

ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN و PERSIANN-CDR و بررسی تأثیر ناهمواری‌ها بر آن (مطالعه موردی: حوضه آبریز حله)

سعید شکری کوچک^۱، علی محمد آخوند علی^{۲*}، محمدرضا شریفی^۳

۱. دانشجوی دکتری منابع آب دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

۲. استاد گروه هیدرولوژی و منابع آب دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

۳. استادیار گروه هیدرولوژی و منابع آب دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۱۱/۲۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۲/۳۱)

چکیده

تحقیق حاضر با هدف ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN و PERSIANN-CDR در برآورد عمق بارش حوضه آبریز حله انجام شده و تأثیر ناهمواری‌ها بر عملکرد الگوریتم بارش ماهواره‌ای بررسی شد. بنابراین، داده‌های بارش ماهواره‌ای، با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه در طول و عرض جغرافیایی، طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۶ با داده‌های ۱۱۴ ایستگاه باران‌سنجی مقایسه شد. نتایج نشان داد الگوریتم PERSIANN در همه مقیاس‌های زمانی و مکانی، ضمن کم‌برآورد کردن عمق بارش، دقت کمی نیز دارد. در مقابل، الگوریتم PERSIANN-CDR دقت بیشتری دارد. با این وجود، عملکرد الگوریتم تعدیل‌یافته در مقیاس روزانه نیز قابل قبول نیست. ضریب تبیین الگوریتم تعدیل‌یافته در مقیاس سلولی و در مقیاس‌های ماهانه و سالانه به ترتیب ۰/۷۵۸۸ و ۰/۹۴۴۶ به دست آمد. منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی سه نوع منبع داده را نشان می‌دهد. هر دو الگوریتم در دوره بازگشت‌های مختلف و در مدت‌های مختلف، مقادیر بارش را کمتر از مقادیر مشاهداتی برآورد می‌کند. نتایج نشان می‌دهد بین عملکرد الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای و ارتفاع و شیب همبستگی وجود دارد، به طوری که در هر دو الگوریتم مقدار RMSE، از نقاط کم‌ارتفاع، به سمت مناطق مرتفع، افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد ارتفاع نسبت به شیب نسبی تأثیر بیشتری بر عملکرد الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN و PERSIANN-CDR دارد. از این رو، توصیه می‌شود با توجه به ناهمواری‌های موجود در ایران، در استفاده از الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN و PERSIANN-CDR برای تخمین بارش در مناطق مرتفع احتیاط بیشتری صورت گیرد.

کلیدواژه‌گان: ارزیابی، الگوریتم بارش ماهواره‌ای، حوضه رودخانه حله، PERSIANN، PERSIANN-CDR.

مقدمه

کوه‌ها و ناهمواری‌های سطح زمین همواره به‌عنوان عامل تأثیرگذار بر اقلیم و بارش مد نظر بوده‌اند، زیرا قادرند تأثیر زیادی بر میزان بارش بگذارند. چگونگی تأثیر ناهمواری‌ها بر بارش دریافتی در مناطق کوهستانی، موضوع ساده‌ای نیست [۱]. هنگامی که توده‌های هوای گرم و مرطوب روی دامنه‌های رو به باد صعود می‌کند، بر اثر رسیدن دمای هوا به نقطه اشباع، به دلیل کاهش دما و نیز کاهش گنجایش نگهداری رطوبت هوا از میزان رطوبت موجود و در نتیجه با شروع تراکم، ابر و باران ایجاد می‌شود [۲]. بنا به اهمیت پدیده صعود در مناطق کوهستانی میزان، شدت و تناوب بارندگی‌ها افزایش می‌یابد. آب‌وهوا و پدیده‌های وابسته به آن (مانند بارش) در نواحی کوهستانی نه تنها با تغییر ارتفاع بلکه با تغییرات شیب، جهت دامنه تغییر می‌کند. ویژگی‌های مختلف ناهمواری‌ها مانند ارتفاع، شیب، جهت و چگونگی قرارگیری ناهمواری‌ها در برابر بادهای باران‌آور عوامل مهمی هستند که روی توزیع و مقدار بارندگی تأثیر می‌گذارند. علیجانی و کاویانی (۲۰۰۴) معتقدند مقدار بارش در دامنه‌های بادگیر کوهستان‌ها بیشتر است [۳]. کنراد و همکاران (۱۹۹۶) طی تحقیقی به این نتیجه رسیدند که فقط ارتفاع و جهت دامنه‌ها عامل تأثیرگذار بر بارش نیستند، بلکه مقدار بارش به شیب دامنه‌ها نیز می‌تواند بستگی داشته باشد و شیب‌های تندتر می‌توانند بر مقدار و شدت بیشتر بارش‌ها منجر شوند [۴]. بارش یکی از پدیده‌های جوی است که از نظر اندازه‌گیری بسیار دشوار است [۵]. زیرا این پدیده در زمان و مکان به‌خصوص در مناطق کوهستانی و با ارتفاعات زیاد خیلی تغییر می‌کند. علاوه بر این، بیشتر مناطق کوهستانی صعب‌العبور، خالی از سکنه و به دور از مراکز جمعیت هستند و به همین دلیل، شبکه ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش در بیشتر مناطق کوهستانی و صعب‌العبور پوشش مکانی خوبی ندارد. علاوه بر این، شبکه‌های ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی مشکلاتی مانند هزینه‌بر بودن، خرابی دستگاه‌ها و احتمال اشتباه کاربر دارند. رادارهای بارندگی برخی از این مشکلات را برطرف می‌کنند. داده‌های رادار، منابع مناسبی برای واسنجی داده‌های باران‌سنجی‌اند و توزیع بارندگی را تخمین می‌زنند؛ اما رادارها هم مشکلاتی دارند که از جمله آنها می‌توان به نیازمندی به تأسیسات، گران‌قیمت بودن، داشتن خطاهای معنادار، ناهماهنگی جمع‌آوری داده‌ها به دلیل پراکندگی

مکانی، خطای تبدیل بازتاب‌پذیری به میزان بارندگی، محدودیت پوشش مکانی اشاره کرد که برای تعیین توزیع جهانی به‌صرفه نیستند [۶-۸].

امروزه با ظهور فناوری پیشرفته در فرایند دریافت اطلاعات هواشناسی ماهواره‌ای، روش‌های متعددی در زمینه پردازش داده‌ها و برآورد مقادیر بارندگی مطرح شده است. سنسجش از دور به‌عنوان یک ابزار مؤثر، شکاف‌های اندازه‌گیری‌های زمینی را کاهش می‌دهد و مشکلات موجود را تا حدودی برطرف می‌کند. مزیت بررسی بارندگی با استفاده از روش‌های سنسجش از دور، شناخت بهتر پدیده بارش و پارامترهای مؤثر بر آن، در یک گستره مکانی وسیع است. تخمین بارش از طریق تصاویر ماهواره‌ای طی دهه‌های اخیر تغییرات درخور توجهی داشته است. الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای با توجه به نوع تصاویر استفاده شده، متفاوت‌اند. الگوریتم‌های تخمین بارش بر اساس ماهواره‌ها، از اطلاعات محدود باندهای طیفی مرئی تا مادون قرمز از ماهواره‌های زمین‌آهنگ استفاده می‌کنند؛ اما اطلاعات دریافتی آنها از بارش غیر مستقیم است. برای رفع این کمبود، بهبودهایی شامل روش‌های کلاسه‌بندی ابرها با استفاده از اندازه‌گیری‌های تشخیص بافت ابر و همچنین ترکیب اطلاعات حاصل از تصویربرداری چندطیفی صورت گرفته‌اند. از طرف دیگر، سنسجش‌های ماکروویو در ماهواره‌های مدار پایین سنسجش مستقیم‌تری را از ابرهای باران‌زا تهیه می‌کنند، هرچند فراوانی نمونه‌برداری آنها کم است.

لی و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی و مقایسه دو الگوریتم بارش ماهواره‌ای TRMM و PERSIANN در مقیاس ماهانه و روزانه در حوضه دریاچه پویانگ^۱ چین پرداختند و ضمن ارزیابی الگوریتم‌ها، وابستگی خطاها به شرایط توپوگرافی شامل ارتفاع و شیب را نیز بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد الگوریتم بارش ماهواره‌ای TRMM معمولاً در بارش روزانه کم‌برآورد و در بارش متوسط، بیش‌برآورد است و بارش سالانه را به‌خوبی برآورد می‌کند؛ اما الگوریتم بارش PERSIANN به‌طور معناداری نسبت به ایستگاه‌های مشاهداتی کمتر برآورد می‌کند؛ و این برآورد کم در مقیاس ماهانه در الگوریتم PERSIANN به‌طور سیستماتیک بوده و برای همه ماه‌های سال روی داده است. نتایج تحقیق یادشده

بیشتر مناطق کوهستانی و صعب‌العبور تراکم کم ایستگاه‌های اندازه‌گیری و یا نبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش دارند و استفاده از نسل جدید داده‌های ماهواره‌ای به‌عنوان جایگزین اطلاعات بارش زمینی مطرح است. بنابراین، اگر روش‌ها، الگوریتم‌ها یا ابزاری به‌عنوان جایگزین روش‌ها و ابزارهای سنتی، پیشنهاد شود، باید دقت آن بررسی شده و کیفیت ویژگی‌های خطاها و عوامل مؤثر بر آنها (از جمله ناهم‌واری‌ها) در مکان‌های متفاوت ارزیابی شود. از طرف دیگر، اگر این بررسی‌ها به شناخت خطا و تصحیح و کاهش خطا منجر شود، برای بهبود و توسعه روش تولید داده بسیار مفید خواهد بود. اگرچه تحقیقات فراوانی در خصوص ارزیابی دقت انواع الگوریتم‌های ماهواره‌ای بارش در مناطق مختلف صورت گرفته است، یکی از جنبه‌های ارزیابی یادشده که کمتر مورد توجه قرار گرفته است، بررسی علل متغیر بودن دقت الگوریتم‌های یادشده و دستیابی به دقت یا میزان خطای الگوریتم منتخب در مناطق مختلف است. آنچه مسلم است، تأثیر ارتفاع نقطه مد نظر از سطح دریا و همچنین توزیع پستی و بلندی موجود در مقادیر بارش رسیده به سطح زمین است، به‌گونه‌ای که به تغییرات مکانی بیشتر بارش در سطح منجر می‌شود. از این‌رو، بررسی قابلیت الگوریتم‌های بارش و حساسیت مقادیر تخمینی آنها نسبت به ارتفاع و شیب، می‌تواند معیار مناسبی برای تعیین محدوده مجاز ارتفاعی برای استفاده از الگوریتم‌ها، در تخمین بارش این‌گونه مناطق، به شمار آید. در تحقیق حاضر دو الگوریتم جدید PERSIANN و تعدیل‌شده آن PERSIANN-CDR که در سال‌های اخیر ارائه شده‌اند [۱۵] و ویژگی‌هایی همچون پوشش سراسری و دقت مناسب مکانی و زمانی بررسی شد. همچنین، به منظور دستیابی به ارتباط بین محدوده ارتفاعی و شیب با عملکرد الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای، این الگوریتم‌ها و پهنه‌بندی خطاهای آنها در سطح حوضه آبریز حله، ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

