

ارزیابی تطبیقی روش‌های برآورد مقدار بارندگی در حوضه دریاچه ارومیه

خدایچه جوان^۱

علی اکبر رسولی^۲

مهدی عرفانیان^۳

بهرروز ساری صراف^۴

چکیده

بارندگی یکی از مهم‌ترین عناصر تعیین‌کننده اقلیمی می‌باشد و اندازه‌گیری و برآورد دقیق مقدار آن اهمیت زیادی دارد. هدف این تحقیق، ارزیابی کارایی الگوریتم ۳B۴۲ ماهواره TRMM و ارائه مدل نمایی و مدل مفهومی ابر برای برآورد مقدار بارندگی شش ساعته در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و اعتبارسنجی این داده‌ها با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی و همچنین مقایسه این روش‌ها در حوضه جهت انتخاب مناسب‌ترین مدل می‌باشد. در این تحقیق از داده‌های ساعتی بارش، دما، فشار هوا و دمای نقطه شبنم ۱۶ ایستگاه سینوپتیک واقع در حوضه دریاچه ارومیه با طول دوره آماری ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱، داده‌های نرخ بارندگی سه ساعته ۳B۴۲-۷۶ ماهواره TRMM با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه و تصاویر باند مادون قرمز حرارتی ماهواره متنوست ۷ در فواصل زمانی شش ساعته استفاده شده است. نتایج تحقیق بیانگر مطابقت قابل قبول داده‌های بارش برآورد شده با مقادیر ثبت شده ایستگاه‌های زمینی می‌باشد. نتایج مقایسه این روش‌ها جهت انتخاب مدل بهینه،

Email: kh.javan@urmia.ac.ir

۱- استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه ارومیه (نویسنده مسئول)

۲- استاد، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

۳- استادیار، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه

۴- استاد، گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

نشان می‌دهد که مدل نمایی، بالاترین میزان ضریب تعیین (برابر ۰/۶۱) را دارد و علاوه بر همبستگی بالا، به دلیل داشتن مقادیر کم شاخص‌های RMSE و MAE، دارای کارایی قابل قبولی در برآورد بارندگی این حوضه می‌باشد. بنابراین این مدل را می‌توان به عنوان مناسب‌ترین مدل برآورد بارندگی در حوضه دریاچه ارومیه معرفی نمود.

واژگان کلیدی: برآورد مقدار بارندگی، ماهواره TRMM، ماهواره متئوست، مدل نمایی، مدل مفهومی ابر، حوضه آبریز دریاچه ارومیه.

مقدمه

بارندگی به عنوان یک متغیر تصادفی جزو آن دسته از عناصر اقلیمی است که تغییرات چشمگیری با زمان و مکان دارد؛ به گونه‌ای که می‌توان آن را در زمره تغییرپذیرترین عناصر جوی به حساب آورد (رسولی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۷۲). بنابراین، اندازه‌گیری و برآورد دقیق آن اهمیت زیادی دارد و در زمینه‌های مختلفی مانند تغییر اقلیم، خشکسالی، مطالعه رواناب، مطالعات کشاورزی و مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار می‌گیرد (رسولی، ۱۳۹۰: ۱۰۷).

برآورد بارندگی در مناطق فاقد آمار یا دارای ایستگاه‌های کم و نامنظم، از موارد ضروری در تحقیقات هیدروکلیماتولوژی می‌باشد. این مسئله در کشور ما که فاقد شبکه منظم و متراکم ثبت بارش می‌باشد، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. امروزه دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای، باعث ایجاد و توسعه مدل‌های زیادی در زمینه برآورد بارش شده است.

در دهه‌های اخیر، محققان زیادی به تحقیق در زمینه برآورد بارندگی توسط داده‌های ماهواره‌ای پرداخته‌اند: جوانمرد و همکاران (۲۰۱۰) به منظور ارزیابی بارش برآورد شده TRMM، به مقایسه این داده‌ها با داده‌های بارش شبکه بندی شده زمینی در ایران پرداختند. المزروی^۱ (۲۰۱۱) به واسطی بارش‌های TRMM در عربستان پرداخت. هیل و همکاران^۲ (۲۰۱۱) به تخمین بارش با استفاده از مدل مفهومی ابر و تصاویر ماهواره متئوست

^۱ - Almazroui

^۲ - Haile

پرداختند. چن و همکاران^۱ (۲۰۱۳) به ارزیابی داده‌های بارش راداری و ماهواره‌ای با داده‌های ثبت شده در تایوان پرداختند. آنها از داده‌های ماهواره‌ای PERSIANN-3B42RT، CCS، 3B42V6 و CMORPH استفاده کردند. قجرنیا و همکاران (۲۰۱۵) به مقایسه داده‌های بارش PERSIANN، CMORPH، TMPA و آفرودیت با داده‌های زمینی در حوضه دریاچه ارومیه پرداختند. ایونیدو و همکاران^۲ (۲۰۱۶) به مقایسه داده‌های بارش TRMM با داده‌های زمینی و راداری در جنوب یونان پرداختند.

