

پس پردازش مدل عددی هواشناسی برای پیش‌بینی میان‌مدت بارش در حوضه پلدختر

سودابه بهیان مطلق^۱ و افشین هنربخش^{۲*}

چکیده

پیش‌بینی بارش به دلیل استفاده در مطالعات سیلاب و منابع آب از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا در سال‌های اخیر توسعه زیادی یافته است. امروزه مراکز هواشناسی مطرح دنیا از این مدل‌ها در پیش‌بینی‌های هواشناسی خود استفاده می‌کنند، مرکز ECMWF یکی از این مراکز در پیش‌بینی‌های هواشناسی جهانی است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عملکرد مرکز ECMWF برای پیش‌بینی بارش در حوضه پلدختر انجام شده است. مدل‌های پیش‌بینی عددی مستعد خطای سیستماتیک هستند؛ بنابراین بررسی تأثیر ۷ روش تصحیح اریبی (QM, EZ, EQM, Delta)، (TVSV, STB, LS) بر مدل پیش‌بینی بارش ECMWF، هدف دیگر این تحقیق بود. نتایج به دست آمده نشان داد مدل ECMWF در عمده نقاط حوضه پلدختر، RMSE پایینی داشت و از دقت قابل‌قبولی برخوردار بود. همچنین ارزیابی بارش تصحیح‌شده نشان داد که روش Delta در همه ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد بررسی، عملکرد مناسبی داشت. روش STB در دو ایستگاه، ۹۰ درصد داده‌های بارش را تصحیح کرد. روش‌های EZ و QM در ۴ ایستگاه حدود ۸۵ درصد پیش‌بینی‌ها را تصحیح کردند. این دو روش عملکردی مشابه داشتند. روش‌های LS و EQM در هر ۷ نقطه مورد بررسی عملکرد ضعیفی داشتند و به عبارتی نتوانستند خطای اریبی پیش‌بینی‌ها را تصحیح کنند. روش TVSV نیز عملکرد قابل‌قبولی نداشت. روش Delta در عمده نقاط RMSE بارش پیش‌بینی‌شده را بهبود بخشید و روش STB توانست کم برآوردی بارش پیش‌بینی‌شده را تصحیح کند. نتایج این مطالعه نشان داد که ارتفاع در صحت بارش پیش‌بینی‌شده دخیل است؛ به گونه‌ای که مدل پیش‌بینی در ارتفاع کم، کمترین RMSE و در ارتفاعات بالا، بیشترین مقدار این شاخص را داشت. روش‌های تصحیح اریبی مقادیر بارش پیش‌بینی‌شده را تا حد قابل‌قبولی بهبود بخشیدند و همین امر کارایی مدل پیش‌بینی بارش را در سامانه هشدار سیل افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پس‌پردازش، تصحیح اریبی دلتا، تصحیح اریبی منطقه ارتفاعی، تصحیح اریبی نگاشت چندق، مدل عددی هواشناسی.

ارجاع: بهیان مطلق س. و هنربخش ا. ۱۴۰۲. پس‌پردازش مدل عددی هواشناسی برای پیش‌بینی میان‌مدت بارش در حوضه پلدختر. ۴۹: ۹۷-۱۰۹. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.13906.2473>

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: afshin.honarbaksh@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶

مقدمه

با دخالت بشر در طبیعت و تغییر کاربری مسیل‌ها و سیلاب‌دشت‌ها، همچنین تغییرات اقلیمی، ریسک سیل در جهان افزایش یافته است. کنترل و کاهش خسارات ناشی از سیل به دو شیوهٔ سازه‌ای و غیرسازه‌ای صورت می‌گیرد. تجربیات و تحقیقات صورت‌گرفته در نقاط مختلف جهان نشان می‌دهد استفاده از روش‌های غیرسازه‌ای نظیر سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار سیل در کنار روش‌های سازه‌ای خسارات سیل را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. پیش‌بینی سیل و همراه با آن اطلاع‌رسانی وقوع سیل، ابزاری منطقی برای کاهش خطرات سیل نسبت به جان انسان‌ها و مایملک آن‌ها در نقاط در معرض خطر سیل است. لازمهٔ پیش‌بینی سیلاب، پیش‌بینی بارش است. یکی از روش‌های پیش‌بینی بارش، پیش‌بینی عددی وضع هوا (NWP¹) است. پیش‌بینی عددی هوا روشی است مبتنی بر روابط علمی و مدل‌های ریاضیاتی که به کمک آن می‌توان مقادیر نزولات جوی و پارامترهای هواشناسی را با توجه به شرایط آب‌وهوایی در ارتفاعات و نقاط مشخص، برآورد و پیش‌بینی کرد (عبدالمنافی و همکاران، ۲۰۲۱).

مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت وضع هوا ECMWF² از جمله مراکزی است که پیش‌بینی‌های هواشناسی جهانی خود را با استفاده از مدل‌های عددی انجام می‌دهد. پیش‌بینی‌های صورت‌گرفته توسط مرکز مذکور، عدم‌قطعیت در پیش‌بینی را نیز در نظر می‌گیرند (ساعدی و همکاران، ۱۳۹۸). با وجود در نظر گرفتن عدم‌قطعیت، خطاهای سیستماتیک رخ می‌دهد که لازم است پس‌پردازش روی داده‌ها انجام شود. روش‌های پس‌پردازش را به‌طور کلی می‌توان در سه طبقه‌بندی پس‌پردازش آماری، تکنیک‌های تشابه و ریزمقیاسی دینامیکی قرارداد. روش‌های پس‌پردازش آماری کاربرد گسترده‌تری نسبت به دو روش دیگر در بیشتر تحقیقات مربوطه دارند (وود و شاکه، ۲۰۰۸). روش‌های تصحیح آریبی در بسیاری از مطالعات به‌منظور پس‌پردازش نتایج مدل‌های پیش‌بینی و حذف آریبی آن‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند (تاو و همکاران، ۲۰۱۴)؛ که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

لافون و همکاران (۲۰۱۳) از ۴ تکنیک خطی، غیرخطی، نگاشت چندک مبتنی بر γ و نگاشت چندک تجربی، برای کاهش آریبی خروجی مدل آب‌وهوایی منطقه‌ای استفاده کردند. نتایج نشان داد که تکنیک نگاشت چندک مبتنی بر γ در صورتی که دو مجموعه بارش با استفاده از توزیع γ باشد بهترین دقت را خواهد داشت.

جوانمرد قصاب و دلاوری (۲۰۱۸) به بهبود عملکرد داده‌های پیش‌بینی بارش چهار مدل عددی در چند ایستگاه هواشناسی واقع در حوضهٔ کارون بزرگ پرداختند و از روش تصحیح آریبی چندک استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که شاخص‌های ارزیابی مثل شاخص همبستگی و نش-ساتکلیف در برخی مدل‌ها افزایش نسبی یافته‌اند. همچنین امین یوری و همکاران (۲۰۱۹) از دو روش نگاشت چندک و مدل میانگین‌گیری بیزی برای اصلاح آریبی و پس‌پردازش بارش پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های عددی CMA، ECMWF، NCEP و UKMO در سطح حوضهٔ بشار استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها بیانگر افزایش دقت مدل‌ها براساس شاخص‌های آماری (مانند CC و ME) و احتمالاتی (مانند: BSS³) در بیشتر ایستگاه‌ها بود.