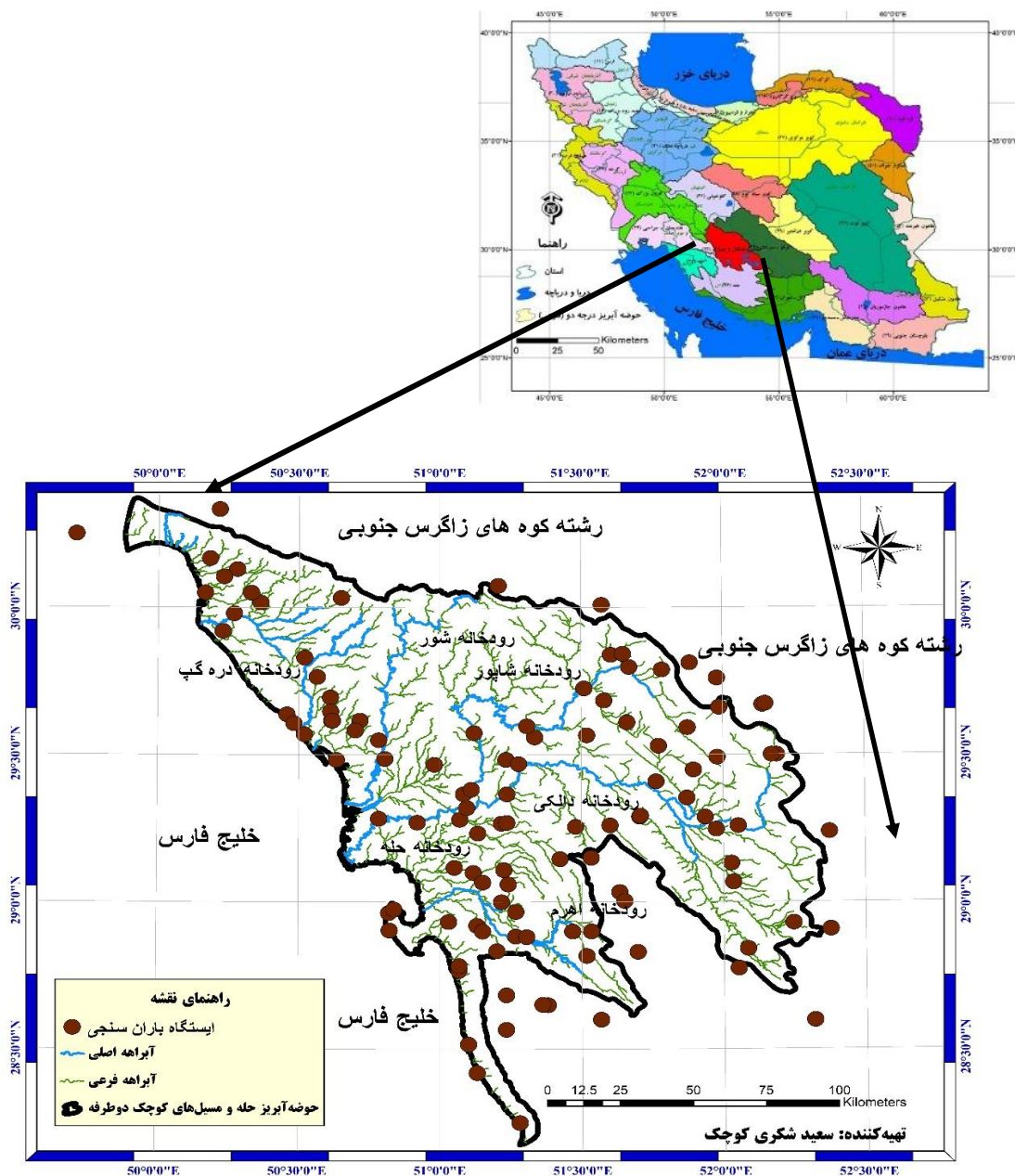
منطقه مطالعه شده

حوضه آبریز حله و مسیل‌های کوچک دو طرف آن در جنوب غرب کشور قرار دارد. حوضه یادشده به لحاظ تقسیم‌های کشوری از این گستره ۵۶ درصد مساحت در استان بوشهر، ۴۱/۳ درصد در استان فارس، ۱/۴ درصد در استان خوزستان

نشان می‌دهد عملکرد هر دو الگوریتم به‌صورت معنادار به شیب و ارتفاع وابسته است [۹]. قلی‌نژاد (۲۰۱۰) در تحقیقی توزیع مکانی بارش‌های شدید در منطقه کوهستانی سهند را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بررسی کرد. در بخشی از تحقیق یادشده ارتباط بارش‌های شدید و اطلاعات حاصل از ماهواره TRMM بررسی شده است. نتایج پژوهش ایشان نشان می‌دهد همبستگی بین داده‌های ماهواره TRMM با ارتفاع در سطح ۹۹ درصد معنادار است. همچنین، همبستگی مثبت و ارتباط زیاد بین داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و ارتفاع را نشان می‌دهد [۱۰]. دزفولی و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی و ارزیابی اطلاعات دو الگوریتم بارش ماهواره‌ای PERSIANN و TRMM-3B42 V 7 در حوضه گرگان‌رود پرداختند. نتایج تحقیق یادشده نشان می‌دهد عملکرد الگوریتم TRMM-3B42 V 7 نسبت به PERSIANN بهتر است [۱۱]. خوارزمی (۲۰۱۳) نیز در تحقیق خود در مناطق مختلف ایران با شرایط متفاوت آب‌وهوایی به نتیجه مشابه تحقیق دزفولی و همکاران (۲۰۱۶) رسیدند [۱۲]. غضنفری مقدم و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقی به مقایسه مدل PERSIANN با روش‌های درون‌یابی به منظور کاربرد در تخمین مقادیر بارندگی روزانه در محدوده استان خراسان شمالی پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد خروجی مدل PERSIANN همبستگی بیشتری با داده‌های ایستگاه‌های زمینی نسبت به روش‌های درون‌یابی دارد [۱۳]. تان و همکاران (۲۰۱۵) شش محصول ماهواره‌ای با وضوح زیاد، روی کشور مالزی را ارزیابی کردند. الگوریتم‌های استفاده‌شده در تحقیق یادشده شامل -TMPA، -CMORPH، -GPCP-1DD، -3B42RTV7، -3B42V7 و PERSIANN-CDR و APHRODITE است. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد به‌طور کلی -TMPA-3B42V7 و APHRODITE بهترین عملکرد را دارد، در حالی که بدترین عملکرد مربوط به -GPCP-1DD است. محصولات -TMPA، -PERSIANN-CDR، -3B42RTV7، -3B42V7 کمی بیش‌برآوردند، اما محصولات -CMORPH و APHRODITE به‌طور معناداری کم‌برآوردند. تمامی محصولات در بارش‌های ضعیف (Imm/day) و بارش‌های حدی ($20mm/day$) کم‌برآوردند، ولی برای رویدادهای بارشی کم ($1-20 mm/day$) مقداری ناچیز بیش‌برآوردند [۱۴].

نیمه خشک معتدل و در اقلیم خشک گرم واقع شده است [۱۶]. شکل ۱ موقعیت حوضه مطالعاتی حله را نشان می‌دهد. دشت‌های این حوضه که نواحی پست بین ارتفاعات را تشکیل می‌دهند، غالباً از روند ارتفاعات تبعیت می‌کنند. ۵۹/۴ درصد از مساحت حوضه را ارتفاعات و ۴۰/۶ درصد از دشت تشکیل شده است. شرایط ناهمواری‌ها در این حوضه بسیار پیچیده است و حداکثر ارتفاع از سطح دریا، ۳۰۸۰ متر در رشته کوه‌های زاگرس جنوبی و حداقل آن، صفر در حاشیه خلیج فارس است.

و ۱/۳ درصد در استان کهگیلویه و بویراحمد قرار دارد. منطقه مطالعه شده از نظر جغرافیایی بین ۲۳' - ۲۳' تا ۲۳' - ۲۳' ۰۵۲ طول شرقی و ۱۰' - ۲۸' تا ۲۲' - ۳۰' عرض شمالی واقع شده است. وسعت درخور توجه، تنوع اقلیمی با رژیم‌های مختلف بارشی و وجود اختلاف ارتفاع زیاد و شرایط پیچیده ناهمواری از دلایل انتخاب این حوضه است، به طوری که وسعت کل حوضه ۲۱۲۷۴ کیلومترمربع بوده که از کرانه‌های خلیج فارس تا رشته کوه زاگرس جنوبی گسترده شده است. از نظر اقلیمی حوضه آبریز حله در اقلیم مرطوب سرد،



شکل ۱. نقشه موقعیت حوضه مطالعاتی رودخانه حله و موقعیت ایستگاه‌های باران سنجی

اطلاعات استفاده شده در تحقیق

در تحقیق حاضر از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی واقع در حوضه آبریز حله به‌عنوان داده‌های مشاهداتی استفاده شد. بنابراین، اطلاعات روزانه کلیه ایستگاه‌های باران‌سنجی سازمان هواشناسی کشوری و ایستگاه‌های وزارت نیرو شامل ایستگاه‌های سینوپتیک، اقلیمی، تبخیر سنجی و باران‌سنجی معمولی جمع‌آوری شد. بعد از بررسی صحت اطلاعات و حذف ایستگاه‌های دارای خطا یا داده‌های اندازه‌گیری نشده و شکاف در داده‌ها، در نهایت ۱۱۴ ایستگاه انتخاب شد. در تحقیق حاضر با توجه به وجود اطلاعات با کیفیت ایستگاه‌ها، بازه زمانی ابتدای سال ۲۰۰۳ تا انتهای سال ۲۰۱۶ به مدت ۱۴ سال برای ارزیابی الگوریتم بارش ماهواره‌ای انتخاب شد. شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی را نشان می‌دهد. اطلاعات حاصل از الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN و PERSIANN_CDR با دقت ۰/۲۵ درجه در محدوده حوضه آبریز به‌صورت روزانه و تحت فرمت NETCDF از سایت دانشگاه کالیفرنیا در ایرواین WWW.UCI.EDU اخذ شد.

الگوریتم بارش PERSIANN

مدل PERSIANN یک الگوریتم تخمین بارندگی با استفاده از سنسور دور با به‌کارگیری شبکه عصبی مصنوعی است. شو و همکاران (۱۹۹۷) این مدل را در دانشگاه آریزونا ارائه دادند [۱۷]. سپس، این مدل با استفاده از ماهواره‌های دارای ابزار میکروویوهای غیرفعال توسعه داده شد. رویکرد این الگوریتم، واسنجی داده‌های مادون قرمز^۱ با برآوردهای میکروویوهای غیرفعال^۲ است. پارامترهای مدل شبکه عصبی مصنوعی، به‌طور منظم با استفاده از تصاویر ماهواره‌های با مدار پایین^۳ مانند TRMM، NOAA-15-16-17 و DMSP-F15-F14-F15، به‌روز می‌شوند. با استفاده از روش یادشده، این محصول قادر است به‌صورت بازگشتی انطباق واسنجی را در مناطق مختلف انجام دهد. این الگوریتم در سه مرحله تصاویر مادون قرمز با طول موج بلند را به تخمین‌های بارندگی تبدیل می‌کند:

۱. محاسبه کمیت‌های میانگین و واریانس مربوط به دماهای بازتابش شده از سطح بالایی ابر در همسایگی سلول هدف؛

۲. دسته‌بندی ویژگی‌های استخراج‌شده؛

۳. تبدیل ویژگی‌های دسته‌بندی‌شده به میزان بارندگی.

