۲۶
۱۰	سلماس	۱۳۳۷	۳۸/۱۸	۴۴/۷۶
۱۱	سهند	۱۶۴۱	۳۷/۹۳	۴۶/۱۱
۱۲	شاهین دژ	۱۳۹۵	۳۶/۶۶	۴۶/۷۳
۱۳	مراغه	۱۳۴۴	۳۷/۴۰	۴۶/۲۶
۱۴	مهاباد	۱۳۵۲	۳۶/۷۶	۴۵/۷۱
۱۵	میاندوآب	۱۳۰۰	۳۶/۹۶	۴۶/۱۵
۱۶	نقده	۱۳۳۸	۳۶/۹۵	۴۵/۴۱

* عرض و طول جغرافیایی بر حسب درجه اعشاری می‌باشند.

داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های زمینی

در این تحقیق داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک در سطح حوضه دریاچه ارومیه مورد نیاز است. بنابراین، پس از تهیه آمار خام از ادارات هواشناسی استان‌های آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی و شهرستان سقز در استان کردستان،

پارامتر مذکور در مقیاس زمانی ۶ ساعته برای ۱۶ ایستگاه سینوپتیک واقع در حوضه در دوره آماری ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ استخراج شد. برای بررسی همگن بودن داده‌ها از آزمون توالی ران تست استفاده شد. مشخصات جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه‌های هواشناسی انتخاب شده در (جدول ۱) ارائه شده است. به منظور تعیین بارندگی‌های فراگیر در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، ابتدا داده‌های ساعتی کلیه ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه بررسی شد و در نهایت ۶ واقعه بارشی فراگیر در سطح حوضه مطابق (جدول ۲) انتخاب گردید. منظور از بارش فراگیر بارشی است که حداقل ۷۰٪ از ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه در آن ساعت، بارشی مساوی یا بیش‌تر از ۱ میلی‌متر را ثبت کرده باشند.

جدول ۲- بارش‌های فراگیر انتخاب شده در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

واقع بارش	سال	ماه	روز	تعداد مشاهدات	میانگین بارش (mm)
۱	۲۰۱۰	می	۲-۳	۷	۲۲/۹
۲	۲۰۱۰	مارس	۱-۲	۶	۱۶/۷
۳	۲۰۰۹	نوامبر	۱۷-۱۹	۱۲	۳۲/۶
۴	۲۰۰۸	اکتبر	۲۴-۲۵	۸	۳۱/۴
۵	۲۰۰۶	اکتبر	۲۸-۳۱	۱۵	۴۶/۴
۶	۲۰۰۶	فوریه	۳-۴	۸	۴۷/۹

داده‌های بارش TRMM

ماهواره TRMM، محصول مشترک کشورهای ژاپن و آمریکا است که در ۲۷ نوامبر سال ۱۹۹۷ در یک مدار تقریباً دایره‌ای^{۳۳} در ارتفاع ۴۰۳ کیلومتری با زاویه میل ۳۵ درجه نسبت به مدار استوا و با دوره گردش زمانی ۹۱/۵ دقیقه به فضا پرتاب شده است. هدف از پرتاب این ماهواره اندازه‌گیری بارندگی در سطح اقیانوس‌ها و دریاها بود. علاوه بر این از اطلاعات این ماهواره می‌توان در اندازه‌گیری بارش در سطح خشکی‌ها و مخصوصاً مناطقی که دارای آمار و اطلاعات ثبت شده مناسبی نمی‌باشند استفاده نمود. با استفاده از تصاویر ارسالی این ماهواره امکان ثبت و تجزیه و تحلیل مداوم مقادیر بارش در سطح زمین فراهم می‌گردد. میزان تفکیک مکانی بارش‌های ثبت شده، حدود

۰/۲۵ درجه است. در این مطالعه از داده‌های نرخ بارندگی سه ساعته 3B42-V6 این ماهواره با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه استفاده شده است.

شاخص‌های عملکرد^{۲۴}

برای بررسی صحت عملکرد ماهواره TRMM در برآورد بارش، از شاخص‌های عملکرد استفاده گردیده است. این شاخص‌ها با استفاده از جدول توافقی ۲×۲ تعریف می‌شوند (ویلکز^{۲۵}، ۲۰۰۶: ۲۶۰؛ جولیف و استیفنسون^{۲۶}، ۲۰۱۲: ۳۳). جدول (۳-۵) احتمال برآورد بارش توسط ماهواره TRMM را در مقابل بارش ثبت شده توسط ایستگاه‌های زمینی نشان می‌دهد. در این جدول a تعداد نقاطی است که بارش توسط هر دو روش در آن‌ها ثبت شده است و تحت عنوان نقاط بارانی مشخص می‌شوند؛ b تعداد نقاطی است که بارش در آن‌ها فقط توسط TRMM ثبت شده است. c تعداد نقاطی است که در آن‌ها بارش زمینی ثبت شده ولی ماهواره TRMM در این نقاط، بارشی را نشان نمی‌دهد و d تعداد نقاطی است که بارش توسط هیچ یک از روش‌ها در آن‌ها ثبت نشده است.

جدول ۳- جدول توافقی (جولیف و استیفنسون، ۲۰۱۲: ۳۳)

		بارش ثبت شده در ایستگاه‌ها	
		بارش	بدون بارش
برآورد بارندگی توسط TRMM	بارش	a	b
	بدون بارش	c	d

بعد از بررسی بارش زمینی و داده‌های 3B42-V6 ماهواره TRMM برای ساعات و تاریخ‌های موردنظر، جدول احتمال تشکیل شده و شاخص‌های عملکرد زیر اعمال گردیده است.