گومیندوگا و همکاران (۲۰۱۹) از ۵ روش تصحیح آریبی برای اصلاح بارش ماهواره‌ای CMORPH استفاده کردند. روش‌های مورد استفاده برای تصحیح آریبی شامل: تبدیل توزیع (DT⁴)، تبدیل نیرو (PT⁵)، منطقه ارتفاعی (EZ⁶)، تصحیح آریبی مکانی - زمانی (STB⁷) و نگاشت چندک براساس توزیع تجربی (EQM⁸) بود. دورهٔ زمانی مورد استفاده برای این مطالعه ۱۹۹۸-۲۰۱۳ بود. نتایج حاصل نشان داد روش DT آریبی بارش را تا حد قابل‌ملاحظه‌ای کاهش داد به‌طوری‌که ۷۰ درصد بارش ایستگاه‌ها را تصحیح کرد. همچنین شیرو و پارک (۲۰۲۰) در مطالعهٔ خود از روش‌های تصحیح آریبی نگاشت چندک عمومی، نگاشت چندک گاما، تبدیل نیرو و تصحیح آریبی مقیاس‌گذاری خطی (BC) در مطالعهٔ خود استفاده کردند و نتایج رضایت‌بخش بود.

3- Brier Skill Score
4- Distribution Transformation
5- Power Transform
6- Elevation Zone
7- Spatio-Temporal Bias
8- Empirical distribution Quantile Mapping

1- Numerical weather prediction
2- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

دارد. بررسی تحقیقات صورت گرفته بیان گر این است که تحقیقات اندکی در زمینه تصحیح اریبی سامانه پیش بینی بارش صورت گرفته است. از میان تحقیقات بررسی شده، تاکنون پس پردازش مرکز پیش بینی میان مدت ECMWF با استفاده از ۷ روش تصحیح اریبی (EQM, EZ, Delta, TVSV, STB, LS, QM) صورت نگرفته است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی داده های بارش روزانه به دست آمده از مرکز ECMWF و پیش بینی بارش در حوضه آبخیز پلدختر صورت گرفته است. تصحیح اریبی مرکز ECMWF با استفاده از روش دلتا، منطقه ارتفاعی، نگاشت چندک براساس توزیع تجربی، نگاشت چندک، مقیاس گذاری خطی، تصحیح اریبی زمانی- مکانی و TVSV نیز از دیگر اهداف این مطالعه به شمار می آید.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، حوضه آبخیز پلدختر از زیرحوضه های آبریز کرخه است. این حوضه در استان لرستان و موقعیت ۳۳ درجه و ۷ دقیقه و ۳۳ درجه و ۵۵ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی تا ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه و ۴۸ درجه و ۴۳ دقیقه طول جغرافیایی شرقی قرار دارد. مساحت حوضه مورد مطالعه ۲۰۷۳ کیلومتر مربع است. بیشترین ارتفاع در این حوضه ۲۹۶۲ متر و کمترین ارتفاع ۵۲۶ متر است. شیب متوسط حوضه، معادل ۷۹ درصد است. از اطلاعات ۷ ایستگاه هواشناسی ذکر شده در جدول ۱ در این پژوهش استفاده شد.

مشخصات مدل پیش بینی مورد استفاده در پژوهش

در این مطالعه از داده های بارش روزانه ECMWF (مرکز اروپایی پیش بینی میان مدت وضع هوا) استفاده شد. داده های بارش مرکز اروپایی پیش بینی میان مدت وضع هوا از پایگاه داده ECMWF با تفکیک مکانی ۰/۱ درجه، دانلود شد. اطلاعات این مرکز در جدول ۲ ارائه شده است (سو و همکاران، ۲۰۱۴؛ ترافدر، ۲۰۱۶). داده های به دست آمده از مدل ECMWF با فرمت GRIB2 است و در نرم افزار کوانتوم GIS (QGIS) توسط پلاگین Temporal/ Spectral Profile با فرمت اکسل استخراج شد.

مدینا و تیان (۲۰۲۰) از ۳ روش احتمالی پس پردازش برای تصحیح اریبی مدل های عددی پایگاه داده TIGGE استفاده کردند. روش های تصحیح اریبی شامل رگرسیون گاوسی ناهمگن (NGR^۱)، (AKD^۲) و میانگین مدل بیزین (BMA^۳) بودند. در این مطالعه ۴ مدل عددی (NWP) پایگاه داده TIGGE در چندین ایستگاه بررسی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که پس پردازش با NGR پیش بینی های ECMWF-UKMO و ECMWF را به طور قابل توجهی بهبود بخشید و برترین روش بود.

لازولگو و همکاران (۲۰۲۰) بارش ماهانه RCM را با استفاده از روش copula (TIN^۴) پس پردازش کردند. این روش برای دوره زمانی ۱۵ ساله و پیش بینی دو سال آینده استفاده شد. نتایج نشان داد روش TIN-copula به طور چشمگیری اریبی مثبت بین نتایج مدل و مشاهدات در طول دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۰ را کاهش داد. برای دو سال پیش بینی این مدل تمایل به فرابوردی داشت که با استفاده از روش TIN-copula، اریبی به میزان قابل توجهی اصلاح شد.

امینی و همکاران (۱۳۹۹) تصحیح اریبی نگاشت چندک (QM^۵) تمامی مدل های عددی قابل دسترس در پایگاه TIGGE را برای پیش بینی بارش روزانه در ۳۸ ایستگاه سینوپتیک ایران که در اقلیم های مختلف واقع شده اند، انجام دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که عمده مدل های پیش بینی در اقلیم های مرطوب، نیمه مرطوب، مدیترانه ای و خشک دارای بیشترین میزان همبستگی با داده های زمینی بودند؛ ولی در اقلیم های نیمه خشک و خیلی خشک مقدار شاخص CC به مراتب کمتر است. مقدار شاخص های آماری CC و RMSE به دست آمده از دو مرکز ECMWF و METEO در اکثر مناطق کشور به ترتیب بالای ۰/۶ و کمتر از ۴ میلی متر در روز بود و این در حالی است که دو مدل CMA و CPTEC کارایی چندان مناسبی نداشتند. همچنین ارزیابی مقادیر بارش تصحیح شده با روش QM بیانگر بهبود چشمگیر شاخص های آماری به دست آمده از بسیاری از مراکز پیش بینی است.