واضح است که این رابطه به علت عوامل زیادی همچون خواص ابر (برای مثال، نوع و ارتفاع و ضخامت) و همچنین، شرایط جوی همراه با عدم اطمینان است. در واقع، پارامترهای شبکه عصبی هرگاه که داده‌های موج کوتاه قابل دسترسی باشد، تقریباً هر سه ساعت با روش آموزش، روزآمد می‌شوند؛ بنابراین نسخه کاربردی الگوریتم PERSIANN در دو روش موازی اجرا می‌شود [۱۸]:

۱. روش شبیه‌سازی که تخمین‌های بارش را در وضوح مکانی ۰/۲۵×۰/۲۵ درجه و زمانی ۳۰ دقیقه بر اساس داده‌های مادون قرمز ماهواره‌های زمین‌آهنگ به دست می‌آورد.

۲. روش به‌روز کردن که همواره پارامترهای الگوریتم را بر اساس سلول‌هایی که تخمین‌های بارش لحظه‌ای میکروویو غیرفعال دارند، به‌روز می‌کند. این روش برای بهبود کیفیت تخمین‌های بارش به‌دست‌آمده از مادون قرمز طراحی شده است.

محصول بارش PERSIANN با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه طول و عرض جغرافیایی و هر سه ساعت یک‌بار بین عرض جغرافیایی ۶۰° شمالی تا ۶۰° جنوبی و به‌صورت نزدیک به حال حاضر در دسترس است (در مرکز تحقیقاتی آب‌شناسی و سنسور از دور (center of CHRS (Hydrometeorology and Remote Sensing سایت دانشگاه کالیفرنیا در ایرواین (WWW.UCI.EDU))

الگوریتم بارش ماهواره‌ای PERSIANN- CDR

تصاویر ماهواره زمین‌آهنگ GridSat-B1 IRWIN با دقت زمانی ۳ ساعته و دقت مکانی ۰/۲۵ درجه به‌عنوان یکی از ورودی‌های اصلی الگوریتم PERSIANN است. داده‌های مادون قرمز GridSat-B1، که به‌عنوان مجموعه داده‌های مهم اقلیمی، NOAA، مرکز ملی اطلاعات آب و هوا (NCDC) در یک بایگانی از اطلاعات ماهواره‌های زمین‌ثابت GEO که توسط پروژه بین‌المللی ISCCP^۴ تهیه شده است، ذخیره و بایگانی می‌شود. ISCCP-B1 مشاهدات ماهواره‌های زمین‌آهنگ، از جمله سری ماهواره‌های GOES^۵، سری

1. Infrared, IR
2. Passive Microwaves, PMW
3. Low-orbital

4. International Satellite Cloud Climatology
5. Geostationary Operational Environmental Satellite

سپس، با استفاده از اطلاعات الگوریتم ماهواره‌ای و اطلاعات به‌دست‌آمده از روش چندضلعی تیسن در هر سلول میزان شاخص‌های خطاها در سه مقیاس زمانی (روزانه، ماهانه و سالانه) و دو مقیاس مکانی (سلول و حوضه) برآورد می‌شود. به‌منظور بررسی توانایی هر دو الگوریتم در شدت‌های مختلف بارش، مقادیر مختلف بارش طبقه‌بندی شده و در هر طبقه از شدت‌های بارش مقادیر شاخص خطا محاسبه شد. به این منظور، بارش‌های روزانه به شش طبقه از نظر شدت بارش طبقه‌بندی شده و در جدول ۱ ارائه شده است. با استفاده از ایستگاه ثابت پوشیگان با داده‌های مناسب و داده‌های ساعتی الگوریتم‌های بارش PERSIANN و PERSIANN-CDR منحنی شدت-مدت و فراوانی با منابع مختلف داده و مقایسه آنها ترسیم شد. در مرحله بعد به‌منظور بررسی تأثیر ارتفاع در عملکرد الگوریتم بارش ماهواره‌ای، در هر سلول شاخص‌های ضریب همبستگی CC و مجذور میانگین مربعات خطاها RMSE استخراج می‌شود و در مقابل، با استفاده از متوسط ارتفاع و شیب نسبی به‌دست‌آمده از نقشه رقمی ارتفاعی (DEM) در هر سلول، رابطه رگرسیون بین ارتفاع و شیب نسبی و خطای الگوریتم‌ها به دست می‌آید. شکل ۲ موقعیت سلول‌ها و شبکه‌بندی تیسن روی حوضه و سلول‌ها را نشان می‌دهد. برای مقایسه کمی برآوردهای الگوریتم‌های مختلف بارش ماهواره‌ای PERSIANN و PERSIANN-CDR با بارش‌های ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی و شبکه‌بندی تیسن در سه مقیاس زمانی (روزانه، ماهانه و سالانه) از معیارهای آماری خطای مختلف نیز استفاده می‌شود. از طریق تجزیه و تحلیل این آماره‌ها، می‌توان نتایج مناسبی در زمینه موفقیت و مناسب بودن الگوریتم‌ها PERSIANN و ضریب همبستگی CC، ME، MAE، RMSE، NRMSE و MB است که شرح آماره و چگونگی محاسبه در جدول ۲ ارائه شده است [۲۰]. که در آنها O مقادیر داده‌های مشاهده‌ای و S مقادیر داده‌های برآوردی الگوریتم‌های مختلف بارش ماهواره‌ای PERSIANN و PERSIANN-CDR در مقیاس‌های مختلف است. برای مقایسه و ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها در شدت‌های مختلف بارش، از دو آماره ارزیابی چندگانه که بیش‌برآورد یا کم‌برآورد بودن را

ماهواره‌ای هواشناسی اروپا (Meteosat)، سری ماهواره‌های هواشناسی زمین‌ثابت ژاپن (GMS) و سری ماهواره‌های چین FY2^۱ است. داده‌های ماهواره‌ای GridSat-B1 از طریق ادغام اطلاعات ISCEP- B1 استخراج شده است. GridSat-B1 اطلاعات تقریباً جهانی را برای سه کانال مرئی، مادون قرمز (IRWIN) و مادون قرمز بخار آب (IRWVP) فراهم می‌کند. داده‌های دمای درخشندگی مادون قرمز به‌صورت میانگین ۰/۲۵ درجه و به‌صورت مقیاس بالا هستند و از یکم ژانویه ۱۹۸۰ تا زمان فعلی، با پوشش جهانی از ۷۰ درجه جنوبی تا ۷۰ درجه شمالی و از ۱۸۰ درجه غربی تا ۱۸۰ درجه شرقی را پوشش می‌دهند. باید توجه داشت در اطلاعات الگوریتم PERSIANN-B1 هیچ‌گونه داده‌های میکروویو غیرفعال (PMW) وجود ندارد و تعدیل Bais انجام نمی‌شود. در الگوریتم PERSIANN-CDR اطلاعات مدل PERSIANN-B1 با استفاده از اطلاعات ماهانه GPCP^۲ با دقت مکانی ۲/۵ درجه تعدیل Bais انجام شده و با تجمیع آن، بارش روزانه تولید می‌شود [۱۹].

روش تحقیق

در تحقیق حاضر با توجه به ابعاد اطلاعات ماهواره‌های الگوریتم PERSIANN و PERSIANN-CDR که ۰/۲۵ درجه در عرض و طول جغرافیایی است، ابتدا مرز حوضه آبریز حله استخراج شد. سپس، سلول‌هایی که در محدوده حوضه قرار می‌گرفتند، تعیین شد. در نهایت، ۳۳ سلول شناسایی شد و شماره‌های ۱ تا ۳۳ به آنها اختصاص یافت. شکل ۲ موقعیت سلول‌های مد نظر را با شماره اختصاصی نشان می‌دهد. از طرف دیگر، با استفاده از اطلاعات ۱۱۴ ایستگاه باران‌سنجی و موقعیت آنها به‌منظور امکان ارزیابی الگوریتم بارش ماهواره‌ای، بارش مشاهده‌ای در سطح هر سلول با استفاده از روش چندضلعی تیسن که روش ریاضی ساده است، برآورد شد. رابطه ۱ چگونگی محاسبه بارش با استفاده از روش چندضلعی تیسن را نشان می‌دهد.

$$P_g = \sum_{i=1}^n w_i P_{si} \quad (1)$$

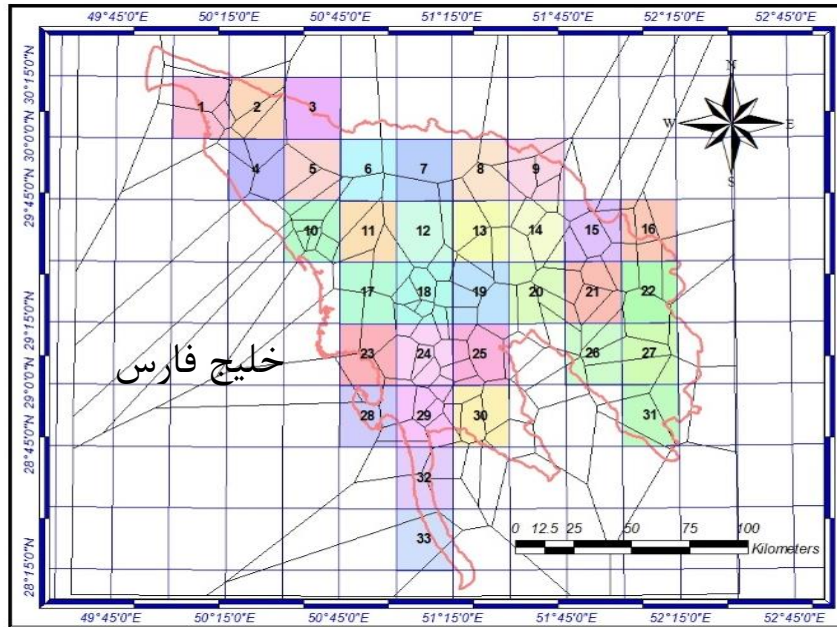
که در آن P_g میزان بارش در سلول مد نظر، w_i وزن ایستگاه i در سلول مد نظر و P_{si} میزان بارش ایستگاه زمینی i است.

1. Fen-Yung

2. Global Precipitation Climatology Project

شدت‌های مختلف را مهیا می‌سازد. روابط ارببی چندگانه و جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE) در جدول ۲ ارائه شده است.