آذری و همکاران (۱۳۸۸) برای برآورد بارش در حوضه مادرسو در گلستان از تصاویر AVHRR ماهواره نوآ استفاده نموده و نرخ بارش را برآورد نمودند. متکان و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از روش همسان‌سازی احتمالات، داده‌های ماهواره متئوست ۷ و TRMM را ترکیب کرده و برای تخمین بارش در حوضه مادرسو استفاده نمودند. غضنفری مقدم و همکاران (۱۳۹۰) مدل پرشین و روش‌های درون یابی بارش را مورد مقایسه قرار دادند. حجازی‌زاده و همکاران (۱۳۹۱) به ارزیابی بارش ماهواره‌ای 3B43 و مقایسه آن با مقادیر حاصل از تکنیک کریجینگ پرداختند. عرفانیان و همکاران (۱۳۹۲) به ارزیابی داده‌های TRMM در مناطق خشک و نیمه خشک ایران پرداختند. ایلدرمی و همکاران (۱۳۹۲) به برآورد بارش به کمک شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. کتیرایی بروجردی (۱۳۹۲) به مقایسه داده‌های بارش مدل پرشین و داده‌های زمینی در ایران پرداخت. میان‌آبادی و همکاران (۱۳۹۲) به ارزیابی مدل CMORPH در شمال شرق ایران پرداختند. جوان و عزیززاده (۲۰۱۷) به بررسی کارایی داده‌های 3B43-TRMM در شمال غرب ایران پرداخته و به این نتیجه رسیدند که این داده‌ها در برآورد بارش‌های سنگین در منطقه مورد مطالعه در مقیاس ماهانه عملکرد ضعیفی دارند. با بررسی مطالعات انجام شده در زمینه برآورد بارندگی معلوم می‌شود که داده‌های TRMM قابلیت زیادی در برآورد بارندگی دارد؛ مدل‌نمایی به دلیل داشتن مطابقت زیاد با داده‌های زمینی مورد استفاده محققان زیادی قرار گرفته و مدل مفهومی ابر نیز به دلیل استفاده از داده‌های زمینی و تصاویر ماهواره‌ای به

^۱ - Chen, et al.

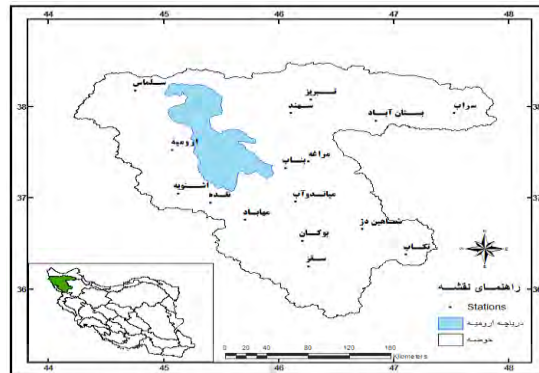
^۲ - Ioannidou

عنوان ورودی مدل و توجه به خصوصیات فیزیکی لایه‌های ابر، کارایی زیادی در برآورد بارش دارد. این تحقیق در پی آن است تا کارایی روش‌های مختلف برآورد بارش مانند مدل نمایی و مدل مفهومی ابر و الگوریتم ۳B۴۲ ماهواره TRMM را در حوضه دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار دهد تا ضمن شناسایی مناسب‌ترین روش، بتوان به تخمینی مناسب و یکپارچه برای منطقه مورد مطالعه دست یافت.

مواد و روش‌ها

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وسعت حدود ۵۱۸۰۱ کیلومتر در شمال‌غربی ایران قرار گرفته و بوسیله بخش شمالی کوه‌های زاگرس، دامنه جنوبی سبلان و دامنه‌های شمالی، غربی و جنوبی سه‌سند احاطه شده است. این حوضه با دارا بودن حدود ۳/۱۵ درصد از سطح کشور، حدود ۷ درصد از کل منابع آب سطحی را به خود اختصاص می‌دهد (مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۸۷: ۱). میانگین دمای سالانه هوا در این منطقه ۱۲/۵ درجه می‌باشد. از نظر بارش منطقه نیمه خشک بوده و میانگین بارش سالانه ۳۰۵ میلی‌متر می‌باشد (رضایی‌بنفشه و همکاران، ۱۳۹۰: ۴۶).

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، شامل داده‌های ساعتی بارش، دما، فشار هوا و دمای نقطه شبنم ۱۶ ایستگاه سینوپتیک واقع در حوضه دریاچه ارومیه با طول دوره آماری ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱، داده‌های نرخ بارندگی سه ساعته ۳B۴۲-۷۶ ماهواره TRMM با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه و تصاویر مادون قرمز حرارتی ماهواره متئوست ۷ می‌باشد. موقعیت جغرافیایی حوضه دریاچه ارومیه و پراکنش مکانی ایستگاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



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

برای تعیین بارندگی‌های فراگیر، داده‌های ساعتی کلیه ایستگاه‌ها بررسی شد و در نهایت ۴ واقعه بارشی فراگیر انتخاب گردید (جدول ۱). منظور از بارش فراگیر، بارشی است که حداقل ۷۰٪ از ایستگاه‌ها در آن ساعت، بارشی مساوی یا بیشتر از ۱ میلی‌متر را ثبت کرده باشند. در این تحقیق از واقعه سوم به دلیل داشتن تعداد مشاهدات بیشتر و میانگین بارش بالاتر استفاده شده است.