با توجه به مطالب فوق، استفاده از روش های پس پردازش، تأثیر بسزایی در کاهش خطای سامانه پیش بینی بارش

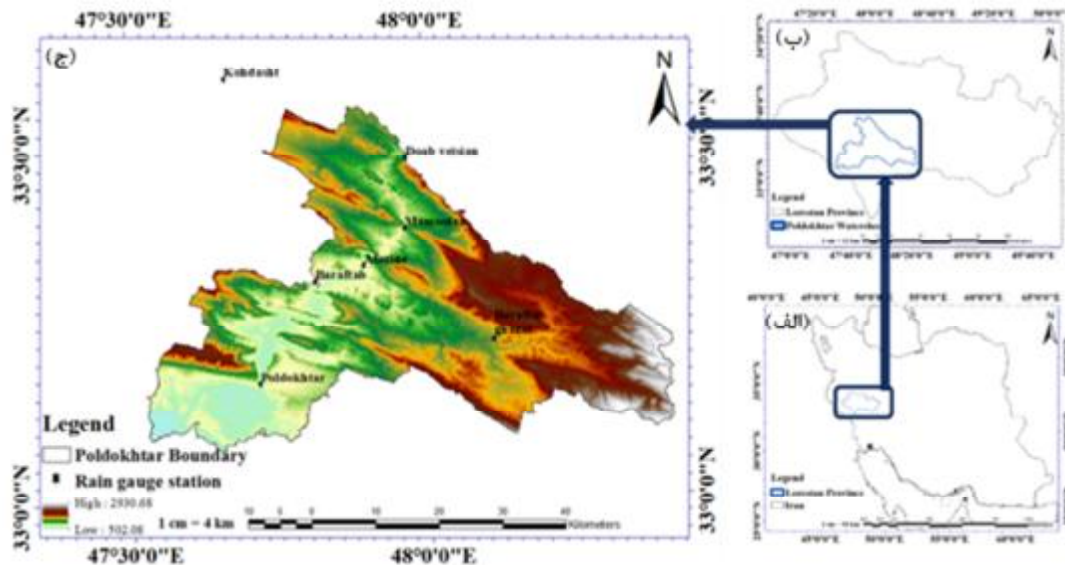
1- Nonhomogeneous Gaussian Regression

2- Affine Kernel Dressing

3- Bayesian model averaging

4- Triangular Irregular Networks

5- Quantile Mapping



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه (الف) موقعیت حوضه در ایران (ب) موقعیت حوضه در استان لرستان (ج) تغییرات ارتفاعی حوضه پلدختر

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در مطالعه

ارتفاع	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ایستگاه باران‌سنجی
۸۰۰	۳۶۸۸۱۵۶	۴۴۲۷۲۳	آفرینه
۷۸۰	۳۶۸۵۹۱۶	۴۳۶۱۲۰	برآفتاب
۱۱۹۷	۳۶۷۵۹۶۰	۴۶۳۸۹۱	برآفتاب غزال
۹۶۰	۳۷۰۴۹۴۰	۴۵۰۸۶۶	دوآب ویسیان
۱۱۹۴	۳۷۱۸۱۱۷	۴۲۲۶۸۴	کوه‌دشت
۹۵۰	۳۶۹۳۱۲	۴۵۰۳۹۴	معمولان
۷۰۰	۳۶۷۰۰۳۷	۴۲۶۹۶۱	پلدختر

جدول ۲- مشخصات مدل‌های پیش‌بینی عددی بارش در پایگاه داده TIGGE

Center	Ensemble member	Output data resolution	Forecasts length	Forecasts per day
ECMWF	51	0.75×0.75	15 days	00/12

روش‌های تصحیح اریبی

داده‌های خام خروجی مدل پیش‌بینی عددی هواشناسی دارای خطای سیستماتیک هستند؛ بنابراین برای اصلاح آن باید اقداماتی صورت گیرد. در روش‌های مورد نظر، ۷۰ درصد داده‌ها برای دوره کنترل و ۳۰ درصد داده‌ها برای دوره پیش‌بینی در نظر گرفته شد. روش‌های تصحیح اریبی که در این مطالعه از آن‌ها استفاده شد، شامل روش دلتا (Delta)، منطقه ارتفاعی (EZ)، نگاهت چندک براساس توزیع تجربی (EQM)، نگاهت چندک (QM)، مقیاس‌گذاری خطی (LS)، تصحیح اریبی زمانی- مکانی (STB) و TVSV بود. در این مطالعه از پیش‌بینی بارش

مقایسه بارش پیش‌بینی مرکز ECMWF با بارش

ایستگاه باران‌سنجی

در این مطالعه مقایسه به صورت نقطه‌ای انجام شد. در این حالت ایستگاه‌های مشاهده‌ای موجود در محدوده شبکه نقاط پیش‌بینی که حداقل فاصله را با نقاط شبکه دارند، انتخاب شدند. براین اساس، ۷ ایستگاه در حوضه آبخیز پلدختر به منظور ارزیابی نقطه‌ای انتخاب شد. فاصله این ایستگاه‌ها از مرکز ثقل نقاط شبکه کم‌تر از ۱۰ کیلومتر بود. بازه زمانی مورد استفاده در این مطالعه از سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ است.

روزانه مرکز ECMWF استفاده شد.

$$P_{frc}^{BC}(t) = P_{frc}(t) \cdot \left[\frac{m_m P_{obs}(t)}{m_m P_{contr}(t)} \right]$$

در معادله فوق نام‌گذاری اختصارات مانند روش Delta است.

تصحیح اریبی منطقه ارتفاعی (EZ)

هدف تصحیح اریبی منطقه ارتفاعی، اصلاح بارندگی ماهواره‌ای در ارتفاعات است. این روش ایستگاه‌های سنجش باران را براساس ارتفاع ایستگاه به سه منطقه ارتفاعی تقسیم می‌کند. هر منطقه ارتفاعی دارای یک تصحیح اریبی جداگانه است. در طول زمان، دامنه فاکتور اریبی تحت روش پنجره ۷ روز متوالی تغییر می‌کند.

$$EZ = S \frac{\sum_{t=d}^{t=d-1} \sum_{i=l}^{i=n} G(i,t)}{\sum_{t=d}^{t=d-1} \sum_{i=l}^{i=n} S(i,t)} \quad (3)$$

در معادله فوق EZ بارش تصحیح‌شده ماهواره‌ای روزانه، S بارش ماهواره‌ای تصحیح‌نشده روزانه، G بارش اندازه‌گیری‌شده (mm/d)، i تعداد اندازه‌گیری، d تعداد روز، t تعداد روز ژولیان، l طول پنجره زمانی برای تصحیح اریبی است (گومیندوگا و همکاران، ۲۰۱۹).

تصحیح نگاشت چندک براساس توزیع تجربی (EQM)

این روش تصحیح اریبی، یک روش تصحیح خطای آماری- تجربی بیس-چندک است که اساس آن در تبدیل تجربی و تصحیح اریبی بارش شبیه‌سازی‌شده توسط مدل اقلیمی منطقه‌ای است (تمسو و همکاران، ۲۰۱۲). روش تصحیح بارش‌های ماهواره‌ای صحیح براساس تابع توزیع تجمعی تجربی (ecdfs) برای هر پنجره زمانی ۷ روزه و هر ایستگاه ایجاد می‌شود. در بارش تصحیح‌شده اریبی (EQM)، ترم‌های تابع توزیع تجمعی تجربی (ecdf) و عکس آن (ecdf⁻¹) با استفاده از تصحیح چندک بیان می‌شود. با واردکردن پارامترهای پنجره متوالی ۷ روزه در فاصله زمانی روزانه با میانگین مکانی اریبی، تصحیح انجام می‌شود که قابل مقایسه با دیگر روش‌هاست.

$$EQM = ecdf_{obs}^{-1}(ecdf_{raw}(S(it))) \quad (4)$$

در معادله فوق، ecdf_{obs}، تابع توزیع تجمعی تجربی برای داده‌های مشاهده‌ای و ecdf_{raw}، تابع توزیع تجمعی تجربی برای داده‌های اصلاح‌نشده ماهواره‌ای است.