مشخص می‌کند و آماره جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE) استفاده شده است. دلیل انتخاب آماره‌ها، بی‌بعد بودن آنهاست و زمینه مقایسه عملکرد در



شکل ۲. موقعیت ۳۳ سلول‌های الگوریتم بارش ماهواره‌ای PERSIANN و PERSIANN-CDR و شبکه‌بندی تیسن روی حوضه

جدول ۱. طبقه‌بندی بارش روزانه در شدت‌های مختلف (mm/day)

فرین	سنگین	زیاد	متوسط	کم	ضعیف	خیلی ضعیف	طبقه بارش
>۵۰	۵-۲۰	۲۰-۱۰	۱۰-۵	۵-۲	۲-۱	۱-۰	mm/day بارش

جدول ۲. شاخص‌های آماری ارزیابی الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای و بارش مشاهداتی

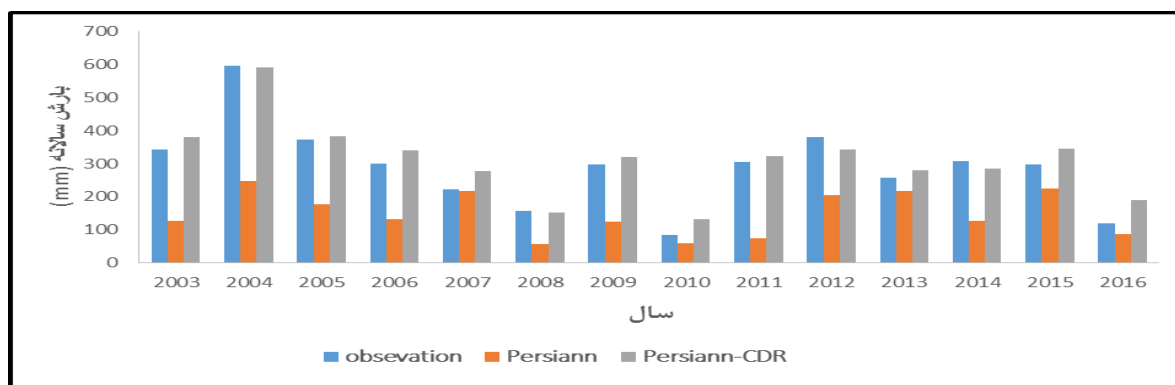
ردیف	شاخص	نام لاتین	علامت اختصاری	رابطه
۱	ضریب همبستگی	Coefficient Correlation	CC	$cc = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o}) \times (s_i - \bar{s})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2) \times (\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2)}}$
۲	میانگین خطا	Mean Error	ME	$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - o_i)}{n}$
۳	میانگین خطای مطلق	Mean Absolute Error	MAE	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n s_i - o_i }{n}$
۴	جذر میانگین مربعات خطا	Square Error-Root-Mean	RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - o_i)^2}{n}}$
۵	جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده	Square Error-Normalized Root-Mean	NRMSE	$NRMSE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - o_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n o_i}$
۶	ارببی چندگانه	Multiplicative Bias	MB	$MB = \frac{\bar{s}}{\bar{o}} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n o_i}$

نتایج و بحث

PERSIANN و ۰/۳۵۴۶ برای الگوریتم PERSIANN-CDR است؛ اما ضریب R^2 برای هر دو الگوریتم در مقیاس حوضه نسبت به مقیاس سلول پیشرفت داشته است. در مقیاس زمانی ماهانه روابط به دست آمده از مقایسه ۵۵۴۴ جفت داده مشاهداتی و برآوردی در سطح سلول و ۱۶۸ جفت داده به طور ماهانه در سطح حوضه است. با توجه به رابطه رگرسیونی و ضریب تبیین R^2 مشاهده می شود که الگوریتم PERSIANN همچنان نتایج ضعیفی در هر دو مقیاس سلول و حوضه دارد؛ اما الگوریتم تعدیل یافته PERSIANN-CDR از نظر عملکرد بهبود یافته و نتایج رضایت بخش است، به طوری که ضریب R^2 در مقیاس سلول، ۰/۷۵۸۸ و در مقیاس حوضه، ۰/۸۹۸۹ است. با توجه به رابطه رگرسیونی و ضریب تبیین R^2 مشاهده می شود که الگوریتم PERSIANN همچنان نتایج ضعیفی در هر دو مقیاس سلول و حوضه دارد، اما الگوریتم تعدیل یافته PERSIANN-CDR نتایج رضایت بخش دارد. با توجه به ضریب تبیین کم در مقیاس روزانه، مشخص می شود که هر دو الگوریتم در شناسایی روند تشکیل ابرهای باران زا به دلیل تغییرات زیاد در مقیاس روزانه مشکل دارند و به دلیل مقیاس روزانه بودن این خطاها در مقیاس ماهانه و سالانه انتشار می یابد، البته میزان خطا کاهش می یابد؛ اما در الگوریتم PERSIANN-CDR به دلیل عملیات تعدیل خطا با استفاده از داده های ماهانه GPCP، ضرایب تبیین بهبود می یابد.

ابتدا با بررسی و ارزیابی تطبیقی بین اطلاعات به دست آمده از الگوریتم ماهواره ای PERSIANN و PERSIANN-CDR در ۳۳ سلول با دقت ۰/۲۵ درجه و اطلاعات به دست آمده از روش شبکه بندی تیسن با استفاده از اطلاعات روزانه ایستگاه های زمینی پرداخته شد. شکل ۳ نمودار بارش سالانه در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۶ است. همان طور مشاهده می شود، بارش تخمین زده شده توسط الگوریتم PERSIANN در همه سال ها به شدت کمتر از بارش مشاهداتی است و وجود یک خطای سیستماتیک در الگوریتم را بیان می کند؛ اما الگوریتم بارش ماهواره ای PERSIANN-CDR به جز در برخی سال ها باران را نسبت به اندازه گیری مشاهداتی بیشتر برآورد کرده است.

جدول ۳ روابط همبستگی خروجی اطلاعات الگوریتم های بارش ماهواره ای PERSIANN و PERSIANN-CDR در مقیاس زمانی روزانه، ماهانه و سالانه و در مقیاس مکانی سلول و حوضه آبریز را نشان می دهد. در مقیاس روزانه، روابط به دست آمده از مقایسه ۱۶۸۷۶۲ جفت داده مشاهداتی و برآوردی در سطح سلول و ۵۱۱۴ جفت داده به طور متوسط روزانه در سطح حوضه است. با توجه به رابطه رگرسیونی و ضریب تبیین (R^2)، مشاهده می شود اگرچه الگوریتم تعدیل یافته PERSIANN-CDR در مقیاس روزانه از نظر عملکرد بهبود یافته، ولی نتایج رضایت بخش نیست. به طوری که ضریب R^2 در مقیاس سلول ۰/۱۶۲۸ برای الگوریتم



شکل ۳. میزان بارندگی سالانه در سطح حوضه بر اساس ایستگاه های مشاهده ای، الگوریتم های بارش ماهواره ای PERSIANN و PERSIANN-CDR در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۶

جدول ۳. روابط رگرسیونی در مقیاس زمانی روزانه، ماهانه و سالانه و مقیاس مکانی سلول و حوضه

مقیاس مکانی	مقیاس زمانی	الگوریتم	رابطه رگرسیون	n	R ²
روزانه	سلول	PERSIANN	$Y=0.6698X+0.5187$	۱۶۸۷۶۲	۰/۱۶۲۸
		PERSIANN-CDR	$Y=0.7504X+0.1527$	۱۶۸۷۶۲	۰/۳۵۴۶
	حوضه	PERSIANN	$Y=0.7193X+0.4987$	۵۱۱۴	۰/۲۲۳۲
		PERSIANN-CDR	$Y=0.8072X+0.1049$	۵۱۱۴	۰/۵۰۹۸
ماهانه	سلول	PERSIANN	$Y=1.0661X+10.212$	۵۵۴۴	۰/۲۸۴
		PERSIANN-CDR	$Y=0.9943-2.3337$	۵۵۴۴	۰/۷۵۸۸
	حوضه	PERSIANN	$Y=1.1146X+9.6147$	۱۶۸	۰/۳۳۸
		PERSIANN-CDR	$Y=1.0167X-2.9126$	۱۶۸	۰/۸۹۸۹
سالانه	سلول	PERSIANN	$Y=1.2261X+107.23$	۴۶۲	۰/۲۶۰۱
		PERSIANN-CDR	$Y=1.0491X-36.656$	۴۶۲	۰/۵۵۹۱
	حوضه	PERSIANN	$Y=1.2441X+104.56$	۱۴	۰/۴۲۰۲
		PERSIANN-CDR	$Y=1.0868X-48.355$	۱۴	۰/۹۴۴۶

RMSE با توجه به جدول ۴ برای الگوریتم PERSIANN در مقیاس سلول ۴/۰۴۹ میلی‌متر و در مقیاس حوضه ۳/۲۶۲ میلی‌متر بوده و برای PERSIANN-CDR در مقیاس سلول ۳/۵۶۳ میلی‌متر و در مقیاس حوضه ۲/۵۹۳ میلی‌متر است. شاخص ضریب همبستگی CC در جدول ۴ نشان دهنده همبستگی کم است، اما در الگوریتم تعدیل خطاشده PERSIANN-CDR بهبودهایی یافت می‌شود. به طوری که در مقیاس حوضه این ضریب ۰/۷۱۴ است. با توجه به جدول ۴ در مقیاس زمانی ماهانه شاخص میانگین خطاها (ME) در الگوریتم PERSIANN در مقیاس زمانی ماهانه ۱۱/۰۲۷- است، اما در الگوریتم تعدیل یافته PERSIANN-CDR مشاهده می‌شود که شاخص (ME) بسیار کمتر از ۲/۴۸ و مثبت است. از نظر شاخص RMSE، با توجه به جدول ۴ برای الگوریتم PERSIANN در مقیاس سلول ۳۹/۴۸۶ میلی‌متر و در مقیاس حوضه ۳۵/۱۲۱ میلی‌متر است. همچنین، برای PERSIANN-CDR در مقیاس سلول ۲۲/۱۳۱ میلی‌متر و در مقیاس حوضه ۱۳/۲۴۶ میلی‌متر است. در مقیاس زمانی سالانه، شاخص میانگین خطاها (ME) در الگوریتم PERSIANN خطای بزرگ ۱۴۰/۶۵۸- دارد، در حالی که شاخص میانگین خطاها در الگوریتم تعدیل یافته PERSIANN-CDR ۲۱/۴۴ است. برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها در مقیاس زمانی مختلف نمی‌توان از شاخص‌های میانگین خطاها (ME) یا جذر میانگین مربعات خطاها RMSE استفاده کرد، زیرا این شاخص‌ها ابعاد دارند و

جدول ۴ شاخص‌های آماری ارزیابی در مقیاس زمانی روزانه، ماهانه و سالانه و برای دو مقیاس مکانی سلول و حوضه آبریز ارائه می‌دهد. با توجه به شاخص میانگین خطای مطلق (MAE) در مقیاس زمانی روزانه و مقیاس مکانی سلول در الگوریتم PERSIANN ۰/۸۴۹ میلی‌متر و برای الگوریتم PERSIANN-CDR ۰/۹۴۰ میلی‌متر است. در مقیاس زمانی ماهانه و مقیاس مکانی سلول برای الگوریتم PERSIANN ۱۸/۷۱۷ میلی‌متر و برای الگوریتم PERSIANN-CDR ۱۲/۱۴۱ میلی‌متر است. به منظور تعیین چگونگی برآورد الگوریتم‌های بارش از نظر بیش‌برآورد یا کم‌برآورد بودن از مقادیر شاخص میانگین خطاها (ME) و شاخص اریبی چندگانه استفاده شد. بنابراین، با توجه به شاخص میانگین خطاها (ME) و شاخص اریبی چندگانه در الگوریتم PERSIANN در مقیاس زمانی روزانه به ترتیب ۰/۳۸۵- و ۰/۵۱۲ است. منفی بودن در شاخص میانگین خطاها (ME) و یا کوچک‌تر از یک بودن در شاخص اریبی چندگانه (MB) نشان می‌دهد الگوریتم PERSIANN کم‌برآورد است که با نتایج تحقیق کتیرایی (۲۰۱۴) و هرپا و همکاران (۲۰۱۰) انطباق دارد [۲۱ و ۲۲]. اما در الگوریتم تعدیل یافته PERSIANN-CDR مشاهده می‌شود شاخص (ME) ۰/۰۵۹، مثبت و شاخص (MB) ۱/۰۷۵ بیشتر از یک بوده و به معنای بیش‌برآورد بودن این الگوریتم است. بهترین شاخص از نظر مقایسه و ارزیابی خطاها شاخص جذر میانگین مربعات خطاها RMSE است. از نظر شاخص

NRMSE کاهش می‌یابد و عملکرد بهتر می‌شود، زیرا تغییرات بارش در مقیاس زمانی روزانه بسیار بیشتر از مقیاس زمانی ماهانه و سالانه است. با تجمیع مقادیر بارش روزانه، بارش ماهانه به دست می‌آید و تبع آن، خطاها در برآورد بارش روزانه با هم ادغام شده و سرشکن می‌شوند. بنابراین، عملکرد الگوریتم‌ها در مقیاس ماهانه و سالانه بهتر می‌شود. نتایج به دست آمده از مقایسه ضریب همبستگی و ضریب تبیین نیز نشان‌دهنده همین مطلب است.