جدول ۱: بارش‌های فراگیر انتخاب شده در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

واقعه 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

ماهواره TRMM، محصول مشترک کشورهای ژاپن و آمریکا است که در ۲۷ نوامبر سال ۱۹۹۷ به فضا پرتاب شده است. میزان تفکیک مکانی آن، حدود ۰/۲۵ درجه است و از ۵۰ درجه عرض شمالی تا ۵۰ درجه عرض جنوبی را پوشش می‌دهد. ماهواره TRMM حاوی پنج سنجنده متفاوت است که سه سنجنده، رادار بارش (PR)، تصویرگر میکروویو (TMI) و اسکنر مرئی و مادون قرمز (VIRS) مربوط به اندازه‌گیری بارش می‌باشند. در

این مطالعه از داده‌های نرخ بارندگی سه ساعته ۷۶-۳B۴۲ با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه استفاده می‌شود. مقادیر بارش با فرمت Netcdf دریافت شد. پس از تبدیل داده‌ها به نقشه رستری و استخراج بارش سه ساعته، فایل‌های رستری در ArcGIS با یکدیگر ادغام شده و بارش شش ساعته بدست آمد.

مدل نمایی به دلیل استفاده از تصاویر متئوست برای برآورد بارندگی و داده‌های TRMM برای کالیبراسیون داده‌ها، قادر به ارائه تخمینی بهتر بوده و متداول‌ترین روش در برآورد بارش می‌باشد. برای برآورد بارش در مدل نمایی از رابطه زیر استفاده می‌شود (Vicente et al., ۱۹۹۸: ۶۶۶۶):

$$R = a \times \exp(-b (T_B)^c) \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه فوق، R میانگین نرخ بارش بر حسب میلی متر بر ساعت، T_B دمای درخشندگی بر حسب کلوین، $a = ۱,۱۱۸۳ \times ۱۰^{۱۱}$ ، $b = -۳,۶۳۸۲ \times ۱۰^{-۲}$ ، و $c = ۱,۲$ می‌باشند.

دمای درخشندگی ابرها^۱ از طریق محاسبه میزان انرژی دریافتی توسط سنجنده‌ها و با معکوس سازی قانون پلانک بدست می‌آید (Sollehim, ۲۰۰۸: ۹):

$$TB = \frac{c_2}{\ln\left(\frac{c_1}{L\lambda} + 1\right)} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه، c_1 و c_2 ضرایب کالیبراسیون و $L\lambda$ رادیانس طیفی می‌باشد.

برای محاسبه دمای درخشندگی، اعداد رقومی پیکسل‌ها در هر یک از تصاویر به رادیانس تبدیل می‌شود. رادیانس طیفی ($L\lambda$) از رابطه زیر بدست می‌آید (Sollehim, ۲۰۰۸: ۹):

$$L\lambda = \alpha(DN - \beta) \quad \text{رابطه ۳}$$

^۱ - Brightness Temperature

که DN مقدار پیکسل در تصویر متنوست، α و β ضرایب کالیبراسیون می‌باشند. مقدار ضریب β برابر ۵ می‌باشد ولی مقدار ضریب α در هر روز تغییر می‌کند (جدول ۲).

جدول ۲: مقادیر ضریب α برای تاریخ‌های مورد نظر (Eumetsat, ۲۰۱۲)

تاریخ	ضریب α
۱۷ نوامبر ۲۰۰۹	۰/۰۹۴۵۸۶
۱۸ نوامبر ۲۰۰۹	۰/۰۹۴۷۷۱
۱۹ نوامبر ۲۰۰۹	۰/۰۹۴۸۹۷

مدل مفهومی ابر^۱ بر اساس مدل تک لایه می‌باشد که توسط گئورگاکاکوس و براس (۱۹۸۴) و با استفاده از داده‌های هواشناسی ارائه شده و محققان دیگر با استفاده از داده‌های رادار و تصاویر ماهواره‌ای، آن را توسعه داده‌اند (Andrieu et al., ۲۰۰۳؛ Hail et al., ۲۰۱۱). مدل مفهومی ابر به صورت زیر می‌باشد (Hail et al., ۲۰۱۱: ۳۱):

$$\frac{ds}{dt} = I - \frac{s}{\tau} \quad \text{رابطه ۴}$$

که $\frac{ds}{dt}$ تغییرات مقدار آب مایع در بالای لایه ابر نسبت به زمان، I میزان آب مایع ورودی، s مقدار آب مایع در لایه ابر و τ زمان واکنش می‌باشد. این مدل دارای پارامترهای زیر است: فشار و دمای پایین ابر، فشار بالای ابر، میزان آب مایع ورودی و نرخ بارش (رسولی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۹۰). کلیه محاسبات این مدل در نرم افزار MATLAB برنامه نویسی و اجرا شد.