روش تصحیح اریبی Delta

در روش Delta، تغییرات بین میانگین مشاهدات و شبیه‌سازی به بارش مشاهده‌ای روزانه افزوده می‌شود (راتی و همکاران، ۲۰۱۴). این روش برای هر نوع متغیری قابل استفاده است.

$$P_{contr}^{BC}(t) = P_{obs}(t), \quad (1)$$

$$P_{frc}^{BC}(t) = P_{obs}(t) \cdot \left[\frac{m_m P_{frc}(t)}{m_m P_{contr}(t)} \right]$$

در معادله فوق، P بارش، conter سری زمانی شبیه‌سازی‌شده حاصل از مدل عددی ECMWF در طول دوره کنترل، obs سری زمانی مشاهده‌ای در طول دوره کنترل، frc سری زمانی پیش‌بینی‌شده که باید تصحیح شود، BC آخرین سری زمانی که تصحیح اریبی شده است، t مرحله زمانی و μ_m میانگین ماهانه بلندمدت است. برای پیش‌بینی بارش، خطاهای شبیه‌سازی‌شده توسط مدل عددی ECMWF با استفاده از اجراهای کنترل و سری‌های زمانی مشاهده‌ای تصحیح می‌شوند که معمولاً به‌صورت ماهانه با استفاده از تصحیح اریبی Delta با روش تصحیح ضربی انجام می‌شود. در روش Delta، سری‌های زمانی مشاهده‌ای به‌عنوان خط مبنا استفاده می‌شوند که آن را به روشی قوی برای تصحیح مقادیر میانگین تبدیل می‌کند (مندز و همکاران، ۲۰۲۰).

مقیاس‌گذاری خطی (LS¹)

هدف روش مقیاس‌بندی خطی (LS) تطبیق کامل مقادیر بارش پیش‌بینی شد با مقادیر مشاهده‌شده است (لندرینگ و همکاران، ۲۰۰۷). بارندگی معمولاً با ضریب چند برابری تنظیم می‌شود. میانگین پیش‌بینی‌های روزانه مدل‌های عددی پیش‌بینی بارش (مدل‌های پایگاه داده TIGGE) تصحیح‌شده کاملاً با مشاهدات مطابقت دارند. روش LS با تصحیح مقادیر روزانه براساس تفاوت بین دوره کنترل مشاهده‌شده و داده‌های اصلاح‌نشده عمل می‌کند:

$$P_{contr}^{BC}(t) = P_{contr}(t) \cdot \left[\frac{m_m P_{obs}(t)}{m_m P_{contr}(t)} \right] \quad (2)$$

روش نگاشت چندک (QM)

تخمین‌های ماهواره‌ای جایگزین و آریبی محاسبه می‌شود.

$$STB = S \frac{\sum_{t=d}^{t=d-l} G(i, t)}{\sum_{t=d}^{t=d-l} S(i, t)} \quad (6)$$

در معادله فوق، S تخمین بارش ماهواره‌ای؛ G ، بارش اندازه‌گیری‌شده (mm/d)، i ، تعداد اندازه‌گیری؛ d ، تعداد روز؛ t ، تعداد روز ژولیان؛ و l ، طول پنجره زمانی برای تصحیح آریبی است (لندرینگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ توچبین و سیرت، ۲۰۱۲).

تصحیح آریبی TVSV

فاکتور آریبی زمانی مکانی (TVSV)، براساس پنجره متوالی ۷ روزه ارائه شده است. این فاکتور برای یک روز خاص محاسبه می‌شود، با این شرایط که حداقل ۵ میلی‌متر بارش در روز و حداقل ۳ روز بارانی متوالی وجود داشته باشد (بهاتی و همکاران، ۲۰۱۶).

$$TVSV = \frac{\sum_{t=d}^{t=d-l} G(i, t)}{\sum_{t=d}^{t=d-l} S(i, t)} \quad (7)$$

روش‌های ارزیابی

برای ارزیابی مدل عددی پیش‌بینی بارش در این مطالعه از دو دسته شاخص آماری پیوسته و طبقه‌بندی‌شده استفاده شد. شاخص پیوسته شامل MAE و ME و شاخص‌های طبقه‌بندی‌شده شامل: FAR، POD و BIAS است.

روش نگاشت چندک از جمله روش‌های مطرح تصحیح آریبی است. روش QM با استفاده از توابع توزیع تجمعی (CDF) برای مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده در هر مقیاس زمانی موجب حذف آریبی‌ها می‌شود. این روش با جایگزین کردن مقدار پیش‌بینی‌شده با مقدار مشاهده‌ای انجام می‌شود (ووپسین و همکاران، ۲۰۱۰). براساس این روش چندک هر یک از اعضا پیش‌بینی مدل جهانی برای هرروز با توجه به تابع توزیع تجمعی پیش‌بینی (CDF) آن محاسبه می‌شود. تعریف مربوط به روش نگاشت چندک به صورت معادله زیر است:

$$BC_{fcst} = BC_{fcst} (CDF_{fcst} (F_{cst})) = CDF_{obs}^{-1} (Q_n) \quad (8)$$

در معادله فوق، BC_{fcst} مقدار پیش‌بینی تصحیح‌شده، F_{cst} مقدار پیش‌بینی‌شده، CDF_{obs} تابع توزیع تجمعی برای داده‌های مشاهده‌ای، CDF_{fcst} تابع توزیع تجمعی برای داده‌های پیش‌بینی‌شده و Q_n چندک مقدار پیش‌بینی‌شده در CDF_{fcst} است.

تصحیح آریبی زمانی - مکانی (STB)

هدف تصحیح آریبی، تصحیح برآورد بارش ماهواره‌ای است. جهت برآورد بارش روزانه ماهواره‌ای تصحیح شده در پنجره زمانی موردنظر، مقادیر ایستگاه‌های زمینی و

جدول ۳- شاخص‌های آماری، پیوسته و طبقه‌بندی‌شده مورد استفاده در مطالعه

Skill Perfect/No	Equation	Measure	No
+∞ / -∞	$(1/n) \sum (f_i - o_i)$	ME	۱
۰/∞	$(1/n) \sum f_i - o_i $	MAE	۲
>۱, ۱<	$\sqrt{(1/n) \sum (f_i - o_i)^2}$	RMSE	۳
۰/∞	$[(RR + NR) / RR] + RN$	BIAS	۴
۰/۱	$RR / (RR + RN)$	POD	۵
۰/۱	$NR / (RR + NR)$	FAR	۶

در معادلات فوق f مقادیر پیش‌بینی، o مقادیر مشاهده‌ای، n تعداد داده پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌ای است. RR: نشان‌دهنده حالتی است که در ایستگاه بارش رخ داده است و مدل نیز وقوع بارش را نشان می‌دهد. NR: نشان‌دهنده حالتی است که در ایستگاه بارش رخ نداده است، اما مدل وقوع بارش را نشان می‌دهد. RN: نشان‌دهنده حالتی است که در ایستگاه بارش رخ داده است، اما مدل وقوع بارش را نشان نمی‌دهد. NN: نشان‌دهنده حالتی است که در ایستگاه بارش رخ نداده است و مدل نیز وقوع بارش را نشان نمی‌دهد.