طبیعی است که بارش روزانه، ماهانه و سالانه از نظر بزرگی اعداد با یکدیگر تفاوت داشته باشند، زیرا بارش ماهانه از تجمیع بارش روزانه و بارش سالانه از تجمیع بارش ماهانه به دست می‌آید. بنابراین، برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها از شاخص نرمال شده و بی‌بعد شاخص جذر میانگین مربعات خطای نرمال NRMSE استفاده شد. با توجه به این شاخص که در جدول ۴ ارائه شده است، مشاهده می‌شود که با افزایش مقیاس زمانی داده بارش، میزان شاخص خطا

جدول ۴. جدول شاخص‌های آماری ارزیابی و عملکردی در مقیاس زمانی روزانه و مقیاس مکانی سلول و حوضه

مقیاس مکانی	مقیاس زمانی	الگوریتم	ME	MAE	RMSE	NRMSE	Pcc	MB
روزانه	سلول	PERSIANN	-۰/۳۸۵	۰/۸۴۹	۴/۰۴۹	۵/۱۲۶	۰/۴۰۳	۰/۵۱۲
		PERSIANN-CDR	۰/۰۵۹	۰/۹۴۰	۳/۵۶۳	۴/۵۱۰	۰/۵۹۵	۱/۰۷۵
	حوضه	PERSIANN	-۰/۳۸۵	۰/۷۸۸	۳/۲۶۲	۴/۱۳۰	۰/۴۷۲	۰/۵۱۲
		PERSIANN-CDR	۰/۰۵۹	۰/۷۷۷	۲/۵۹۳	۳/۲۸۳	۰/۷۱۴	۱/۰۷۵
ماهانه	سلول	PERSIANN	-۱۱/۰۲۷	۱۸/۷۱۷	۳۹/۴۸۶	۱/۶۹۱	۰/۵۳۳	۰/۵۲۸
		PERSIANN-CDR	۲/۴۸	۱۲/۱۴۱	۲۲/۱۳۱	۰/۹۴۸	۰/۸۷۱	۱/۱۰۶
	حوضه	PERSIANN	-۱۱/۰۲۷	۱۷/۲۶۶	۳۵/۱۲۱	۱/۵۰۴	۰/۵۸۱	۰/۵۲۸
		PERSIANN-CDR	۲/۴۸	۷/۰۲۶	۱۳/۲۴۶	۰/۵۶۷	۰/۹۴۸	۱/۱۰۶
سالانه	سلول	PERSIANN	-۱۴۰/۶۵۸	۱۴۹/۴۸۸	۲۰۰/۵۴۰	۰/۶۹۵	۰/۵۱۰	۰/۵۱۲
		PERSIANN-CDR	۲۱/۴۴	۸۸/۰۲۰	۱۱۱/۹۱۶	۰/۳۸۸	۰/۷۴۸	۱/۰۷۴
	حوضه	PERSIANN	-۱۴۰/۶۵۸	۱۴۰/۶۵۸	۱۶۹/۲۷۱	۰/۵۸۷	۰/۶۴۸	۰/۵۱۲
		PERSIANN-CDR	۲۱/۴۴۵	۳۱/۷۷۸	۳۷/۰۷۴	۰/۱۲۸	۰/۹۷۲	۰/۶۲۶

چندگانه و شاخص جذر میانگین مربعات خطاها نرمال (NRMSE) برای مقایسه رفتار و عملکرد الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای در شدت‌های مختلف استفاده شد، زیرا این شاخص‌ها بی‌بعدند. از شاخص اریبی چندگانه Mb به منظور بررسی الگوریتم در مورد کم‌برآورد یا بیش‌برآورد بودن الگوریتم‌ها و از شاخص NRMSE به منظور تحلیل خطا و مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها استفاده شد. در الگوریتم PERSIANN با توجه به آماره NRMSE در جدول ۵ و شکل ۴ الف مشاهده می‌شود که آماره NRMSE با افزایش شدت بارش کاهش می‌یابد و با توجه به شکل ۴ الف شیب خط نزولی است. به طوری که میزان این آماره در بارش خیلی ضعیف (بین صفر تا یک میلی‌متر در روز) برای الگوریتم PERSIANN و PERSIANN-CDR بیشترین مقدار به ترتیب برابر با ۱۰/۵۳۰ و ۱۲/۲۴۴ است و با افزایش شدت بارش کاهش می‌یابد و به ترتیب به میزان ۰/۸۳۲ و

ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های بارش PERSIANN و PERSIANN-CDR در شدت‌های مختلف و ترسیم نمودار شدت - مدت - فراوانی

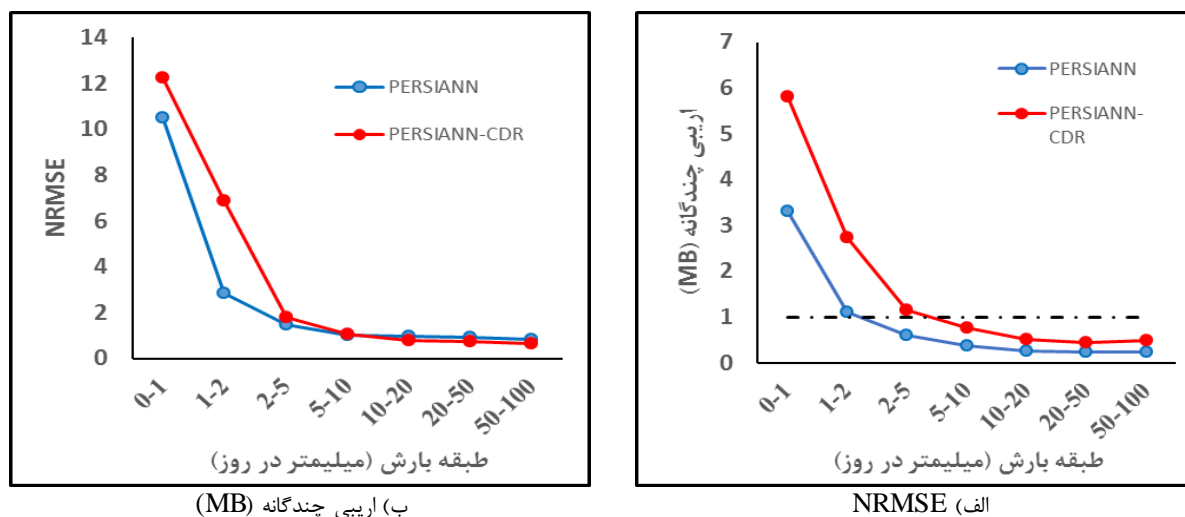
جدول ۵ برخی کمیت‌های آماری در شدت‌های مختلف بارش را به ترتیب برای الگوریتم‌های PERSIANN و PERSIANN-CDR ارائه می‌دهند. با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود شاخص میانگین خطا در شدت‌های مختلف، متفاوت است و نشان می‌دهد رفتار الگوریتم‌های PERSIANN-CDR و PERSIANN در شدت‌های مختلف، متفاوت است. با توجه به آماره میانگین خطای مطلق مشاهده می‌شود این شاخص با افزایش شدت بارش افزایش می‌یابد. مقادیر شاخص جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) نیز با افزایش میزان شدت بارش، افزایش می‌یابد؛ اما با توجه به بزرگی اعداد مقایسه شده نسبت به یکدیگر آن را نمی‌توان مبنای مقایسه قرار داد. بنابراین، شاخص اریبی

شده است، اما در موارد بیشتر از ۱۰ میلی‌متر در روز مشاهده می‌شود که هر دو الگوریتم کم‌برآوردند، اما مقادیر عددی اریبی در الگوریتم تعدیل یافته PERSIANN-CDR بیشتر از الگوریتم PERSIANN است و اریبی کمتر را نشان می‌دهد. مقایسه آماره NRMSE در جدول ۵ و شکل ۴ الف مورد یادشده را بهتر نشان می‌دهد. با توجه به آماره NRMSE در جدول ۵ مشاهده می‌شود در بارش‌های کم‌مقدار NRMSE در الگوریتم PERSIANN-CDR بیشتر از الگوریتم PERSIANN است و عملکرد ضعیف‌تر الگوریتم تعدیل یافته از الگوریتم نزدیک به زمان واقعی را نشان می‌دهد. همچنین، نشان‌دهنده عملیات تعدیل خطا در بارش‌های تا ۱۰ میلی‌متر در روز ناموفق بوده است. شکل ۵ (الف، ب و ج) منحنی شدت، مدت و فراوانی یا استفاده از اطلاعات به ترتیب ایستگاه ثبات بوشیگان و اطلاعات الگوریتم‌های PERSIANN و PERSIANN-CDR در سلول متناظر با آن یعنی سلول چهارده را ارائه می‌دهد. با بررسی منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی (شکل ۵) مشاهده می‌شود که کم‌برآورد بودن هر دو الگوریتم در شدت‌های زیاد که پیش‌تر به آن اشاره شد، سبب می‌شود که در دوره بازگشت‌های مختلف و با شدت‌های مختلف و مدت بارش متفاوت کم‌برآورد باشد و الگوریتم بارش PERSIANN-CDR نسبت به PERSIANN نیز کمتر است. باید توجه داشت میزان عمق بارش برای تمامی شدت‌ها بیش از ۱۰ میلی‌متر است. با توجه به جدول ۵ هر دو الگوریتم در این دامنه از عمق بارش کم‌برآورد بوده و مسئله در ترسیم منحنی شدت - مدت - فراوانی تأثیر گذاشته است.