نسبت صحیح^{۲۷} (PC)

یکی از ساده‌ترین شاخص‌ها برای ارزیابی دقت رویدادهای پیش‌بینی شده، شاخص نسبت صحیح می‌باشد که کسری از همه پیش‌بینی‌های درست است (رابطه ۳-۱). PC نسبت تعداد نقاط بارانی و بدون باران است که در هر دو روش به‌طور صحیح برآورد شده است (ویلکز، ۲۰۰۶: ۲۶۲).

$$PC = \frac{a+d}{a+b+c+d} \quad \text{رابطه (۱)}$$

شاخص خطا یا اریبی (bias)

شاخص اریبی یا مقایسه میانگین پیش‌بینی با میانگین مشاهده، معمولاً به‌عنوان یک نسبت برای تأیید جداول احتمالی استفاده می‌شود. Bias در واقع نسبت برآوردهای صحیح به مشاهدات صحیح می‌باشد (رابطه ۲-۳).

$$bias = \frac{a+b}{a+c} \quad \text{رابطه (۲)}$$

اگر مقدار Bias بزرگ‌تر از یک باشد نشان دهنده این است که TRMM تعداد نقاط بارانی را بیش‌تر تخمین زده است و اگر مقدار Bias کوچک‌تر از یک باشد نشان دهنده این است که TRMM تعداد نقاط را کم‌تر برآورد کرده است و اگر مقدار آن برابر ۱ باشد نشانگر عدم وجود خطا می‌باشد (ویلکز، ۲۰۰۶: ۲۶۴).

نسبت هشدار اشتباه^{۲۸} (FAR)

نسبت هشدار اشتباه (FAR)، نسبت تعداد بارش ثبت شده زمینی نادرست به کل بارش‌های ثبت شده می‌باشد و نشان‌دهنده قسمتی از نقاط بارانی برآورد شده توسط TRMM است که در ایستگاه زمینی فاقد بارندگی می‌باشد.

$$FAR = \frac{b}{a+b} \quad \text{رابطه (۳)}$$

FAR دارای جهت‌گیری منفی است بدین صورت که مقادیر کوچک‌تر آن، برآورد بهتری را نشان می‌دهد. مقدار صفر، بهترین حالت ممکن و بیانگر پیش‌بینی کامل نقاط بارانی توسط TRMM است و بدترین حالت FAR، یک می‌باشد (ویلکز، ۲۰۰۶: ۲۶۴).

احتمال تشخیص^{۲۹} (POD)

POD نسبت تعداد بارش برآوردی صحیح توسط TRMM به کل بارش‌های ثبت شده در ایستگاه‌های زمینی می‌باشد (رابطه ۳-۴). این شاخص بر خلاف شاخص FAR دارای جهت‌گیری مثبت می‌باشد و مقدار آن بین ۰ و ۱ متغیر

28- False Alarm Ratio

29- Probability of Detection

است. اگر POD مساوی یک باشد بیانگر این است که TRMM، نقاط بارانی را به درستی برآورد کرده است (هیل و همکاران، ۲۰۱۰: ۵۷۹).

$$\text{POD} = \frac{a}{a+c} \quad \text{رابطه (۴)}$$

نمره مهارت هیک (HSS)^{۳۰}

یکی از متداول‌ترین نمرات مهارت برای خلاصه کردن جداول احتمالی مربع، نمره مهارت هیک (HSS) می‌باشد (رابطه ۳-۵).

$$\text{HSS} = \frac{2(ad-bc)}{(a+c)(c+d)+(a+b)(b+d)} \quad \text{رابطه (۵)}$$

مرجع اندازه‌گیری دقت و صحت در HSS، شاخص نسبت صحیح است که می‌توان آن را با پیش‌بینی‌های تصادفی که از نظر آماری، مستقل از مشاهدات هستند، به دست آورد. اگر HSS=1 باشد نشان‌دهنده مطابقت کامل بارش‌های برآوردی با بارش‌های ثبت شده می‌باشد (ویلکز، ۲۰۰۶: ۲۶۵).

معیارهای آماری خطا برای ارزیابی مدل

برای مقایسه بارش‌های برآوردی TRMM با بارش‌های ایستگاه‌های زمینی از معیارهای آماری میانگین خطا (ME)، میانگین خطای مطلق (MAE) و جذر میانگین توان دوم خطا (RMSE) استفاده گردید که روابط آن‌ها به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{ME} = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{N} \quad \text{رابطه (۶)}$$

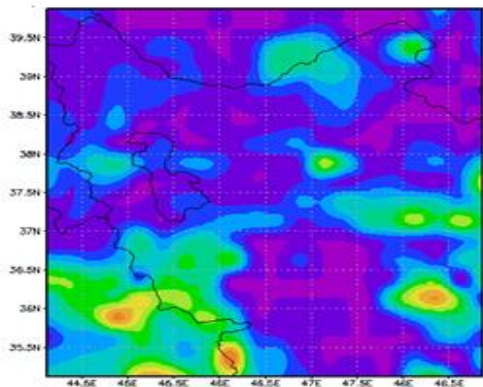
$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^N |S_i - O_i|}{N} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2} \quad \text{رابطه (۸)}$$

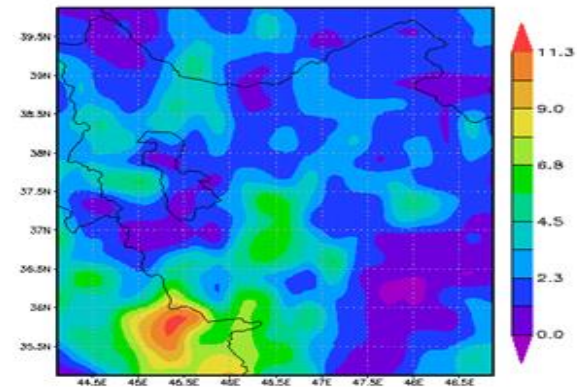
که S_i مقدار بارندگی برآورد شده توسط TRMM، O_i مقدار بارندگی مشاهده‌ای و N تعداد کل مشاهدات می‌باشد.