جدولی براساس رخداد یا عدم‌رخداد بارش تعیین می‌شوند. شاخص ME اختلاف بین مشاهدات و پیش‌بینی را نمایش می‌دهد. ME بیش از صفر بیش‌برآوردی و ME

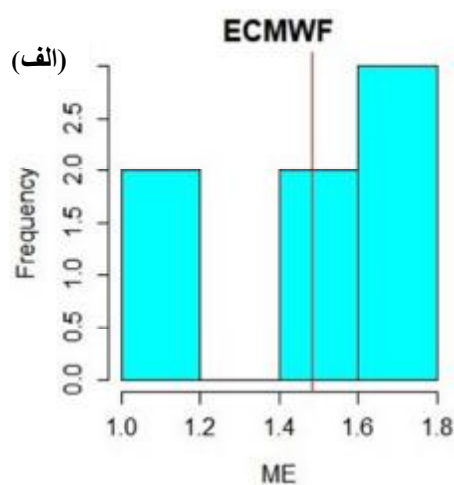
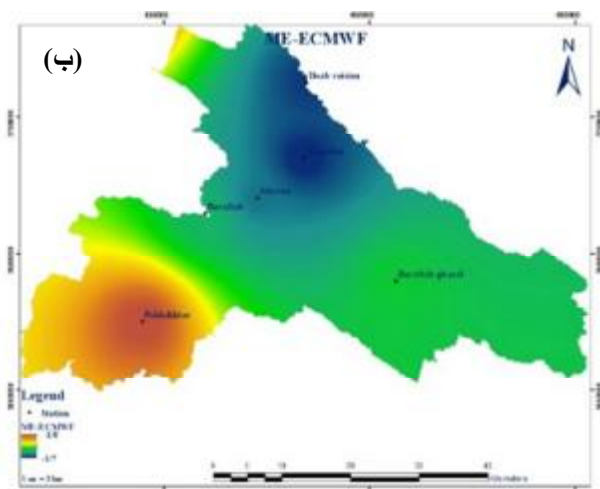
با توجه به روابط ارائه‌شده در جدول ۳ شاخص‌های پیش‌بینی پیوسته براساس مقدار بارش برآوردی تعیین می‌شوند؛ درحالی‌که شاخص‌های طبقه‌بندی‌شده یا

نتایج و بحث

ارزیابی عملکرد مرکز پیش‌بینی عددی ECMWF

برای پیش‌بینی بارش مدل‌های عددی ECMWF از شاخص‌های آماری پیوسته (ME, MAE, RMSE) و شاخص‌های طبقه‌بندی شده (BIAS, POD, FAR) استفاده شد. توزیع فراوانی و توزیع مکانی نتایج شاخص‌های آماری ME, MAE و RMSE مطابق با شکل‌های ۲، ۳ و ۴ است.

کمتر از صفر کم‌برآوردی در مقادیر بارش را نشان می‌دهد و اگر این شاخص مساوی صفر شد، پیش‌بینی نرمال است. شاخص POD با محدوده عددی بین صفر و یک، بیانگر تشخیص‌های صحیح بارش پیش‌بینی عددی است. هرچه مقدار این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، ب دقت مدل در تشخیص صحیح وقوع بارش بیشتر است. شاخص FAR نشان‌دهنده تشخیص‌های اشتباه مدل عددی پیش‌بینی بارش است. بازه عددی این شاخص بین صفر و یک است، مقادیر نزدیک به صفر عملکرد بهتر مدل عددی پیش‌بینی بارش را نشان می‌دهد.



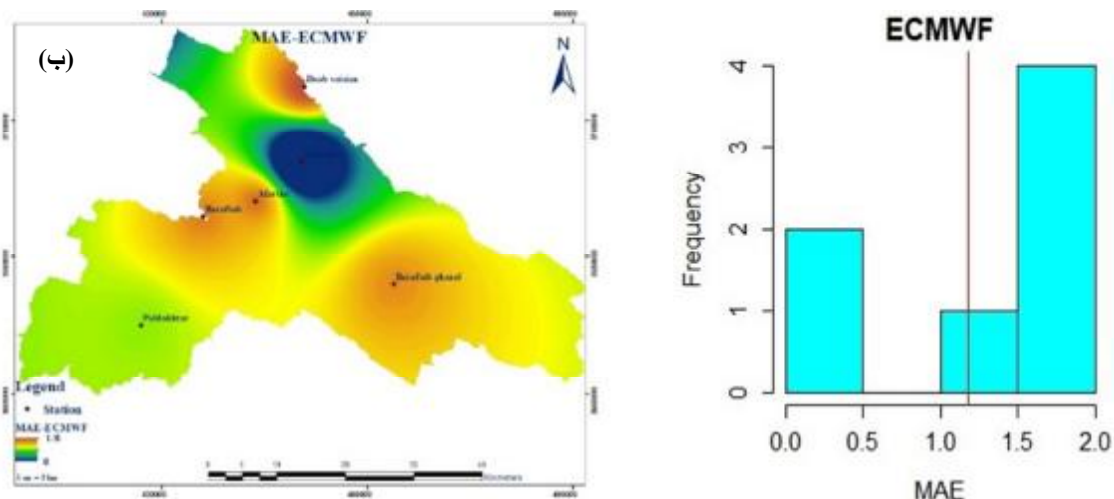
شکل ۲- ارزیابی عملکرد بارش پیش‌بینی شده مرکز ECMWF با استفاده از شاخص آماری ME در حوضه پلدختر (الف) توزیع فراوانی شاخص آماری ME (ب) توزیع مکانی شاخص آماری ME

۳-الف). مطابق با شکل ۳-ب، در مرکز ECMWF ایستگاه معمولان (ارتفاع ۹۵۰ متر) کمترین مقدار شاخص MAE را نشان می‌دهد.