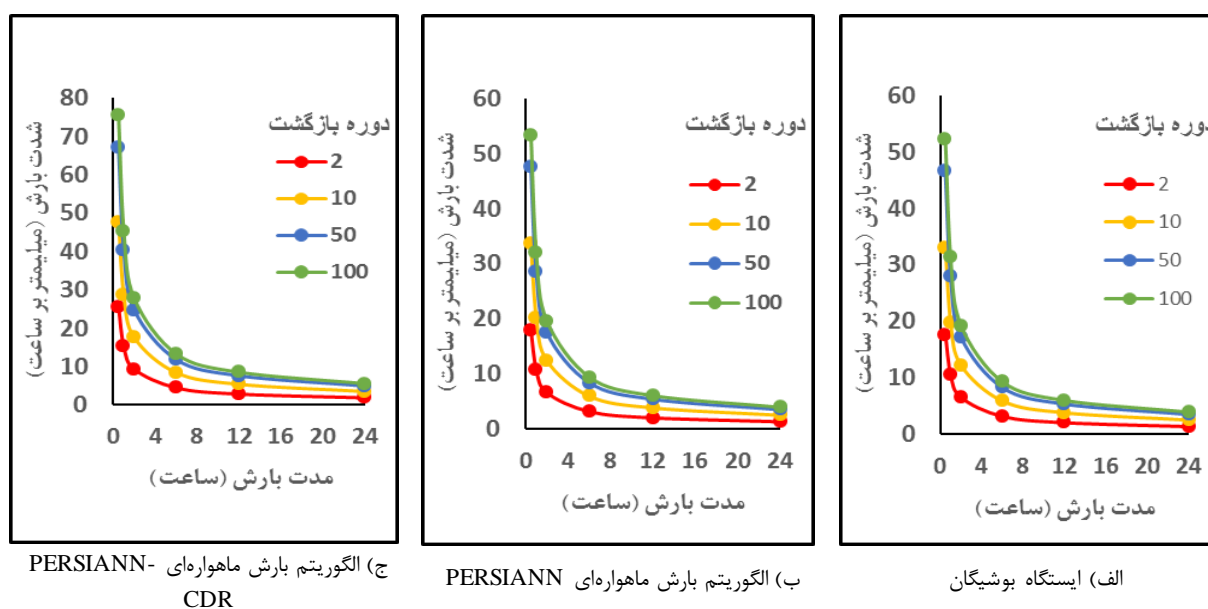
۰/۶۲۶، برای بارش‌های خیلی سنگین می‌رسد. با توجه آماره اریبی چندگانه جدول ۵ و شکل ۴ ب مشاهده می‌شود که آماره اریبی چندگانه در الگوریتم‌های PERSIANN و PERSIANN-CDR با افزایش میزان شدت بارش کاهش می‌یابد. به طوری که به ترتیب از میزان ۳/۳۰۷ و ۵/۸۰۹ برای بارش ملایم (صفر تا یک میلی‌متر در روز) کاهش می‌یابد تا به ترتیب به میزان ۰/۲۴۵ و ۰/۴۸۴ برای بارش خیلی سنگین (بیشتر از ۵۰ میلی‌متر در روز) می‌رسد. با توجه به این نکته که آماره اریبی چندگانه در تشخیص کم‌برآورد یا بیش‌برآورد بودن به کار می‌رود (اگر اریبی چندگانه کمتر از یک باشد، نشان‌دهنده کم‌برآورد بودن است و اگر بیشتر از یک باشد، بیش‌برآورد بودن را نشان می‌دهد) باید گفت که با توجه به مقادیر در جدول ۵ و شکل ۴ الگوریتم PERSIANN در بارش‌های کم یعنی بارش‌های تا ۲ میلی‌متر در روز بیش‌برآورد است؛ اما برای بارش‌های بیشتر از ۲ میلی‌متر در روز کم‌برآورد است. همچنین، در الگوریتم PERSIANN-CDR در بارش‌های کم یعنی بارش‌های تا ۵ میلی‌متر در روز بیش‌برآورد است؛ اما برای بارش‌های بیشتر از ۵ میلی‌متر در روز کم‌برآورد است. بنابراین، می‌توان گفت که به‌طور کلی رفتار الگوریتم‌های PERSIANN و PERSIANN-CDR در شدت‌های مختلف، متفاوت است. با توجه به مقایسه شاخص‌ها و شکل ۴ ب در هر دو الگوریتم PERSIANN و PERSIANN-CDR مشاهده می‌شود که مقادیر اریبی چندگانه برای ۲ میلی‌متر در روز در الگوریتم تعدیل یافته بیشتر از الگوریتم نزدیک به زمان واقعیت است. با توجه به بیشتر از یک بودن مشاهده می‌شود اریبی داده‌ها بیشتر

جدول ۵. کمیت‌های آماری ارزیابی الگوریتم بارش ماهواره‌ای PERSIANN در شدت‌های مختلف بارش (mm/day)

الگوریتم بارش ماهواره‌های	شدت بارش	خیلی ضعیف	ضعیف	کم	متوسط	زیاد	سنگین	فرین
PERSIANN	شاخص	۱-۰	۲-۱	۵-۲	۱۰-۵	۲۰-۱۰	۵۰-۲۰	۵۰<
	ME	۰/۷	۰/۲	-۱/۳	-۴/۵	-۱۰/۵	-۲۲/۲	-۴۸/۴
	MB	۳/۳۰۷	۱/۱۱۱	۰/۵۹۶	۰/۳۶۹	۰/۲۵۹	۰/۲۳۰	۰/۲۴۵
	RMSE	۳/۱۶۴	۴/۱۲۷	۴/۸۰۲	۷/۲۵۱	۱۳/۴۴۷	۲۷/۳۶۹	۵۳/۳۴۲
	NRMSE	۱۰/۵۳۰	۲/۸۶۲	۱/۴۷۰	۱/۰۱۲	۰/۹۴۷	۰/۹۱۱	۰/۸۳۲
PERSIANN-CDR	ME	۱/۴	۲/۵	۰/۵	-۱/۷	-۶/۸	-۱۶/۶	-۳۳/۱
	MB	۵/۸۰۹	۲/۷۳۰	۱/۱۴۷	۰/۷۵۷	۰/۵۲۱	۰/۴۴۶	۰/۴۸۴
	RMSE	۳/۶۸۰	۹/۹۴۸	۵/۹۲۰	۷/۵۲۷	۱۱/۲۶۱	۲۱/۵۶۱	۴۰/۰۹۷
	NRMSE	۱۲/۲۴۴	۶/۹۰۰	۱/۸۱۲	۱/۰۵۱	۰/۷۹۳	۰/۷۱۷	۰/۶۲۶



شکل ۴. نمودار شاخص‌های آماری ارزیابی الگوریتم‌های گروه PERSIANN و PERSIANN-CDR در شدت‌های مختلف بارش



شکل ۵. منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی (برحسب میلی‌متر بر ساعت)

مربعات خطاها (RMSE) و شاخص ضریب همبستگی برای دو الگوریتم PERSIANN و PERSIANN-CDR را در سطح حوضه نشان می‌دهد. همان‌طور بیان شد، حوضه آبریز حله از کرانه‌های خلیج فارس تا ارتفاعات رشته‌کوه زاگرس گسترده شده است و از لحاظ تغییرات ارتفاع پیچیده است، به طوری که ۳۰۸۰ متر اختلاف ارتفاع دارد. با توجه به شکل ۷ که توزیع مکانی شاخص RMSE در مقیاس ماهانه را برای دو الگوریتم PERSIANN و PERSIANN-CDR نشان می‌دهد و مشاهده شکل ۶ که چگونگی روند تغییرات ارتفاعات را نشان می‌دهد، می‌توان گفت که شاخص RMSE از کمترین مقدار خود در

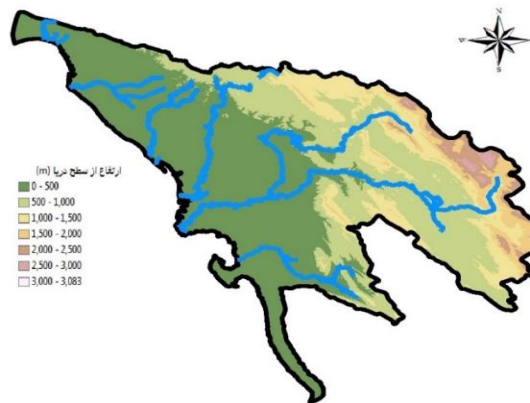
پهنه‌بندی خطاهای الگوریتم‌های بارش PERSIANN و

PERSIANN-CDR

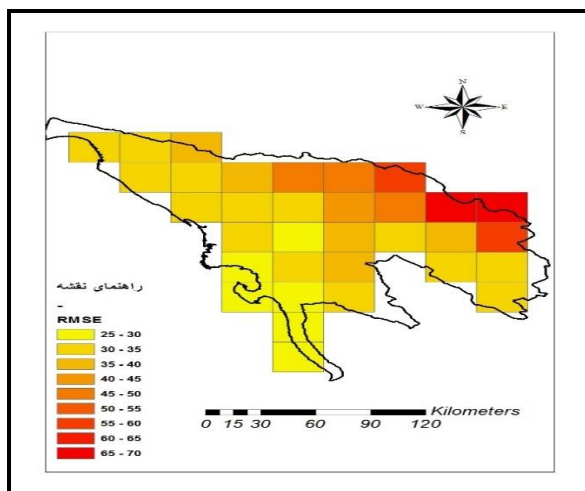
در این مرحله از تحقیق شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) و شاخص ضریب همبستگی برای هر ۳۳ سلول به صورت جداگانه، محاسبه شده و سپس پهنه‌بندی شد. شکل ۶ نقشه راقمی ارتفاعی حوضه آبریز حله است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات ارتفاعی از دشت‌های مسطح و کم‌ارتفاع ساحلی واقع در غرب حوضه شروع می‌شود و به شمال و شرق حوضه مناطق مرتفع رشته‌کوه زاگرس جنوبی منتهی می‌شود. بیشترین ارتفاع ۳۰۸۰ متر است. شکل‌های ۷ و ۸ توزیع مکانی شاخص ارزیابی جذر میانگین

حوضه نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که ضریب همبستگی نیز با فاصله گرفتن از دریا و تغییر ارتفاع و افزایش آن، کاهش می‌یابد. به‌طوری که در الگوریتم PERSIANN معیار ضریب همبستگی از ۰/۷۲ در کرانه خلیج فارس کاهش می‌یابد و در ارتفاعات رشته‌کوه زاگرس به ۰/۵۳ می‌رسد. در الگوریتم PERSIANN-CDR نیز بیشترین ضریب همبستگی ۰/۹۶۸ در کرانه خلیج فارس است. تغییرات شاخص‌های خطا و ضریب همبستگی در سایر مقیاس زمانی روزانه و سالانه نتایج مشابهی دارد و از ارائه نقشه‌ها خودداری می‌شود. با مقایسه نقشه‌های دو الگوریتم در هر دو شاخص جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) و شاخص ضریب همبستگی مشاهده می‌شود که در الگوریتم PERSIANN-CDR پراکندگی خطاها کمتر و یکنواخت‌تر است.