یافته‌ها و بحث

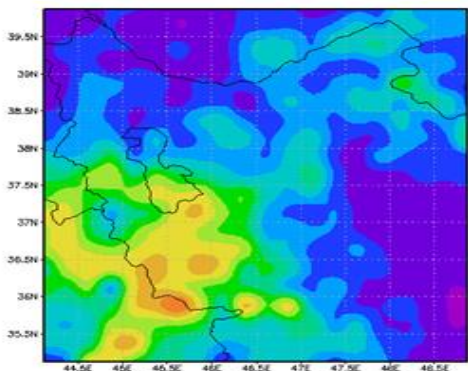
در این تحقیق برای ارزیابی مقادیر بارندگی برآورد شده ماهواره TRMM و بارش ثبت شده ایستگاه‌های زمینی در حوضه دریاچه ارومیه، از محصولات 3B42 (سه ساعته) ماهواره TRMM استفاده شد. ابتدا مقادیر بارش برای ساعت و تاریخ مورد نظر با فرمت Netcdf دریافت شد. (شکل ۲ تا ۷) مقادیر بارش ثبت شده توسط این ماهواره را به ترتیب برای هر شش واقعه بارشی نشان می‌دهد. همان‌طور که در نقشه‌ها ملاحظه می‌شود در این روزها در کل حوضه، بارش برآورد شده توسط ماهواره TRMM وجود دارد که با وقایع بارشی استخراج شده از ایستگاه‌های زمینی مطابقت دارد (جدول ۱).



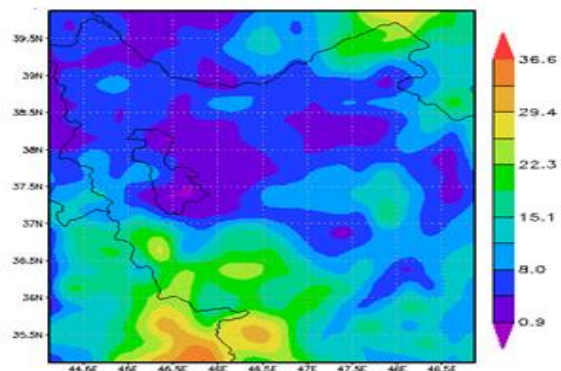
شکل ۱: نقشه بارش به دست آمده از TRMM برای واقعه اول



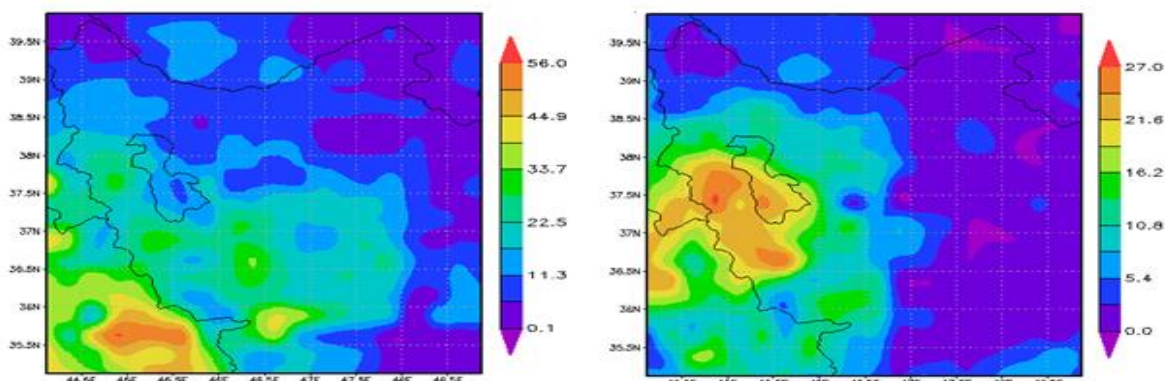
شکل ۲: نقشه بارش به دست آمده از TRMM برای واقعه دوم



شکل ۳: نقشه بارش به دست آمده از TRMM برای واقعه سوم



شکل ۴: نقشه بارش به دست آمده از TRMM برای واقعه چهارم



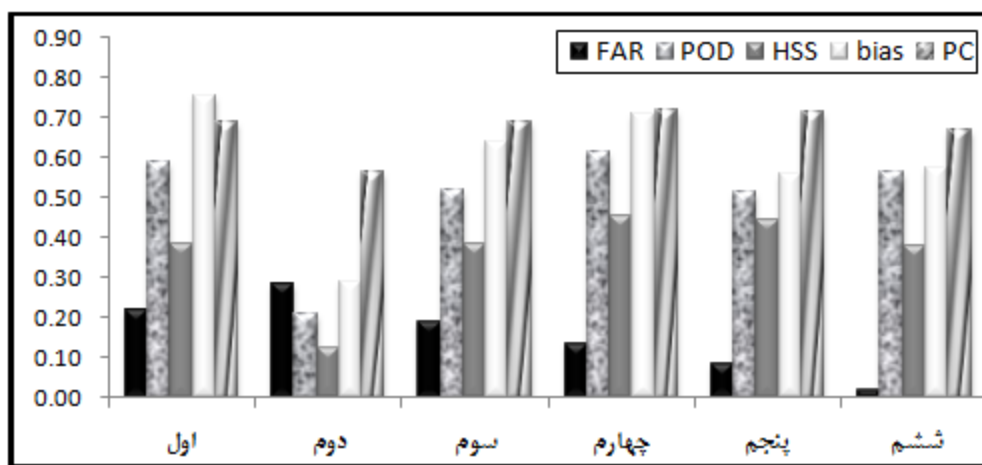
شکل ۶: نقشه بارش به دست آمده از TRMM برای واقعه پنجم شکل ۷: نقشه بارش به دست آمده از TRMM برای واقعه ششم

داده‌های بارش TRMM در محیط ArcGIS 10 به نقشه رستری تبدیل شده و مقادیر بارش سه ساعته تمام ایستگاه‌ها استخراج شد. با توجه به این که مقادیر بارندگی ایستگاه‌های زمینی در مقیاس شش ساعته در دسترس بود، فایل‌های رستری سه ساعته در نرم افزار ArcGIS با یکدیگر ادغام شده و مقادیر بارش شش ساعته ایستگاه‌ها نیز به دست آمد. بررسی صحت عملکرد ماهواره TRMM در برآورد بارش در هر واقعه بارش با استفاده از آمار مشاهده‌ای انجام گرفت. (جدول ۴) میانگین شاخص‌های عملکرد را در وقایع بارشی مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار Bias در تمامی دوره‌ها کم‌تر از یک می‌باشد پس می‌توان نتیجه گرفت که ماهواره TRMM میزان بارش را کم‌تر برآورد کرده است. مقادیر بالای POD و مقادیر پایین FAR نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول این ماهواره در برآورد بارش می‌باشد.