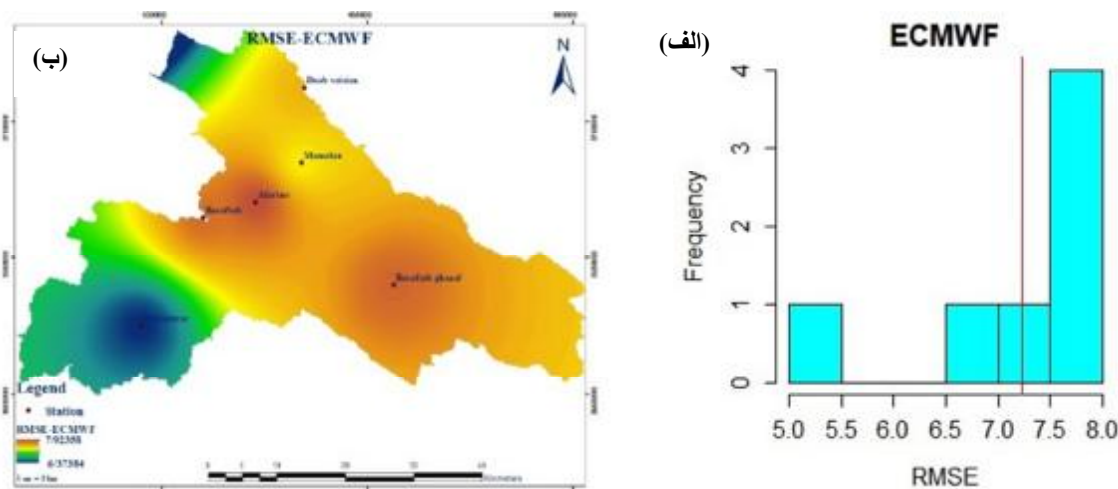
بررسی توزیع فراوانی شاخص RMSE (شکل ۴-الف) نیز حاکی از آن است که پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط مرکز ECMWF از خطای کمی نسبت به داده‌های زمینی برخوردار هستند. مقدار این شاخص در ایستگاه پلدختر به مراتب کمتر است (شکل ۴-ب). محاسبات صورت گرفته نشان می‌دهد که متوسط این شاخص در مراکز پیش‌بینی، حدود ۷ میلی‌متر در روز است. در ایستگاه‌های موجود در ارتفاعات بالا RMSE در پیش‌بینی بارش، بیشتر است که با مطالعه آمینی و همکاران (۱۳۹۹) همسو است. یکی از علل خطا را می‌توان در عدم تفکیک آب حاصل از ذوب برف، از بارش دانست.

نتایج به دست آمده بیانگر کم‌برآوردی مدل پیش‌بینی بارش است. مدل ECMWF از نظر مقدار شاخص ME در بازه مناسبی قرار داشت (شکل ۲-الف) که نشانگر عملکرد خوب این مدل بود. از لحاظ توزیع مکانی ایستگاه‌های دو آب و پسیان و معمولان بیشترین مقدار کم‌برآوردی را داشتند (شکل ۲-ب). این دو ایستگاه در محدوده ارتفاعی متوسط قرار دارند و ایستگاه‌هایی که در ارتفاعات پایین‌تر قرار داشتند، مقدار کم‌برآوردی کمتری داشتند؛ بنابراین مشخص است ارتفاع نیز در برآورد بارش توسط مدل پیش‌بینی بارش مؤثر است. کم‌برآوردی در ارتفاعات بالا، بیشتر است که علت اصلی این تفاوت را می‌توان عدم اصلاح اثر ارتفاع بر مقدار بارش دانست.

نتایج بیانگر عملکرد نسبتاً مناسب مدل ECMWF بود. در این مدل متوسط شاخص MAE، حدود ۱/۱ بود (شکل



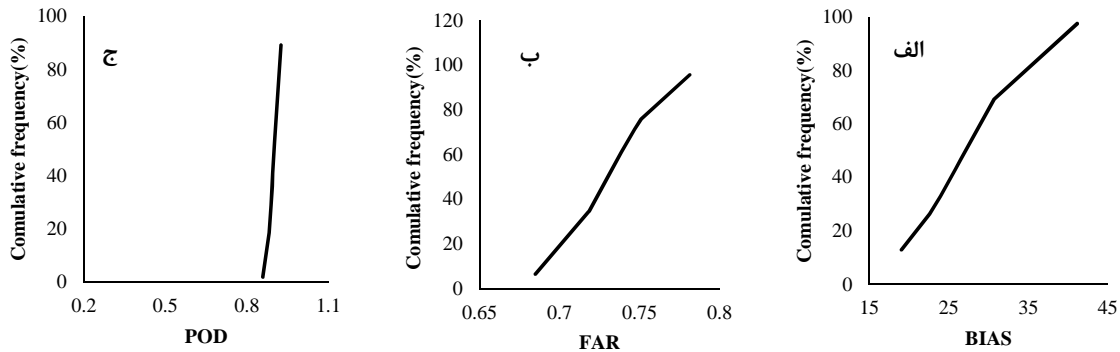
شکل ۳- ارزیابی عملکرد بارش پیش‌بینی شده مرکز ECMWF با استفاده از شاخص آماری MAE در حوضه پلدختر (الف) توزیع فراوانی شاخص آماری MAE (ب) توزیع مکانی شاخص آماری MAE



شکل ۴- ارزیابی عملکرد بارش پیش‌بینی شده مرکز ECMWF با استفاده از شاخص آماری RMSE در حوضه پلدختر (الف) توزیع فراوانی شاخص آماری RMSE (ب) توزیع مکانی شاخص آماری RMSE

بارانی از عملکرد خوبی برخوردار است. نتایج این شاخص برای مدل ECMWF یکی از محاسنی است که به نظر می‌رسد برای کاربرد در سامانه‌های هشدار سیلاب می‌تواند گزینه مناسبی باشد. در نهایت تحلیل‌های صورت‌گرفته براساس شاخص FAR گویای این مطلب بود که ECMWF دارای خطا در تشخیص روزهای بارانی است؛ بنابراین در استفاده از این مدل به‌هیچ‌وجه نباید از پیش‌بینی‌های خام استفاده شود؛ بلکه باید با رفع خطای اریبی، عملکرد آن‌ها ارتقا یابد. با توجه به نتایج ارائه‌شده، مدل ECMWF در اکثر ایستگاه‌ها، پیش‌بینی مناسبی را ارائه داد که مطابق با مطالعه آمین یآوری و همکاران (۲۰۱۹) است.

در شکل ۵ نیز توزیع تجمعی شاخص‌های طبقه‌بندی شده Bias، POD و FAR برای مرکز ECMWF نشان داده شده است. بررسی نتایج به‌دست‌آمده براساس شاخص Bias حاکی از آن است که مرکز ECMWF تمایل به بیش برآوردی تعداد روزهای بارانی دارد. مقدار متوسط شاخص Bias در سطح حوضه برای مرکز ECMWF معادل ۴۰ درصد است. لازم به ذکر است که مقدار شاخص Bias در ایستگاه معمولاً نسبت به دیگر مناطق بیشتر بوده و این بیانگر پیش‌بینی تعداد روزهای بارانی بیش از داده‌های مشاهده‌ای در این ایستگاه است. ارزیابی نتایج براساس شاخص POD نیز نشان می‌دهد که مرکز پیش‌بینی ECMWF با تشخیص تعداد روزهای



شکل ۵- توزیع تجمعی مقدار شاخص‌های Bias (الف)، FAR (ب) و POD (ج) برای مراکز ECMWF در حوضه آبخیز پلدختر مقیاس روزانه