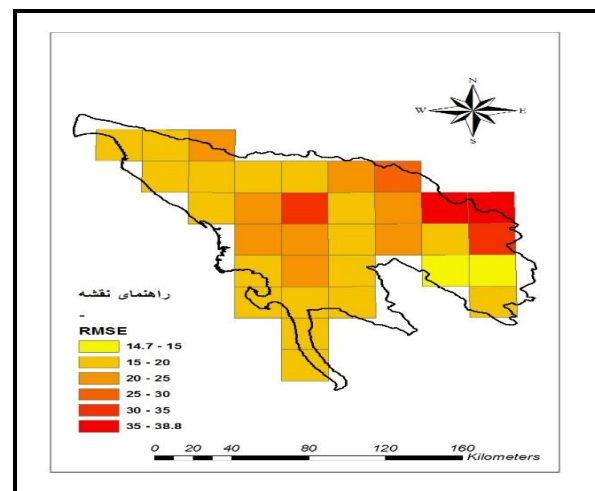
کرانه‌های خلیج فارس و نقاط پست و دشت‌های کم‌ارتفاع و مسطح شروع می‌شود (برای الگوریتم PERSIANN سلول ۲۹، ۲۵/۸۶ میلی‌متر، برای الگوریتم PERSIANN-CDR سلول ۱۴/۷، ۲۶ میلی‌متر) و با فاصله گرفتن از دریا و ارتفاع گرفتن حوضه و نزدیک شدن به سرشاخه‌های رودخانه حله بر مقدار شاخص RMSE افزوده می‌شود. نکته یادشده در هر دو الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN- و PERSIANN CDR به‌وضوح مشاهده می‌شود و بیانگر این مطلب است که هر دو الگوریتم با افزایش ارتفاع، دچار کاهش دقت شده‌اند و این الگوریتم‌ها احتمالاً بارش‌های اروگرافیک یا کوهستانی را به دلیل تأثیری که ارتفاعات بر فرایند بارش دارد، نمی‌توانند به‌درستی تشخیص بدهند و بارش آن را تخمین بزنند. شکل ۸ توزیع مکانی شاخص ضریب همبستگی در مقیاس ماهانه برای دو الگوریتم PERSIANN و PERSIANN-CDR را در سطح



شکل ۶. نقشه رقمی ارتفاعی حوضه آبریز حله

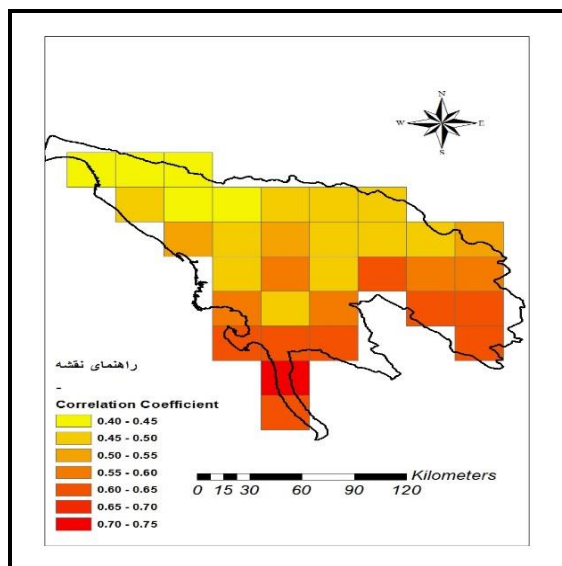


ب) PERSIANN-CDR

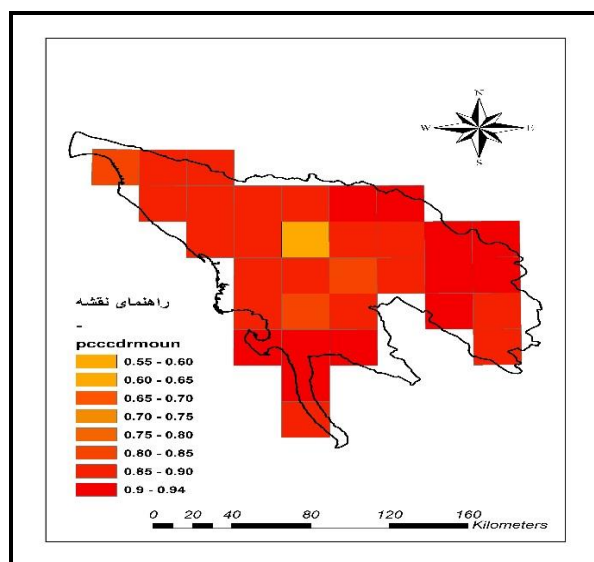


الف) PERSIANN

شکل ۷. توزیع مکانی مقادیر RMSE الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای در سطح حوضه آبریز حله در مقیاس ماهانه



PERSIANN-CDR (ب)



PERSIANN (الف)

شکل ۸. توزیع مکانی مقادیر ضریب همبستگی الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای در سطح حوضه آبریز حله در مقیاس ماهانه

به رابطه برآزش داده‌شده در مورد الگوریتم PERSIANN در همه موارد با افزایش ارتفاع، شاخص خطا افزایش یافته و این افزایش تصاعدی است. در مورد الگوریتم PERSIANN-CDR به‌خصوص در مقیاس ماهانه و سالانه در محدوده از ارتفاع (تا ۵۰۰ یا ۶۰۰ متر) با افزایش ارتفاع مقدار خطا با شیب ملایم کاهش یافته است یا تغییر محسوسی ندارد. به طوری که در مقیاس ماهانه با حل معادله در ارتفاع ۵۰۰ متری حداقل RMSE و در مقیاس سالانه در ارتفاع ۶۶۰ متری حداقل RMSE وجود دارد. شاخص RMSE در الگوریتم PERSIANN-CDR در ارتفاع بیشتر به صورت نمایی افزایش می‌یابد. به بیان بهتر، با افزایش ارتفاع، دقت برآورد بارش الگوریتم به شدت کاهش می‌یابد. این نتایج مشابه تحقیقی است که توسط گاوو و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی سه الگوریتم بارش ماهواره‌ای PERSIANN، TMPA و CMORPH در فلات تبت پرداخته شده و به وابستگی عملکرد الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای به عوامل توپوگرافی تأکید دارد [۲۳].

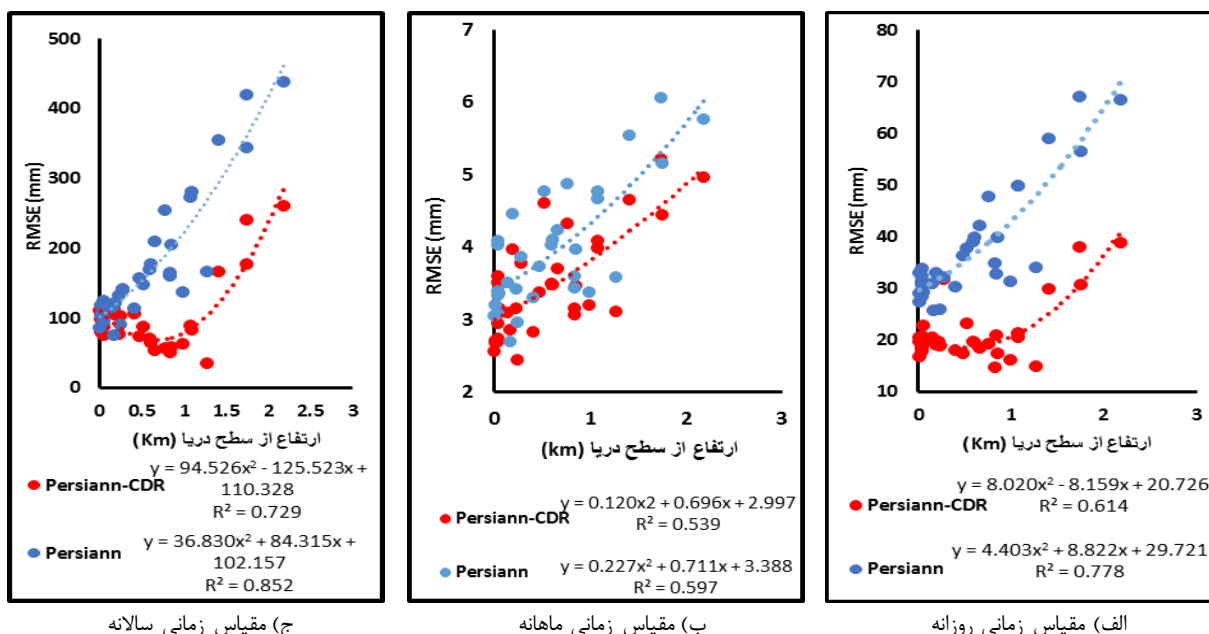
شکل ۱۰ نمودار تغییرات شیب نسبی سلول‌ها و ارزیابی جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) در مقیاس‌های زمانی مختلف را نشان می‌دهد. بنابراین، برای کمی کردن این تغییرات، به ازای هر سلول و با استفاده از نقشه رقوم، شیب نسبی متوسط آن سلول به دست آمد. از طرفی، برای هر سلول مقادیر شاخص آماری خطا و جذر میانگین مربعات

رابطه تغییرات ارتفاع و شیب نسبی با معیار آماری خطای مجذور میانگین مربعات خطاها (RMSE)

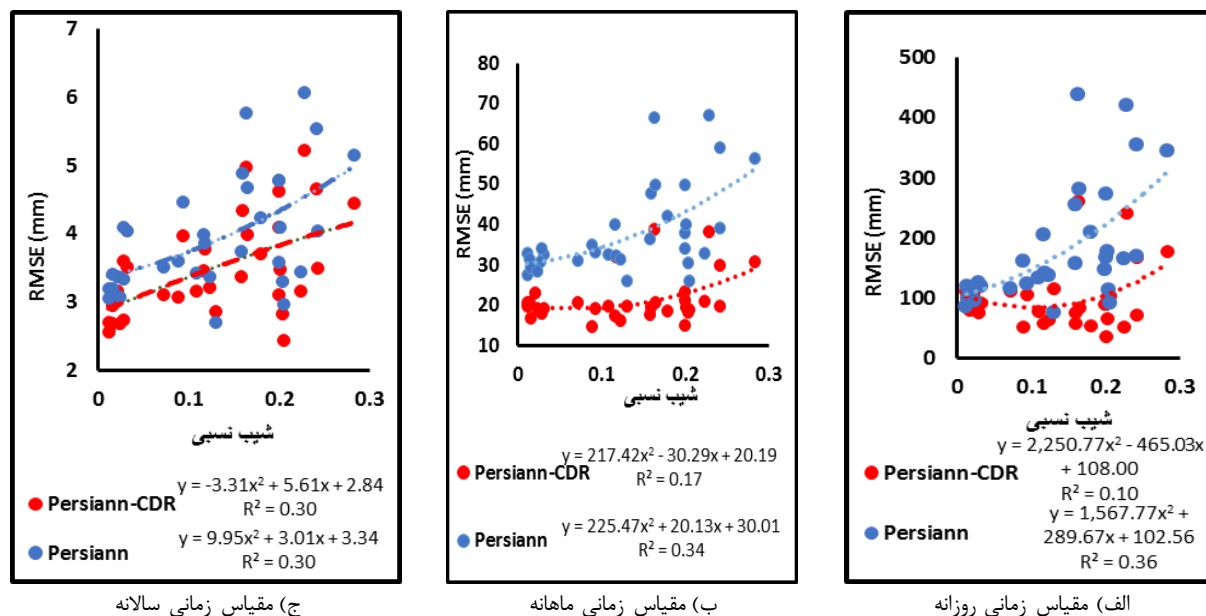
در پهنه‌بندی خطاها تغییر افزایش شاخص خطا نسبت به افزایش ارتفاع مشهود است. بنابراین، برای کمی کردن این تغییرات به ازای هر سلول و با استفاده از نقشه رقوم ارتفاعی، متوسط ارتفاع آن سلول به دست آمد. از طرفی، برای هر سلول مقادیر شاخص آماری خطای جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) محاسبه شد. با قرار دادن تغییرات ارتفاع در مقابل تغییرات شاخص RMSE روابط رگرسیونی مختلف برآزش داده شد؛ اما بهترین رابطه درجه ۲ است. شکل ۹ نمودار تغییرات شاخص ارزیابی جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) نسبت به ارتفاع در مقیاس‌های زمانی مختلف را نشان می‌دهد. بنابراین، با استفاده از روابط درجه ۲ ارائه شده می‌توان عملکرد هر الگوریتم در طبقات ارتفاعی مختلف را به دست آورد. همان طور که مشاهده می‌شود، نمودارهای برآزش داده‌شده غیرخطی اند. به طوری که ضریب تبیین در مورد الگوریتم PERSIANN و PERSIANN-CDR در مقیاس روزانه به ترتیب ۰/۵۹۷، ۰/۵۳۹ و در مقیاس ماهانه ۰/۷۷۸ و ۰/۶۱۴ و در مقیاس سالانه، ۰/۸۵۲ و ۰/۶۱۴ هستند. همان طور که مشاهده می‌شود، در الگوریتم تعدیل یافته PERSIANN-CDR نسبت به PERSIANN میزان وابستگی ارتفاعی در الگوریتم کاهش یافته است. با توجه

ضریب تبیین در مورد هر دو الگوریتم PERSIANN و PERSIANN-CDR در مقیاس روزانه تقریباً برابر به ترتیب ۰/۲۹۸، ۰/۲۹۶ است؛ اما در مقیاس ماهانه و سالانه در الگوریتم PERSIANN میزان همبستگی و ضریب تبیین افزایش می‌یابد، به طوری که ضریب تبیین در مقیاس ماهانه، ۰/۳۴۲ و در مقیاس سالانه، ۰/۳۶۱ است؛ اما در رابطه با الگوریتم PERSIANN-CDR با تغییر در مقیاس زمانی، میزان همبستگی و ضریب تبیین کاهش می‌یابد.