جدول ۴- نتایج بررسی عملکرد ماهواره TRMM در برآورد بارش

واقعه بارش	bias	POD	FAR	PC	HSS
۱	۰/۷۵	۰/۵۹	۰/۲۲	۰/۶۹	۰/۳۸
۲	۰/۲۹	۰/۲۱	۰/۲۹	۰/۵۶	۰/۱۳
۳	۰/۶۴	۰/۵۲	۰/۱۹	۰/۶۹	۰/۳۸
۴	۰/۷۱	۰/۶۱	۰/۱۳	۰/۷۲	۰/۴۵
۵	۰/۵۶	۰/۵۱	۰/۰۸	۰/۷۱	۰/۴۴
۶	۰/۵۷	۰/۵۶	۰/۰۲	۰/۶۷	۰/۳۸

مطابق شاخص PC، ماهواره TRMM در ۶۰ تا ۷۰ درصد موارد، بارش نقاط را به درستی برآورد کرده است. اگر مقدار HSS باشد مطابقت کامل بارش‌های برآوردی ماهواره با بارش‌های ثبت شده مطابقت کامل خواهد داشت و با توجه به مقادیر HSS در تمام دوره‌ها می‌توان گفت مطابقت نسبی بین داده‌های ماهواره‌ای با داده‌های مشاهده شده ایستگاه‌های زمینی وجود دارد (شکل ۸). عملکرد نهایی ماهواره TRMM در برآورد بارش برای کلیه ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه دریاچه ارومیه و تمام وقایع بارش نیز محاسبه شد. میانگین شاخص‌های bias، POD، FAR، PC و HSS در کل حوضه به ترتیب ۰/۶۰، ۰/۵۲، ۰/۱۳، ۰/۶۸ و ۰/۳۹ به دست آمد.



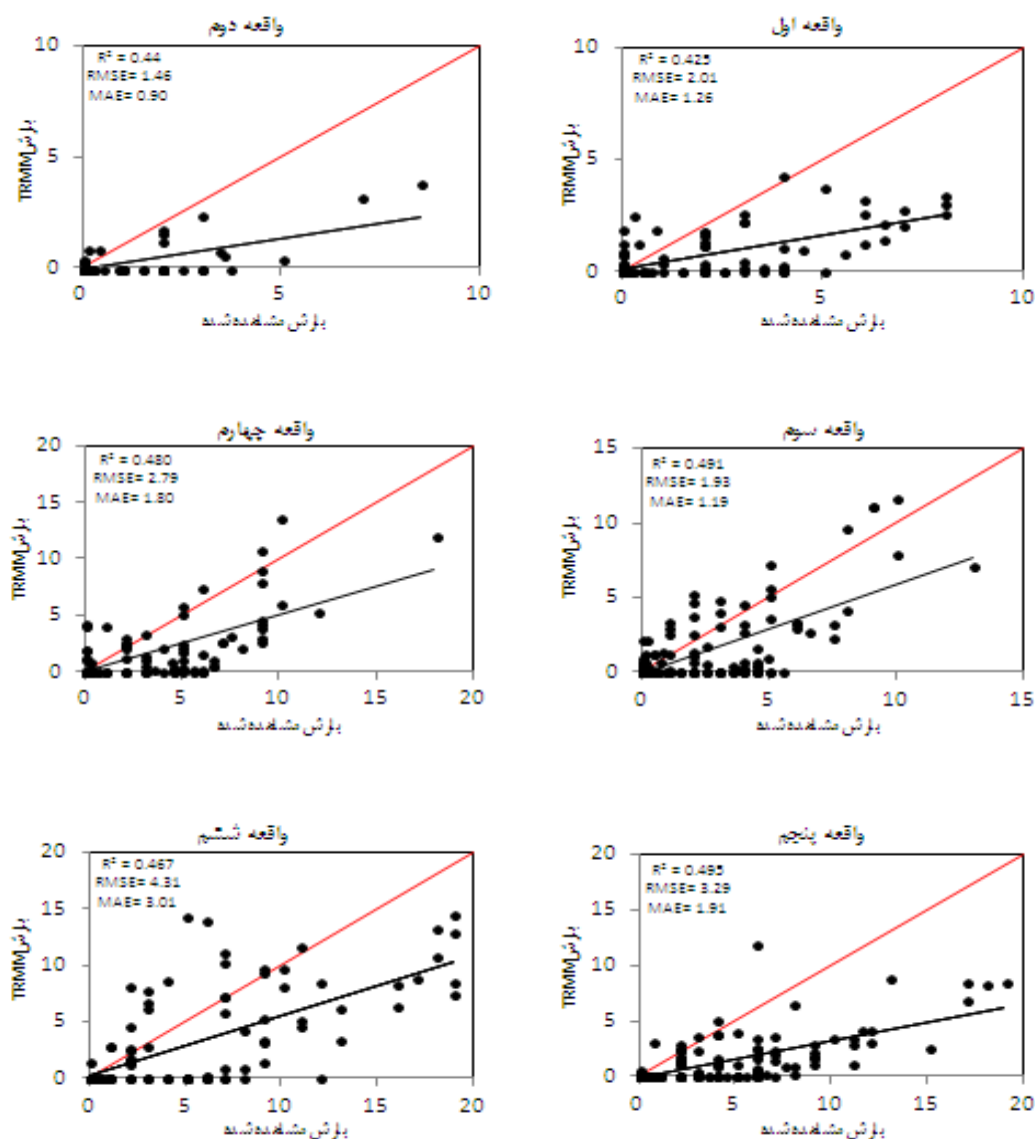
شکل ۸: شاخص‌های عملکرد ماهواره TRMM برای وقایع بارش مورد مطالعه

اعتبار سنجی داده‌های بارش برآوردی در ایستگاه‌ها در هر واقعه بارش با استفاده از آمار مشاهده‌ای انجام گرفت. جدول ۵ میانگین معیارهای خطا را در وقایع بارشی مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در تمام دوره‌ها مقدار RMSE و MAE کم‌تر از ۵ میلی‌متر در روز است.