عملکرد را داشت. در ایستگاه دو آب و ویسیان، مانند ایستگاه کوه‌دشت، دو فاکتور LS و EQM عملکرد ضعیفی داشتند؛ درحالی‌که فاکتورهای EZ و QM برتری قابل توجهی نسبت به سایر روش‌ها داشتند. در این ایستگاه روش Delta نیز نتایج قابل‌قبولی داشت (شکل ۶-ب). با توجه به نتایج در شکل ۶-پ در ایستگاه معمولان، نتایج فاکتورهای EZ، STB، QM، Delta نزدیک به هم بود، ولی روش EZ تطابق بیشتری با توزیع تجمعی بارش مشاهداتی داشت. در ایستگاه آفرینه (شکل ۶-ت)، فاکتورهای EZ و QM بهترین نتایج را ارائه دادند و همچنین نتایج روش Delta نیز قابل‌قبول بود. در ایستگاه برآفتاب (شکل ۶-ث)، بهترین تصحیح را روش EZ و در ایستگاه برآفتاب غزال (شکل ۶-ج) و پلدختر (شکل ۶-چ)، STB نسبت به سایر روش‌ها برتری داشت. در کل، روش‌های LS و EQM در همه ایستگاه‌ها بدترین نتایج را داشتند. روش STB در ۲ ایستگاه در حوضه پلدختر، برتری داشت که با نتایج مطالعه گومیندوگا و همکاران (۲۰۱۹) هماهنگ است. در این مطالعه روش TVSV در هیچ یک از ایستگاه‌های منتخب، نتایج قابل‌قبولی ارائه نداد که با نتایج بهاتی و همکاران (۲۰۱۶) در تضاد است. Z و QM در ۴ ایستگاه نتایج مشابه داشتند و می‌توان گفت که این دو روش دقت مشابهی دارند. روش تصحیح اریبی EZ در ایستگاه کوه‌دشت که در ارتفاع بالاتری نسبت به سایر ایستگاه قرار داشت، نتیجه خوبی ارائه نداد؛ درحالی‌که در ایستگاه معمولان با ارتفاع متوسط در حوضه، نتیجه خوبی را ارائه داد. مطالب فوق نشان‌دهنده حساسیت این روش نسبت به ارتفاع است. در این پژوهش، تأثیر ارتفاع بر پیش‌بینی بارش توسط مرکز پیش‌بینی میان‌مدت جوئی، هم در داده پیش‌بینی خام و هم

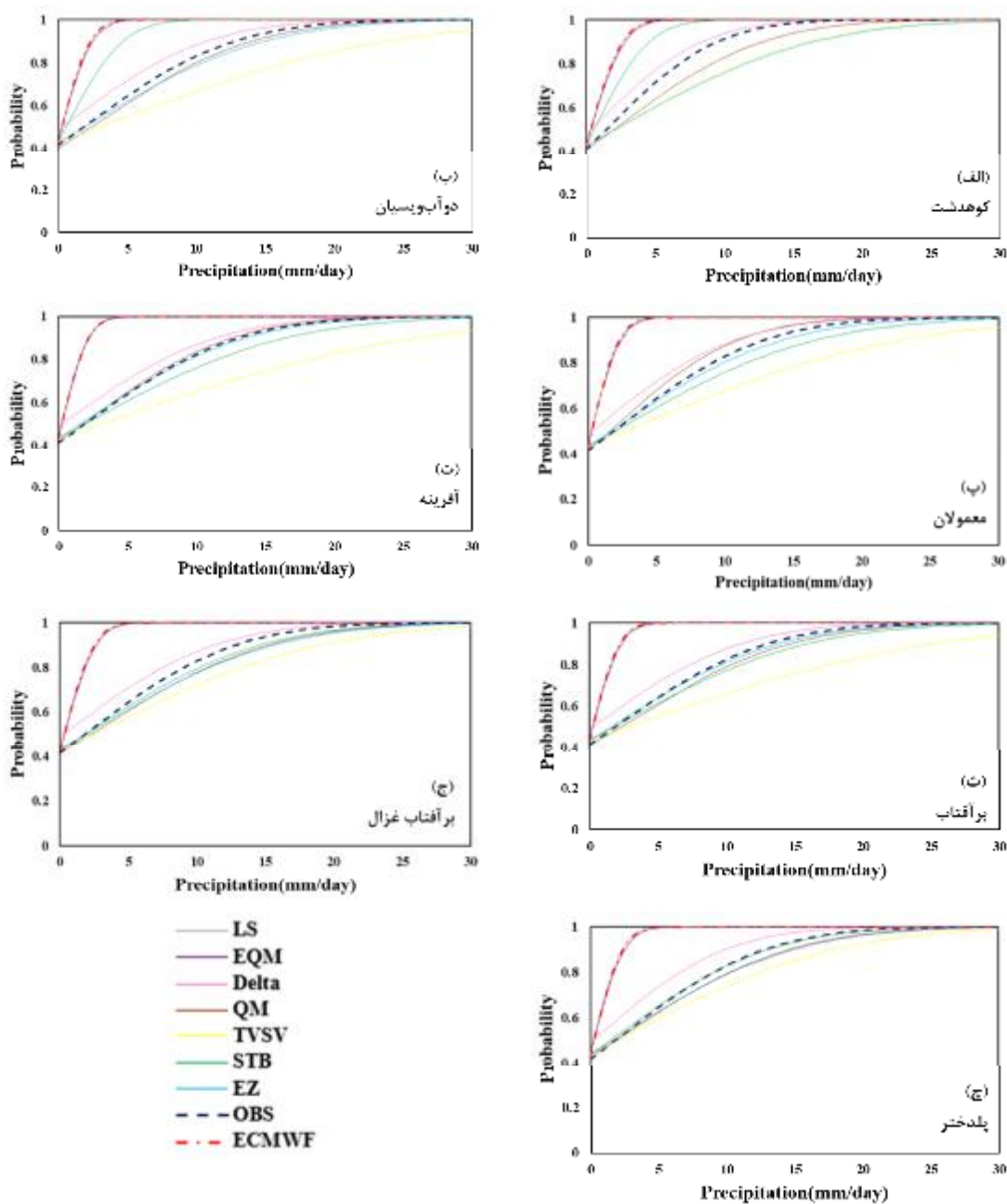
ارزیابی عملکرد مرکز پیش‌بینی عددی ECMWF پس از اصلاح اریبی

در پژوهش حاضر به منظور پس پردازش نتایج مدل پیش‌بینی بارش ECMWF از ۷ فاکتور تصحیح اریبی، منطقه ارتفاعی (EZ)، نگاشت چندک براساس توزیع تجربی، مقیاس‌گذاری خطی، نگاشت چندک، تصحیح اریبی زمانی-مکانی و فاکتور تصحیح TVSV استفاده شد. در شکل ۶ توزیع بارش تجمعی مشاهداتی و پیش‌بینی شده (قبل و بعد از تصحیح اریبی) برای ۷ ایستگاه واقع در حوضه پلدختر در ارتفاعات مختلف نشان داده شده است. در جدول ۴ نیز تأثیر تصحیح اریبی بر مقادیر شاخص‌های آماری مرکز پیش‌بینی بارش ECMWF در ارتفاعات مختلف ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، در اکثر فاکتورهای تصحیح اریبی، با حذف اریبی از داده‌های بارش پیش‌بینی شده توزیع تجمعی آن‌ها تقریباً با توزیع تجمعی داده‌های مشاهداتی منطبق شده است؛ درحالی‌که قبل از تصحیح اریبی، اختلاف توزیع بارش‌های تجمعی به‌دست‌آمده در هرکدام از ایستگاه‌های باران‌سنجی و داده‌های مشاهداتی نسبتاً زیاد است.