برای مقایسه بارش‌های برآوردی با بارش‌های ایستگاه‌های زمینی از معیارهای آماری ضریب تعیین (R^2)، میانگین خطا (ME)، میانگین خطای مطلق (MAE) و جذر میانگین توان دوم خطا (RMSE) استفاده گردید که روابط آنها به صورت زیر می‌باشد:

^۱ - Conceptual cloud model

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{N} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

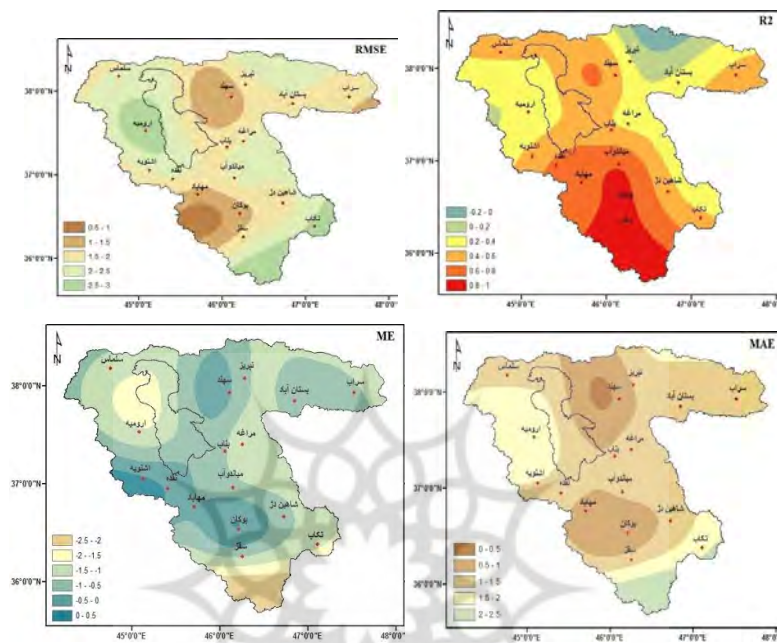
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |S_i - O_i|}{N} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

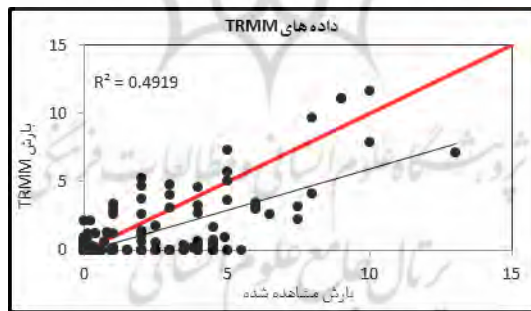
که S_i مقدار بارندگی برآورد شده، O_i مقدار بارندگی مشاهده‌ای و N تعداد کل مشاهدات می‌باشد. (Jolliffe and Stephenson, ۲۰۱۲: ۸۰).

یافته‌ها و بحث

برای اعتبارسنجی مقادیر بارندگی TRMM در حوضه دریاچه ارومیه از داده‌های ایستگاه‌های زمینی استفاده شد. توزیع مکانی مقادیر معیارهای خطا در ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۲ آمده است. در اکثر ایستگاه‌ها R^2 بیشتر از ۰/۴۵ می‌باشد. مقدار RMSE در تمام ایستگاه‌ها کمتر از ۳ و MAE کمتر از ۲ میلی‌متر می‌باشد که از دقت بالایی برخوردار است. بررسی مقادیر ME نیز نشان می‌دهد که مدل مورد استفاده به جز اشنویه، در سایر ایستگاه‌ها مقدار بارندگی را کمتر برآورد کرده است. نمودار پراکنش مقادیر بارش مشاهده‌ای و برآورد شده TRMM در شکل ۳ نشان داده شده است. در این نمودار، بیشتر نقاط پایین‌تر از خط برازش قرار دارند که تخمین پایین‌تر ماهواره TRMM را نشان می‌دهد.



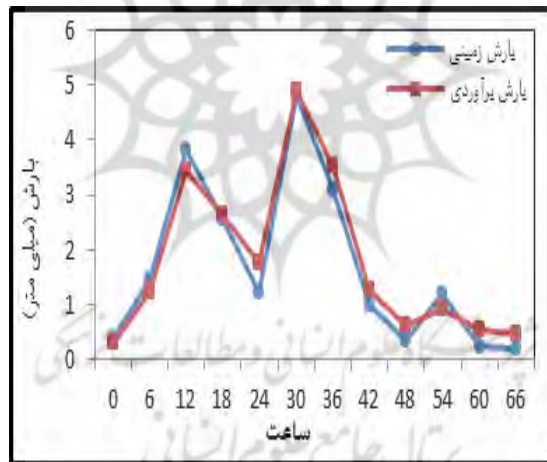
شکل ۲: توزیع مکانی معیارهای آماری خطای داده‌های TRMM در حوضه دریاچه ارومیه