جدول ۵- نتایج اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ای (TRMM) و زمینی

واقعه بارش	R ²	RMSE	MAE	ME
۱	۰/۴۲۵	۲/۰۱	۱/۲۶	۱/۰۵
۲	۰/۴۴	۱/۴۶	۰/۹۰	۰/۸۵
۳	۰/۴۹۱	۱/۹۳	۱/۱۹	-۰/۷۷
۴	۰/۴۸۰	۲/۷۹	۱/۸۰	-۱/۳۴
۵	۰/۴۹۵	۳/۲۹	۱/۹۱	۱/۷۹
۶	۰/۴۶۷	۴/۳۱	۳/۰۱	۲/۰۳

نمودار پراکنش مقادیر بارش مشاهده شده زمینی و برآورد شده توسط TRMM برای شش واقعه بارش در (شکل ۹) نشان داده شده است. خط نیمساز در هر نمودار، بیانگر خط ۱:۱ یا خط برازش ایده آل می‌باشد. نقاط بالاتر از این خط بیانگر تخمین بالاتر ماهواره TRMM و نقاط پایین‌تر از آن بیانگر تخمین پایین‌تر این ماهواره در مقایسه با مقادیر مشاهده‌ای یا ثبت شده می‌باشد. بهترین حالت تخمین وقتی است که بیش‌تر نقاط مشاهده‌ای و برآورد شده روی خط برازش ایده آل یا مجاور آن پراکنش داشته باشند. مطابق این نمودارها، ضرایب تبیین (R^2) از ۰/۴۲۵ تا ۰/۴۹۵ تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود در تمام نمودارها، نقاط بارش مشاهده‌ای و بارش ماهواره‌ای پایین‌تر از خط برازش ایده‌آل قرار دارند که تخمین پایین‌تر ماهواره TRMM را نشان می‌دهد.

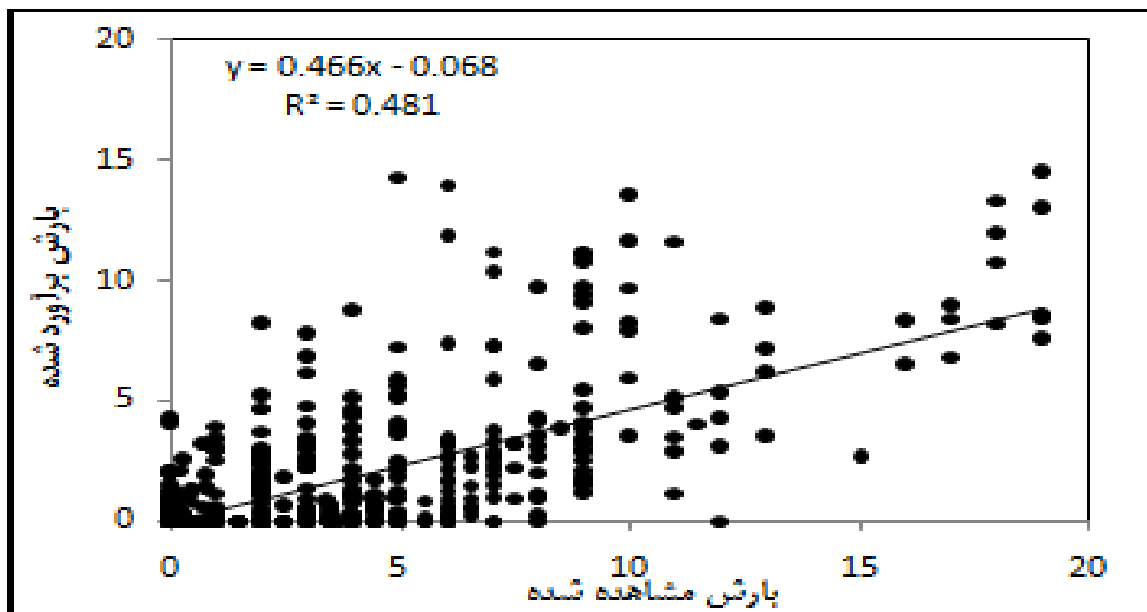


شکل ۹: پراکنش مقادیر بارش مشاهده‌ای و برآورده شده به تفکیک شش واقعه بارشی در حوضه

برای تعیین میزان خطای کلی بارش TRMM، میانگین معیارهای RMSE، MAE و ME در تمام وقایع بارشی و کلیه ایستگاه‌های هواشناسی حوضه دریاچه ارومیه محاسبه شد که به ترتیب برابر ۲/۸۵، ۱/۷۰ و ۱/۳۴ میلی‌متر می‌باشند. نتایج (جدول ۵) و (شکل ۹) نیاز به کالیبراسیون (واسنجی) برآوردهای ماهواره TRMM را نشان می‌داد که با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی و رگرسیون خطی، کالیبراسیون صورت گرفت (شکل ۱۴). معادله خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده‌ای (Y) و مقادیر تخمین زده شده توسط TRMM (X) به صورت رابطه زیر به دست آمد:

$$Y = 0.466x + 0.068 \quad R^2 = 0.48 \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

از این رابطه می‌توان برای تصحیح خطای ماهواره TRMM در برآورد بارش در هر یک از ایستگاه‌های هواشناسی استفاده کرد. مطابق این رابطه، ضریب همبستگی و ضریب تبیین داده‌های TRMM به ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۴۸ می‌باشد که نشان دهنده انطباق نسبی داده‌های بارش TRMM با مقادیر زمینی می‌باشد. نتایج مشابهی در مطالعات انجام شده توسط حاجی میررحیمی، ۱۳۸۶؛ عسگری و همکاران، ۱۳۸۷؛ جوانمرد و همکاران، ۲۰۱۰ می‌توان ملاحظه کرد.