خطاها (RMSE) محاسبه شد. با قرار دادن تغییرات شیب نسبی در مقابل تغییرات شاخص RMSE، روابط رگرسیونی مختلف برآزش داده شد؛ اما بهترین رابطه، رابطه درجه ۲ و غیرخطی بود. با مقایسه نمودارها و روابط همبستگی میزان شاخص خطای RMSE با ارتفاع و شیب نسبی مشاهده می‌شود که به خلاف عامل ارتفاع که همبستگی زیادی با عملکرد الگوریتم‌های بارش دارد، در مورد شیب نسبی این وابستگی بسیار کمتر است. به طوری که مشاهده می‌شود



شکل ۹. نمودار همبستگی ارتفاع با شاخص ارزیابی مجذور میانگین مربعات خطاها (RMSE) در مقیاس‌های زمانی مختلف



شکل ۱۰. نمودار همبستگی شیب نسبی سلول با شاخص ارزیابی مجذور میانگین مربعات خطاها (RMSE) در مقیاس‌های زمانی مختلف

نتیجه‌گیری

توسعه ماهواره‌ها و الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای امکان تعیین کمی بارندگی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف را امکان‌پذیر کرده است؛ اما ارزیابی عملکرد این الگوریتم‌ها و بررسی تأثیر ناهم‌واری‌ها بر این عملکرد اهمیت زیادی دارد. نتایج نشان داد الگوریتم PERSIANN در همه مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه، سالانه و مقیاس‌های مکانی سلولی و حوضه‌ای، ضمن کم‌برآورد کردن، دقت کمی دارد. در مقابل، الگوریتم تعدیل‌یافته PERSIANN-CDR، دقت بسیار بیشتری دارد. این در حالی است که الگوریتم یادشده در مقیاس روزانه، قابل قبول نیست. ضریب تبیین الگوریتم تعدیل‌یافته، در مقیاس سلولی و در مقیاس‌های ماهانه و سالانه به ترتیب ۰/۷۵۸۸ و ۰/۹۴۴۶ به دست آمد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد رفتار الگوریتم‌ها در شدت بارش مختلف متفاوت است، به طوری که در مقادیر کم بارش هر دو الگوریتم بیش‌برآوردند، اما در مقادیر بارش سنگین، این الگوریتم‌ها کم‌برآوردند. این مسئله سبب می‌شود در ترسیم منحنی‌های شدت - مدت - فراوانی میزان بارش در دوره بازگشت‌های مختلف کمتر برآورد شود. بررسی روابط همبستگی و توزیع مکانی خطاهای الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای نسبت به ارتفاع حوضه، نشان داد در هر دو الگوریتم، مقدار شاخص RMSE، از نقاط کم‌ارتفاع، واقع در دشت‌های مسطح، به سمت مناطق مرتفع رشته‌کوه‌های زاگرس جنوبی، افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، دقت الگوریتم‌های مطالعه شده در مناطق پست و مسطح، به دلیل یکنواخت بودن بارش، در مقایسه با مناطق مرتفع کوهستانی که شرایط پیچیده وقوع بارش و عدم یکنواختی در بارش دارند، بیشتر است. بنابراین، با توجه به شرایط پیچیده توپوگرافی کشور ایران، استفاده از الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN و PERSIANN-CDR را به‌طور مستقیم با تردید روبه‌رو می‌کند. همچنین، پیشنهاد می‌شود با توجه به این نکته که اصولاً استفاده از اطلاعات بارش ماهواره‌ای زمانی مطرح می‌شود که اطلاعات ایستگاه زمینی دارای کمبود است یا وجود ندارد، ابتدا با استفاده از روابط ارائه‌شده، میزان خطا و همچنین همبستگی داده بررسی شده و سپس به کار برده شود.

همچنین، به شدت توصیه می‌شود که در استفاده از محصولات بارش ماهواره‌ای برای تخمین بارش، علاوه بر اعمال ویژگی‌های ابر در تصاویر ماهواره‌ای، اصلاح مربوط به طبقات ارتفاعی نیز مد نظر قرار داده شود.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر برگرفته از قسمتی از پایان‌نامه دوره دکتری منابع آب تحت عنوان «ارزیابی جامع کاربرد هم‌زمان اطلاعات بارش و دمای ماهواره‌ای و مجموعه داده‌های باز تحلیل در شبیه‌سازی هیدرولوژیک (مطالعه موردی: حوضه آبریز حله)» در گروه آموزشی هیدرولوژی و منابع آب دانشکده علوم و مهندسی آب دانشگاه شهید چمران اهواز است که به این وسیله تشکر می‌شود.

منابع

- [1]. Azizi, Gh, Faraji Sabokbar, H.A, Abaspour, R.A, Safarrad, T., The Model of the Spatial Variability Precipitation in the Middle Zagros, PHYSICAL GEOGRAPHY RESEARCH QUARTERLY, 2010, 42(72), 35-51, (Persian).
- [2]. Khaledi, Sh., Investigation of mountainous microclimate, JOURNAL OF ENVIRONMENTAL STUDIES, 2007, 33(41), 45-54, (Persian).
- [3]. Alijani, B, Kavyani, M.R., Basics of meteorology (9 th ed), Publishers by samt, 2004, 600 Pp, (Persian).
- [4]. Konrad, C., Relationship between precipitation event types and topography in the southern blue ridge mountains of the southeastern USA, Internatinal Journal of Climatology, 1996, 16: 49-62.
- [5]. Junzhi, L, Xing, Z, A, Zheng, D., Evaluation of TRMM 3B42 Precipitation Product using Rain Gauge Data in Meichuan Watershed, Poyang Lake Basin, China, Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(4):359-366. DOI:10.5814/j.issn.1674-764x.2012.04.009
- [6]. Rasouli, A.A, Erfaniyan, M, Sari Saraf, B, Javan, Kh., Comparative evaluation of estimated rainfall values TRMM And recorded precipitation of ground stations in Lake Urmia Basin, Journal of GEOGRAPHIC SPACE, 2016, 16(54), 195-217, (Persian).
- [7]. Shirvani, A, Fakhari Zade Shirazi, E., Comparison of ground based observation of precipitation with TRMM satellite estimations in Fars Province, Journal of Agricultural Meteorology, 2014, 2(2), 1-15, (Persian).

- [8]. Madadi, Gh, Hamzeh, S, Noroozi, A.A., Evaluation of rainfall on a daily, monthly and annual basis using satellite imagery (Case study: west boundary basin of Iran), *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 2015, 6(2), 59-74, (Persian).
- [9]. Li, X., Zhang, Q., Yu-Xu, C., Assessing the performance of satellite-based precipitation products and its dependence on topography over Poyang Lake basin, *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 115(3-4): 713-729.
- [10]. Gholinejad, N., Modeling of Spatial Distribution of Intense Precipitation Over Sahand Mountain Using Weather Satellite Images, MSc dissertation, University of Tabriz, 2010, 131 Pp, (Persian).
- [11]. Dezfooli, S, Hosseini-Moghari, D., S. M, Ebrahimi, K., Comparison of Tmm-3b42 V7 and PERSIANN Satellites Precipitation Data With Ground-Based Data (case Study: Gorganrood Basin, Iran), *JWSS - Journal of Water and Soil Science*, 2016, 20(76), 85-98, (Persian).
- [12]. Khwarazmi, S., Validation of microwave satellite rain rate algorithms based on observations, , MSc dissertation, University of Hormozgan, 2013, 91 Pp. (Persian).
- [13]. Ghazanfari Moghaddam, M.S, Alizadeh, A, Mousavi Baygi, S.M, Faridhosseini, A.R, Bannayan Awal, A., Comparison the PERSIANN Model with the Interpolation Method to Estimate Daily Precipitation (A Case Study: North Khorasan), *Journal of Water and Soil*, 2011, 25(1), 207- 2015, (Persian).
- [14]. Tan, M,L, Ibrahim, A,L, Duan, z, Cracknell, A, P, Chaplot, V., Evaluation of Six High-Resolution Satellite and Ground-Based Precipitation Products over Malaysia, *remote sensing*, 2015, 7: 1504-1528; doi:10.3390/rs70201504.
- [15]. Sorooshian, S., Hsu, K., Gao, X., Gupta, H. V., Imam, B., and Braithwaite, D., Evaluation of the PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2000, 81(9): 2035- 2046.
- [16]. Regional Water Company of Fars, water resources of Helleh basin Report, 2011, 142 Pp. (Persian).
- [17]. Hsu, K.L., Gao, X., Sorooshian, S., Gupta, H.V., Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, 36: 1176-1190.
- [18]. Moazami, S, Uncertainty Analysis of Satellite Rainfall Estimate Algorithms, Ph. D. dissertation, K.N.Toosi University of Technology., 2013, 196. (Persian).
- [19]. Ashouri H, Hsu KL, Sorooshian S, Braithwaite DK, Knapp KR, Cecil LD, Nelson BR, Prat OP. PERSIANN-CDR: daily precipitation climate data record from multi-satellite observations for hydrological and climate studies. *Bull. Am.Meteorol. Soc.* 2014, 96(1): 69-84. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13--00068.1>.
- [20]. Duan, Z., Liu, J., Tuo, Y., Chiongna, G., & Disse, M., Evaluation of eight high spatial resolution gridded precipitation products in Adige Basin (Italy) at multiple temporal and spatial scales, *Science of the Total Environment*, 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.213>.
- [21]. Katiraie Boroujerdy, p.s., Comparison of high-resolution gridded monthly satellite and ground-based precipitation data over Iran, *Iranian Journal of Geophysics*, 2014, 7(4), 149-160, (Persian).
- [22]. Hirpa, F.A., Gebremichael, M., Hopson, T., Evaluation of high-resolution satellite precipitation products over very complex terrain in Ethiopia, *Journal of METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY*, 2010, 49(5): 1044-1051.
- [23]. Guo, H, Chen, S, Bao, A, Hu, J, Gebregiorgis, A, S, Xue, X, Zhang, X., Inter-Comparison of High-Resolution Satellite Precipitation Products over Central Asia, *remote sensing*, 2015, 7:7181-7211, doi:10.3390/rs70607181.