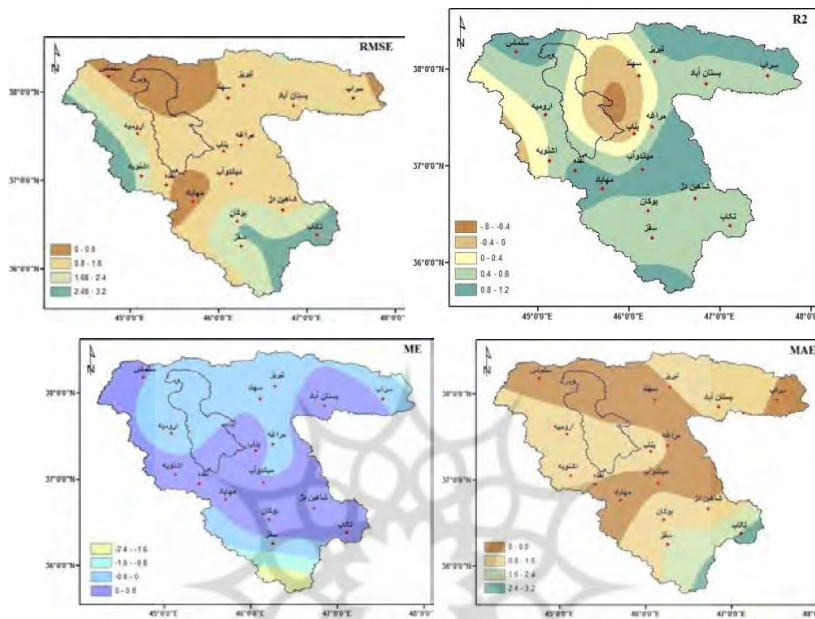
شکل ۳: پراکنش مقادیر بارش مشاهده‌ای و برآورده شده TRMM در حوضه دریاچه ارومیه

برآورد بارندگی حوضه با استفاده از مدل نمایی

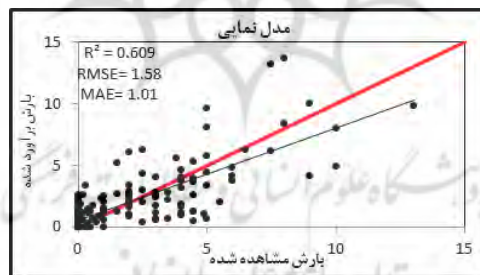
نتایج برآورد مدل نمایی در حوضه در شکل ۴ نشان داده شده است که بیانگر مطابقت زیاد داده‌های برآورد شده با داده‌های زمینی می‌باشد. در شکل ۵ توزیع مکانی مقادیر شاخص‌های R^2 ، RMSE، MAE و ME نشان داده شده است. بر اساس میزان R^2 ، در اکثر ایستگاه‌ها همبستگی بالایی با مقادیر واقعی وجود دارد و میزان ضریب تعیین بالاتر از ۰/۴۵ می‌باشد. مقدار RMSE و MAE نیز کمتر از ۳ میلی‌متر می‌باشد که کارایی بالای مدل را نشان می‌دهد. مطابق شاخص ME، مدل مورد استفاده، در قسمتهای مرکزی مقدار بارندگی را بیشتر از مقدار واقعی و حاشیه‌های شمالی و جنوبی کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است. در نمودار پراکنش بارش مشاهده‌ای و برآورد شده (شکل ۶) بیشتر نقاط پایین‌تر از خط برازش هستند که تخمین پایین‌تر مدل نمایی را نشان می‌دهد.



شکل ۴: مقایسه بارندگی ۶ ساعته ثبت شده و برآورد شده توسط مدل نمایی در حوضه دریاچه ارومیه



شکل ۵: توزیع مکانی معیارهای آماری خطای مدل نمایی در حوضه دریاچه ارومیه

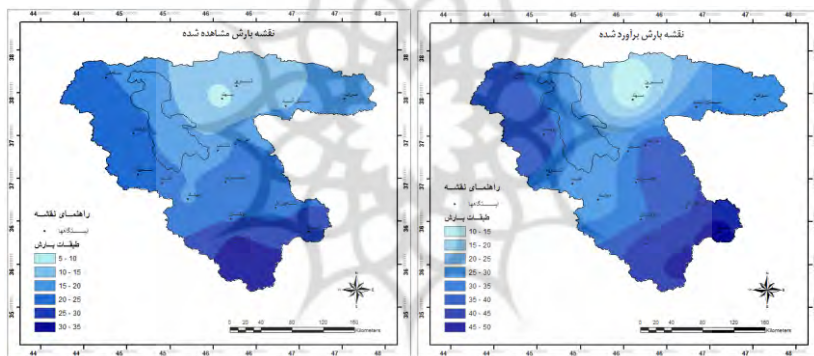


شکل ۶: پراکنش مقادیر بارش مشاهده‌ای و برآورده شده مدل نمایی در حوضه دریاچه ارومیه

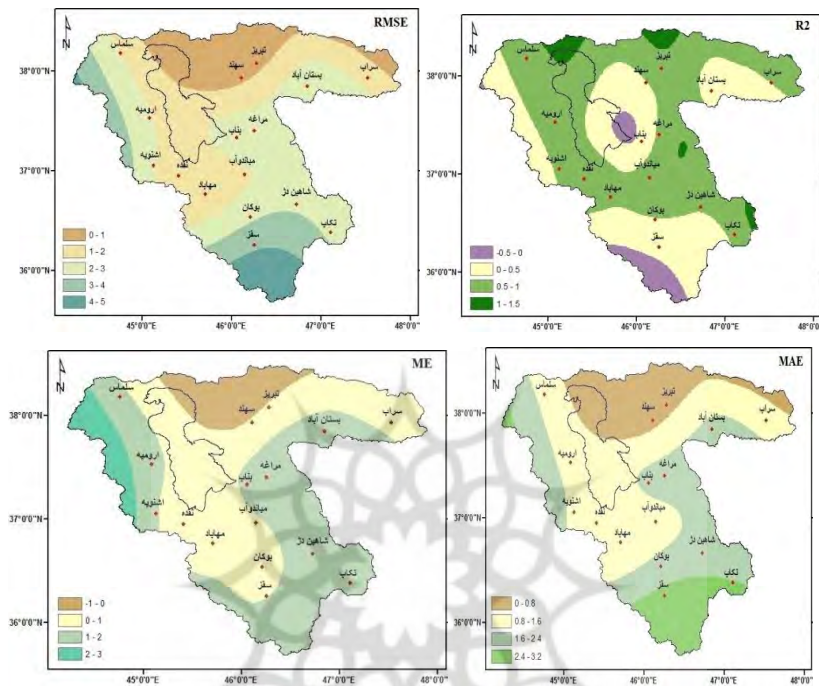
برآورد بارندگی حوضه با استفاده از مدل مفهومی ابر