شکل ۱۰: تغییرات مقادیر بارش مشاهده شده نسبت به بارش TRMM (خط مورب، خط رگرسیون است)

جدول ۶- تحلیل واریانس رگرسیون خطی بین مقادیر بارش زمینی و مقادیر بارش TRMM

منابع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	نسبت F	sig
رگرسیون	۲۳۳۴/۰۲۶	۱	۲۳۳۴/۰۲۶	۸۲۵/۶۰۲	۰/۰۰۰*
مانده‌ها	۲۵۳۶/۹۷۱	۸۸۶	۲/۸۶۳		
کل	۴۹۰۰/۹۹۷	۸۸۷			

* در سطح ۹۹ درصد اطمینان معنی دار است.

برای برآورد میزان دقت در برآورد فراسنج‌های رگرسیون از آزمون تحلیل واریانس استفاده شده است. این تحلیل بر پایه انحرافات برآوردها از مقادیر واقعی انجام می‌گیرد. نتایج تجزیه واریانس رگرسیون خطی بین مقادیر بارش زمینی و مقادیر بارش TRMM در (جدول ۶) آورده شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود نسبت F در سطح ۹۹ درصد اطمینان معنی دار است و نشان از مطابقت معنی دار مقادیر بارش زمینی با مقادیر بارش TRMM دارد.

از آنجا که هر یک از ضرایب شیب خط (b) و عرض از مبدأ (a) متغیر تصادفی به شمار می‌آیند، می‌توان برای آن‌ها میانگین و واریانس تصور نمود. به همین دلیل می‌توان آزمون معنی‌داری را بر روی این ضرایب انجام داد. جدول (۴-۱۱) نتایج آزمون t مربوط به ضرایب رگرسیون خطی بین مقادیر بارش زمینی و مقادیر بارش TRMM را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، شیب خط رگرسیون نیز در سطح ۹۹ درصد اطمینان معنی دار است. مقدار P-value برای آزمون معنی دار بودن شیب خط رگرسیون ۰/۰۰۰ به دست آمده است.

جدول ۷- آزمون معنی‌داری ضرایب رگرسیون خطی بین مقادیر بارش زمینی و مقادیر بارش TRMM

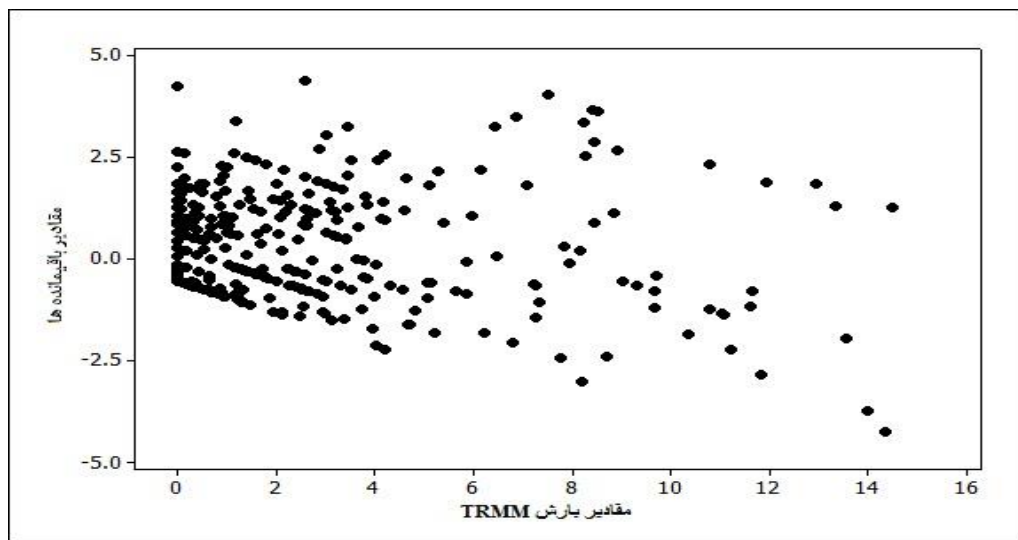
پارامتر	ضرایب	خطای استاندارد	t	sig
عرض از مبدأ	-۰/۰۶۸	۰/۰۶۹	-۱/۰۵۷	۰/۲۹۱
بارش زمینی	۰/۴۶۶	۰/۰۱۶	۲۸/۷۳۴	۰/۰۰۰

برای کشف هر نوع ناسازگاری بین داده‌های واقعی و مدل رگرسیون برازش یافته نیاز به آزمون مانده‌های رگرسیون می‌باشد. برای بررسی استقلال مانده‌ها از همدیگر و تصادفی بودن آن‌ها از آزمون دوربین-واتسون استفاده گردید. اگر مقدار به دست آمده بین ۱/۵ تا ۲/۵ باشد می‌توان تقریباً به استقلال مانده‌ها از همدیگر پی برد. (جدول ۸) نتیجه آزمون فوق را نشان می‌دهد.

جدول ۸- آزمون دوربین-اتسون برای استقلال مانده‌ها

مدل	R	R2	R2 تعدیل شده	خطای استاندارد	دوربین- واتسون
۱	۰/۶۹۵	۰/۴۸۲	۰/۴۸۲	۱/۶۹۲	۱/۵۳۱

(شکل ۱۱) هم تغییرات مقادیر باقی مانده‌ها را در برابر مقادیر بارش TRMM نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در اینجا نیز تغییرات مقادیر باقی مانده‌ها در برابر مقادیر بارش TRMM، کاملاً تصادفی و نرمال است و نشان از دقت بالای مدل در پیش بینی بارش دارد.



شکل ۱۱: تغییرات مقادیر باقیمانده‌ها نسبت به مقادیر بارش TRMM بر حسب میلی‌متر

نتیجه‌گیری

برآورد بارندگی در مناطق فاقد آمار و یا مناطق دارای ایستگاه‌های باران سنجی محدود و با پراکنش نامنظم، از موارد ضروری در تحقیقات هیدروکلیماتولوژی و منابع آب می‌باشد. این مسئله در کشور ما که فاقد شبکه منظم و متراکم ثبت بارش به ویژه در مناطق مرتفع می‌باشد، اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند. امروزه، با ظهور فن‌آوری‌های پیشرفته در هواشناسی ماهواره‌ای، روش‌های متعددی در زمینه برآورد مقادیر بارندگی مطرح شده است. مزیت بررسی بارندگی با استفاده از روش‌های سنجش از دور، شناخت بهتر پدیده بارش و پارامترهای موثر در آن در یک گستره مکانی وسیع است.

در تحقیق حاضر، به منظور بررسی قابلیت داده‌های ماهواره‌ای در برآورد بارش از محصول بارش 3B42 ماهواره TRMM استفاده گردید. داده‌های این ماهواره به طور گسترده‌ای در هواشناسی و اقلیم‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد و قبل از هرگونه استفاده عملیاتی لازم است با اطلاعات زمینی مقایسه، صحت‌سنجی، اعتبار‌سنجی و تا حد امکان کالیبره شوند. برای بررسی صحت عملکرد ماهواره TRMM در برآورد بارش، از شاخص‌های عملکرد که با استفاده از جدول احتمال 2×2 تعریف می‌شوند استفاده گردید. میانگین شاخص‌های عملکرد خطا (bias)، احتمال تشخیص (POD)، نسبت اختطار اشتباه (FAR)، نسبت تشخیص درست (PC) و نمره مهارت هیک (HSS) در کل حوضه به ترتیب $0/60$ ، $0/52$ ، $0/13$ ، $0/68$ و $0/39$ به‌دست آمد. اعتبارسنجی داده‌های بارش TRMM با استفاده از معیارهای آماری میانگین خطا (ME)، میانگین خطای مطلق (MAE) و جذر میانگین توان دوم خطا (RMSE) صورت گرفت که به ترتیب برابر $-1/34$ ، $1/70$ و $2/85$ میلی‌متر می‌باشند. کالیبراسیون (واسنجی) برآوردهای ماهواره TRMM نیز با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی و رگرسیون خطی صورت گرفت و ضریب همبستگی آن $0/69$ به‌دست آمد که نشان دهنده انطباق نسبی داده‌های بارش TRMM با مقادیر زمینی می‌باشد. تحلیل رگرسیون با استفاده از آماره F و آزمون معنی‌داری شیب خط رگرسیون با استفاده از آماره t نشانگر مطابقت معنی‌دار داده‌های TRMM با مقادیر زمینی در سطح اطمینان ۹۹ درصد می‌باشد. نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های علمی سایر پژوهشگران همخوانی دارد (حاجی میررحیمی، ۱۳۸۶؛ عسگری و همکاران، ۱۳۸۷؛ جوانمرد و همکاران، ۲۰۱۰) این تحقیق در مقیاس زمانی شش ساعته انجام شد و لذا به سایر محققان پیشنهاد می‌شود که داده‌های بارش TRMM را در مقیاس زمانی روزانه، ماهانه و سالانه در سایر حوضه‌های آبریز ایران مورد ارزیابی قرار دهند.

منابع

- آذری، ح؛ متکان، ع؛ شکیبا، ع؛ پورعلی، ح (۱۳۸۸)، «شبیه‌سازی و هشدار سیل با تلفیق مدل‌های آب‌شناسی در GIS و برآورد بارش از طریق سنجش از دور»، *فصلنامه زمین‌شناسی*، شماره ۳، صص ۳۹-۵۱.
- اردکانی، ح؛ مرادی، م. و؛ قائمی، ه (۱۳۸۴)، «تخمین بارش به وسیله سرعت قائم و آب بارش شو»، *تحقیقات جغرافیایی*، شماره ۲۰، صص ۶۵-۵۰.
- پورباقری، س؛ مبشری، م؛ فرج‌زاده، م (۱۳۸۶)، «امکان سنجی استفاده از داده‌های رادیو ساوند و تصاویر ماهواره‌ای MODIS در برآورد آب قابل بارش کلی (منطقه مورد مطالعه: ناحیه تهران)»، *مجموعه مقالات همایش ژئوماتیک تهران، سازمان نقشه برداری کشور*، صص ۴۹۷-۴۸۱.
- رسولی، ع (۱۳۸۴)، «مدل‌سازی بارش‌های رعد و برقی محدوده شهر تبریز از دیدگاه ریسک وقوع سیلاب»، *کنفرانس بین‌المللی مخاطرات زمین، بلایای طبیعی و راهکارهای مقابله با آن‌ها*، دانشگاه تبریز، مهرماه ۱۳۸۴.
- رسولی، ع (۱۳۹۰)، «مقدمه‌ای بر هواشناسی و اقلیم‌شناسی ماهواره‌ای»، تبریز، انتشارات دانشگاه تبریز، ۴۵۵ ص.
- رسولی، ع؛ حاجی میررحیمی، م (۱۳۸۶)، «کاربرد سیستم‌های رادار زمینی در برآورد میزان بارش (مطالعه‌ی موردی شمال غرب ایران)»، *فصلنامه آمایش*، شماره ۳، صص ۸۷-۹۵.
- رسولی، علی اکبر؛ عباسیان، شیرزاد؛ جهانبخش، سعید (۱۳۸۷)، «پایش نوسان‌های سطح آب دریاچه ارومیه با پردازش تصاویر ماهواره‌ای چند سنجنده‌ای و چند زمانه‌ای»، *مدرس*، شماره ۲، صص ۸۲-۵۳.
- رضایی بنفشه، م؛ رجایی اصل، ع (۱۳۸۱)، «تحلیل و مدل‌بندی بارش در حوضه آبریز قره سو»، *مدرس*، شماره ۴، صص ۷۱-۹۳.
- صادقی حسینی، ع؛ حجام، س؛ تفنگ ساز، پ (۱۳۸۴)، «ارتباط آب قابل بارش ابر و بارندگی دیده بانی شده در منطقه تهران»، *مجله فیزیک زمین و فضا*، شماره ۳۱، صص ۲۱-۱۳.
- طوفانی، پ؛ مساعدی، ا؛ فاخری فرد، ا (۱۳۹۰)، «پیش‌بینی بارندگی با استفاده مستقیم از نظریه موجک (مطالعه موردی: ایستگاه باران سنجی زرینگل استان گلستان)»، *نشریه آب و خاک*، شماره ۵، صص ۱۲۲۶-۱۲۱۷.