مقدار بارندگی حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از مدل مفهومی ابر برآورد شده و نقشه-های رستری بارش برآورد شده برای حوضه استخراج شد. برای مقایسه بهتر، نقشه‌های ۶

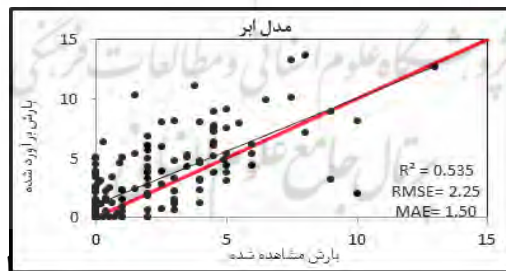
ساعته با یکدیگر ادغام شده و نقشه بارش تجمعی آورده شده است (شکل ۷). مطالعه نقشه-ها نشان می‌دهد که توزیع مکانی بارش مشاهده‌ای، با بارش برآورد شده توسط مدل ابر مطابقت دارد. پس از برآورد بارندگی، میانگین معیارهای خطا محاسبه شده و توزیع مکانی آنها در شکل ۸ آورده شد. در این مدل، در اکثر ایستگاه‌ها مقدار R^2 بالای ۰/۵ می‌باشد. در تمام ایستگاه‌ها مقدار RMSE کمتر از ۴ و مقدار MAE نیز کمتر از ۳ میلی‌متر بوده است. بررسی شاخص ME نیز نشان‌دهنده بیش‌برآورد این مدل می‌باشد. نمودار پراکنش مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده در شکل ۹ نشان داده شده است. در این شکل بیشتر نقاط بالاتر از خط برازش قرار گرفته‌اند که بیش‌برآورد مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۷: توزیع مکانی بارش مشاهده شده و برآورد شده توسط مدل مفهومی ابر (۱۷ تا ۱۹ نوامبر ۲۰۰۹)



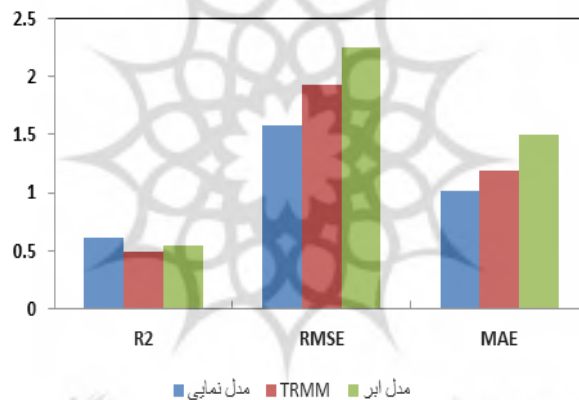
شکل ۸: توزیع مکانی معیارهای آماری خطای مدل ابر در حوضه دریاچه ارومیه



شکل ۹: پراکنش مقادیر بارش مشاهده‌ای و برآورده شده توسط مدل مفهومی ابر در حوضه دریاچه ارومیه

ارزیابی تطبیقی روش‌های برآورد بارندگی در حوضه دریاچه ارومیه

روش‌های برآورد بارندگی در حوضه دریاچه ارومیه جهت انتخاب و معرفی مناسب‌ترین مدل در حوضه مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ۱۰ مقادیر کلی شاخص‌های آماری R^2 ، RMSE و MAE نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مدل نمایی، مدل مفهومی ابر و داده‌های TRMM (ضریب تعیین برابر ۰/۶۱، ۰/۵۴ و ۰/۴۹) به ترتیب بیشترین همبستگی را با مقادیر واقعی بارندگی نشان می‌دهند. بنابراین مدل نمایی، مقدار بارندگی را با دقت بالاتری برآورد نموده است. مقدار شاخص‌های RMSE و MAE نیز برای مدل نمایی به ترتیب ۱/۵۸ و ۱/۰۱ می‌باشد.