- عرفانیان، م؛ کاظم پور، س؛ حیدری، ح (۱۳۹۲)، «ارزیابی و کالیبراسیون باران ماهواره TRMM در مناطق خشک و نیمه خشک ایران»، *جغرافیا (برنامه ریزی منطقه‌ای)*، شماره ۳، صص ۸۲-۹۵.
- عسگری، ق؛ پورباقری، م؛ مبارکی، ز (۱۳۷۸)، «اعتبار سنجی داده‌های بارش به‌دست آمده از ماهواره TRMM به کمک ایستگاه‌های خودکار هواشناسی در آذر ماه ۸۶»، *مجموعه مقالات همایش ژئوماتیک تهران*، سازمان نقشه برداری کشور، ۱۵۲۳ ص.
- غضنفری مقدم، م؛ علیزاده، ا؛ موسوی بایگی، م؛ فریدحسینی، ع؛ بنیان اول، م (۱۳۹۰)، «مقایسه مدل PERSIANN با روش‌های درون‌یابی به منظور کاربرد در تخمین مقادیر بارندگی روزانه»، *نشریه آب و خاک*، شماره ۱، صص ۲۱۵-۲۰۷.
- فلاح قالهری، غ؛ خوشحال، ج (۱۳۸۸)، «پیش‌بینی بارش بهاره استان خراسان رضوی بر اساس سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی»، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، شماره ۶۹، صص ۱۱۵-۱۳۳.
- قلی‌زاده، م. ح؛ دارند، م (۱۳۸۹)، «پیش‌بینی بارش ماهانه با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (مورد مطالعه: تهران)»، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، شماره ۷۱، صص ۶۳-۵۱.
- کتیرایی بروجردی، پ (۱۳۹۲)، «مقایسه داده‌های بارش ماهانه ماهواره‌ای و زمینی در شبکه‌ای با تفکیک زیاد روی ایران»، *مجله ژئوفیزیک ایران*، شماره ۴، صص ۱۶۰-۱۴۹.
- متکان، ع؛ شکیبیا، ع؛ عاشورلو، د؛ بذاق جمالی، ج؛ محمدیان، و (۱۳۸۸)، «قابلیت داده‌های ترکیبی مادون قرمز و میکروویو غیرفعال سنجش از دور و تخمین بارندگی و پایش سیلاب (مطالعه موردی: استان گلستان)»، *سنجش از دور و GIS ایران*، شماره ۲، صص ۴۴-۳۱.
- سازمان آب استان آذربایجان غربی (۱۳۸۹)، *مدیریت جامع منابع آب حوضه آبریز دریاچه ارومیه*، وزارت نیرو.
- مهندسان مشاور فرسپندآب (۱۳۸۷)، «پروژه بهنگام سازی بیلان آب محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، ارومیه، سازمان آب استان آذربایجان غربی».
- مرادی، م (۱۳۸۴)، «محاسبه آب بارش شو، میانگین دمای جو و شکست اتمسفری با داده‌های کاوشگر»، *پژوهش‌های جغرافیایی*، شماره ۵۱، صص ۹۳-۸۵.

- Almazroui, M., (2011), "Calibration of TRMM rainfall climatology over Saudi Arabia during 1998-200", *Atmospheric Research*, 99: 400-414.

- Feidas, H., Kokolatos, G., Negri, A., Manyin M., Chrysoulakis, N., Kmarianakis, y., (2009), "A validation of an infrared-based satellite algorithm to estimate accumulated rainfall over the Mediterranean basin, *Theoretical and Applied Climatology*, 95: 91- 109.
- Haile, A.T., Rientjes, T., Gieske, A., Gebremichael, M., (2010), "Multispectral remote sensing for rainfall detection and estimation at the source of the Blue Nile River", *Int. J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12: 76–82.
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Gu, G., Nelkin, E.J., Bowman, K.P., Hong, Y., Stocker, E.F., Wolff, D.B., (2007), "The TRMM Multisatellite precipitation analysis (TMPA): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales", *J. Hydrometeorol*, 8: 38–55.
- Javanmard, S., Yatagai, A., Nodzu, M.I., BodaghJamali, J., Kawamoto, H., (2010), "Comparing high-resolution gridded precipitation data with satellite rainfall estimates of TRMM 3B42 over Iran", *Advances in Geosciences*, 25: 119-125.
- Jeniffer, K., Su, Z., Woldai, T., Maathuis, B., (2010), "Estimation of spatial–temporal rainfall distribution using remote sensing techniques: A case study of Makanya catchment, Tanzania", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125: 590–599.
- Jolliffe, I. T., Stephenson, D. B., (2012), "Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science", 2nd ed", Wiley, Hoboken, NJ, 240 pp.
- Levzzani, V., Amorati, R., Meneguzzo, F., (2002), "Multi-sensor precipitation measurements, integration calibration and forecasting (MUSIC): a review of satellite based estimation methods", [on line]: www.isac.cnr.it.
- Marchi, D. C., (2006), "Probabilistic estimation of precipitation combining geostationary and TRMM Satellite Data", PhD Thesis", Georgia Institute of Technology.
- Sorooshian, S., Hsu, X., Gao, H.V., Gupta, B., Imam, Braithwaite, D., (2000), Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall, *Bulletin of American Meteorology Society*, 81: 2035-2046.
- Wilks, D.S., (2006), "*Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*", Elsevier, London.