شکل ۱۰: مقایسه معیارهای خطای داده‌های TRMM، مدل نمایی و مدل ابر

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، برای برآورد مقادیر بارندگی ۶ ساعته در حوضه دریاچه ارومیه، از الگوریتم ۳B۴۲ ماهواره TRMM، مدل نمایی و مدل مفهومی ابر استفاده شده است. نتایج استفاده از الگوریتم ۳B۴۲ ماهواره TRMM نشان دهنده مطابقت نسبی این داده‌ها با مقادیر ثبت شده ایستگاه‌های زمینی می‌باشد. این نتایج، با یافته‌های علمی سایر پژوهشگران همچون عسگری و همکاران، ۱۳۸۷ و جوانمرد و همکاران، ۲۰۱۰ همخوانی

دارد. استفاده از مدل نمایی در برآورد بارندگی نشان می‌دهد که این مدل همبستگی بالایی با مقادیر واقعی دارد. همچنین این مدل به دلیل داشتن مقادیر کم شاخص‌های RMSE و MAE (به ترتیب ۱/۵۸ و ۱/۰۱)، دارای کارایی قابل قبولی در برآورد بارندگی می‌باشد. نتایج این قسمت با یافته‌های پژوهشگرانی نظیر وارداد و همکاران، ۲۰۰۸ و هیل و همکاران، ۲۰۱۰ همخوانی دارد. در مدل مفهومی ابر میانگین معیارهای MAE و RMSE به ترتیب برابر ۱/۵۰ و ۲/۲۵ میلی‌متر می‌باشد که مقدار کم آنها بیانگر قابل قبول بودن این مدل است. نتایج استفاده از مدل ابر نیز با یافته‌های پژوهشگران (اندریو و همکاران، ۲۰۰۳ و هیل و همکاران، ۲۰۱۱) همخوانی دارد. به طور کلی می‌توان گفت که از بین سه روش برآورد بارندگی، مدل نمایی به دلیل داشتن ضریب تعیین بالاتر، میانگین خطاهای کمتر و برآزش بهتر داده‌ها، نتایج بهتری را نسبت به سایر مدل‌ها ارائه داده است. بنابراین این مدل را می‌توان به عنوان مناسب‌ترین مدل برآورد بارندگی کوتاه‌مدت در حوضه دریاچه ارومیه معرفی نمود. این تحقیق در مقیاس زمانی شش ساعته و در حوضه دریاچه ارومیه انجام شده است، لذا به سایر محققان توصیه می‌شود کارایی این مدل‌ها را در مقیاس زمانی روزانه و ماهانه، مورد ارزیابی قرار دهند و نیز از سایر مدل‌ها و الگوریتم‌های برآورد بارندگی در حوضه دریاچه ارومیه استفاده نموده و با نتایج تحقیق حاضر مقایسه نمایند.

منابع

- آذری، حمید، متکان، علی اکبر، شکیب، علیرضا و پورعلی، حسین (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.
- ایلدرومی، علیرضا، زارع ایبانه، حمید و بیات ورکشی، مریم (۱۳۹۲)، برآورد بارش به کمک شبکه عصبی مصنوعی با داده‌های هواشناسی غیربارشی در سه منطقه شیراز، مشهد و کرمان، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، شماره ۴۳، صص ۲۱-۴۰.
- حجازی زاده، زهرا، علیجانی، بهلول، ضیایان، پرویز، کریمی، مصطفی و رفعتی، سمیه (۱۳۹۱)، ارزیابی بارش ماهواره‌ای ۳B۴۳ و مقایسه آن با مقادیر حاصل از تکنیک درون یابی کریجینگ، *سنجش از دور و GIS/ایران*، شماره ۳، صص ۴۹-۶۴.
- رسولی، علی اکبر (۱۳۹۰)، *مقدمه‌ای بر هواشناسی و اقلیم شناسی ماهواره‌ای*، انتشارات دانشگاه تبریز، ۴۵۵ صفحه.
- رسولی، علی اکبر، جلالی، طاهره، سرافروزه، فاطمه و اسمعیل پور، مرضیه (۱۳۹۴)، بررسی تغییرات زمانی و مکانی بارش‌های نیسان و پیش‌بینی آن در استان آذربایجان شرقی، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، شماره ۵۱، صص ۱۷۱-۱۹۱.
- رسولی، علی اکبر، عرفانیان، مهدی، ساری صراف، بهروز و جوان، خدیجه (۱۳۹۵)، ارزیابی مدل مفهومی ابر در برآورد بارندگی شش ساعته در حوضه دریاچه ارومیه، *جغرافیا و آمایش شهری-منطقه‌ای*، شماره ۲۰، صص ۱۸۳-۲۰۲.
- رضایی‌بنفشه، مجید، سرافروزه، فاطمه و جلالی، طاهره (۱۳۹۰)، بررسی روند دما و بارش‌های روزانه حدی در حوضه دریاچه ارومیه، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، شماره ۳۸، صص ۴۳-۷۴.
- عرفانیان، مهدی، کاظم پور، سیما و حیدری، حسن (۱۳۹۲)، ارزیابی و کالیبراسیون باران ماهواره TRMM در مناطق خشک و نیمه خشک ایران، *جغرافیا (برنامه ریزی منطقه‌ای)*. موسسه آموزش عالی قشم، شماره سوم، صص ۸۲-۹۵.
- غضنفری مقدم، محمدصادق علیزاده، امین، موسوی بایگی، محمد، فرید حسینی، علیرضا و بنایان اول، محمد (۱۳۹۰)، مقایسه مدل PERSIANN با روش‌های درون یابی به منظور کاربرد در تخمین مقادیر بارندگی روزانه، *نشریه آب و خاک*، شماره ۱، صص ۲۰۷-۲۱۵.

- کتیرایی بروجردی، پری سیما (۱۳۹۲)، مقایسه داده‌های بارش ماهانه ماهواره‌ای و زمینی در شبکه‌ای با تفکیک زیاد روی ایران، *مجله ژئوفیزیک ایران*، شماره ۴، صص ۱۶۰-۱۴۹.
- متکان، علی اکبر، شکیب، علیرضا، عاشورلو، داوود، بذاق جمالی، جواد و محمدیان، وهب (۱۳۸۸)، قابلیت داده‌های ترکیبی مادون قرمز و میکروویو غیرفعال سنچس از دور و تخمین بارندگی و پایش سیلاب (مطالعه موردی: گلستان)، *سنچس از دور و GIS ایران*، شماره ۲، صص ۴۴-۳۱.
- مطالعات پایه منابع آب، (۱۳۸۷)، پروژه بهنگام سازی بیلان آب محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز دریاچه ارومیه (گزارش هیدرولوژی)، مهندسين مشاور فرسپندآب.
- میان آبادی، آمنه، علیزاده، امین، ثنایی نژاد، حسین بنایان اول، محمد و فرید حسینی، علیرضا (۱۳۹۲)، ارزیابی آماری خروجی مدل CMORPH در برآورد بارش شمال شرق ایران (مطالعه موردی: خراسان شمالی)، *نشریه آب و خاک*، شماره ۵، صص ۹۲۷-۹۱۹.
- Almazroui, M., (۲۰۱۱). Calibration of TRMM rainfall climatology over Saudi Arabia during ۱۹۹۸-۲۰۰۹. *Atmospheric Research*, Vol: ۹۹, ۰۰۰-۴۱۴.
- Andrieu H, French MN, Krajewski WF, Georgakakos KP., (۲۰۰۳). Stochastic-dynamical rainfall simulation based on weather radar volume scan data. *Adv Water Resources*, Vol: ۲۶(۵):۱۱۱-۹۳.
- Chen, Sh., Hong, Y., Cao, Q., Kirstetter, P., Gourley, J. J., (۲۰۱۳). Performance evaluation of radar and satellite rainfalls for Typhoon Morakot over Taiwan: Are remote-sensing products ready for gauge denial scenario of extreme events? *Journal of Hydrology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol>.
- Eumetsat, (۲۰۱۲), <http://www.eumetsat.int/>
- Georgakakos K.P. and Bras R.L., (۱۹۸۴). A hydrologically useful station precipitation model ۱. Formulation. *Water Resource Research*, Vol: ۲۰(۱۱), ۸۵۸۵-۹۶.
- Ghajarnia, N., Liaghat, A., & Arasteh, P. D. (۲۰۱۵). Comparison and evaluation of high-resolution precipitation estimation products in Urmia Basin-Iran. *Atmospheric Research*, ۱۵۸, ۵۰-۶۵.
- Haile, A.T., Rientjes, T., Gieske, A. and Gebremichael, M., (۲۰۱۰). Multispectral remote sensing for rainfall detection and estimation at the source of the Blue Nile River. *Int. J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol: ۱۲, ۷۶-۸۲.

- Haile, A.T., Rientjes, T., Gieske, A., Jetten, v. and Gebremichael, M., (۲۰۱۱). Satellite remote sensing and conceptual cloud modeling for convective rainfall simulation. *Advances in Water Resources*, Vol: ۳۴, ۲۶-۳۷.
- Ioannidou, M. P., Kalogiros, J. A., & Stavrakis, A. K. (۲۰۱۱). Comparison of the TRMM Precipitation Radar rainfall estimation with ground-based disdrometer and radar measurements in South Greece. *Atmospheric Research*, ۱۱۱, ۱۷۲-۱۸۵.
- Javan, K., & Azizzadeh, M. R. (۲۰۱۷). Evaluation of the TRMM-۳B۴۲ V۷ rainfall products on a monthly scale in the Northwest of Iran. *Environmental Resources Research*, ۵(۲), ۱۵۳-۱۸۸.
- Javanmard, S., Yatagai, A., Nodzu, M.I., BodaghJamali, J. and Kawamoto, H., (۲۰۱۰). Comparing high-resolution gridded precipitation data with satellite rainfall estimates of TRMM ۳B۴۲ over Iran. *Advances in Geosciences*, Vol: ۲۵, ۱۱۹-۱۲۵.
- Jolliffe, I. T., and Stephenson, D. B., (۲۰۱۲). Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science, ۲nd ed. Wiley, Hoboken, NJ, ۲۰۰ pp.
- Sollehim, A.L.D. L., (۲۰۰۸). Two satellite-based rainfall algorithms, calibration methods and post-processing corrections applied to mediterranean flood cases. PhD Thesis, University of Balearic, Spain.
- Vicente, G.A., Scofield, R.A. and Menzel, W.P., (۱۹۹۸). The operational GOES infrared rainfall estimation technique. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol: ۷۹, ۸۸۸۳-۸۸۹۸.
- Wardah, T., Abu Bakar, S.H., Bardossy, A. and Maznorizan, M., (۲۰۰۸). Use of geostationary meteorological satellite images in convective rain estimation for flash flood forecasting. *Journal of Hydrology*, Vol: ۳۵۶, ۳۸۳-۲۹۸.