در ایستگاه کوه‌دشت، مطابق با شکل ۶-الف فاکتورهای تصحیح اریبی LS و EQM عملکرد ضعیفی داشتند و می‌توان گفت تقریباً هیچ تغییری را در بارش پیش‌بینی شده توسط مرکز ECMWF ایجاد نکردند و بر توزیع تجمعی بارش پیش‌بینی شده خام منطبق بودند. فاکتورهای TVSV، EZ و STB با توزیع تجمعی مشاهدات اختلاف داشتند؛ درحالی‌که روش نگاشت چندک، تصحیح پیش‌بینی‌های بارش را با نتایج قابل‌قبولی ارائه داد. در این ایستگاه، فاکتور Delta بهترین

مکانی و زمانی تأثیرپذیر نبود؛ بنابراین روشی است که می توان در همه مدل های پیش بینی عددی با اطمینان از آن سود جست.

پیش بینی های تصحیح اریبی شده مشهود است که با نتایج تیمیگ و همکاران (۲۰۱۳) همسو است. روش Delta در همه ایستگاه ها نتایج خوبی داشت و از شرایط



شکل ۶- توزیع بارش تجمعی مشاهداتی و پیش بینی (قبل و بعد از تصحیح اریبی) به دست آمده از مرکز ECMWF در ایستگاه های منتخب در حوضه پلدختر

بودند، استفاده شد. تحلیل نتایج براساس شاخص ME نیز نشان داد که حذف اریبی از داده ها تا حد بسیار زیادی خطای کم برآوردی را در ایستگاه های منتخب کاهش داد. شاخص ME پس از تصحیح اریبی در فاکتور STB،

در جدول ۴، نتایج شاخص های ME، RMSE و POD در بارش پیش بینی شده قبل و پس از تصحیح اریبی توسط ۷ فاکتور تصحیح اریبی درج شده است. در این جدول، از ۳ ایستگاهی که معرف ارتفاع بالا، ارتفاع متوسط و ارتفاع کم

دلیل آن را در عملکرد مناسب مرکز ECMWF در تشخیص روزهای بارانی دانست. روش EQM و QM ضعیف‌ترین عملکرد را داشتند. براساس نتایج جدول ۴، روش Delta کمترین خطا را در تصحیح پیش‌بینی‌ها داشت و فاکتور STB کم‌برآوردی بارش پیش‌بینی‌شده را مرتفع کرد.

بهترین نتیجه را داشت درحالی‌که در روش Delta پیش‌بینی‌ها با بیش‌برآوردی روبه‌رو شدند. نتایج حاصل از شاخص RMSE نشان‌دهنده برتری روش Delta است. براساس این شاخص روش TVSV ضعیف‌ترین عملکرد را داشت. تشخیص تعداد روزهای بارانی (POD) پس از تصحیح اریبی در اکثر روش‌ها ارتقا نیافت که می‌توان

جدول ۴- تأثیر حذف اریبی از داده‌ها بر شاخص‌های ME, RMSE و POD مرکز پیش‌بینی ECMWF در مناطق ارتفاعی مختلف

شاخص آماری	منطقه ارتفاعی	داده خام پیش‌بینی‌شده	Delta	EQM	EZ	QM	LS	STB	TVSV
ME	ارتفاع بالا	-۱/۵۱	۱/۵۳	۱/۵۳	۰/۱۳	۰/۴۴	۱/۵۲	۰/۰۰۲۳	۰/۵۵
	ارتفاع متوسط	-۱/۶۹	۱/۷	۱/۷۲	۰/۲۹	۰/۴۱	۱/۲	۰/۰۱	۰/۷۳
	ارتفاع پایین	-۱/۱۸	۱/۲	۱/۲	۰/۲	۰/۴۳	۱/۷	۰/۰۰۲۶	۰/۵۴
RMSE	ارتفاع بالا	۷/۸	۱/۵۳	۷/۸	۸/۸	۸/۶	۷/۸	۸/۴	۱۲/۳
	ارتفاع متوسط	۷/۴	۱/۷	۷/۴۵	۷/۷	۶/۶	۷/۴۷	۸/۸	۱۰/۵
	ارتفاع پایین	۶/۷	۱/۲۴	۶/۶	۷/۸	۷/۵	۶/۷	۶/۹	۹/۳۳
POD	ارتفاع بالا	۰/۹	۰/۸۷	۰/۳۷	۰/۹	۰/۵۲	۰/۹	۰/۹	۰/۹
	ارتفاع متوسط	۰/۸۵	۰/۸۲	۰/۲۶	۰/۸۵	۰/۳۸	۰/۸۶	۰/۸۵	۰/۸۵
	ارتفاع پایین	۰/۸۸	۰/۸۱	۰/۴	۰/۸۸	۰/۴۸	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۸

و شرایط مرزی و اولیه مورد استفاده منجر به نتایج متفاوتی می‌شوند؛ لذا ضروری است تا کارایی آن‌ها بررسی شده و در صورت لزوم تصحیح شوند. هدف از پژوهش حاضر ارزیابی کارایی مدل پیش‌بینی میان‌مدت جوی ECMWF در مقیاس روزانه در حوضه آبخیز پلدختر است. همچنین بررسی میزان بهبود عملکرد مدل مذکور با استفاده از ۷ روش تصحیح اریبی (Delta, EQM, EZ, QM, LS, STB, TVSV)، هدف دیگر این تحقیق به شمار می‌آید. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل ECMWF در منطقه ارتفاعی پایین دارای خطای کمتری است و این در حالی است که در ارتفاع بالا دارای شاخص RMSE بالاتری است. همچنین یافته‌های پژوهش حاکی از وجود خطای قابل‌توجه و کم‌برآوردی در مقدار بارش در منطقه مورد مطالعه است و این کم‌برآوردی در مناطق با ارتفاع بالا و متوسط بیشتر است. مرکز ECMWF در تشخیص صحیح تعداد روزهای بارانی عملکرد خوبی داشت. ارتفاعات بالاتر حوضه پلدختر بهترین تشخیص روزهای بارانی را در مقایسه با سایر نقاط داشتند. فاکتور تصحیح اریبی QM و EZ در بیش از نیمی از ایستگاه‌های منتخب خطاهای اریبی را با دقت خوبی تصحیح کردند. این دو فاکتور با دقت مشابهی تصحیحات را انجام دادند؛

بررسی تغییرات شاخص طبقه‌بندی‌شده POD نیز مؤید این مطلب است که با تصحیح اریبی داده‌های پیش‌بینی‌شده، تعداد روزهایی که توسط ECMWF درست تشخیص داده‌اند، افزایش یافته است. در مرکز ECMWF پس از تصحیح اریبی تغییری چندانی در شاخص POD مشاهده نشد. تغییر اندک شاخص POD در مرکز ECMWF را می‌توان به دلیل عملکرد خوب و ساختار مدل عددی در این مرکز دانست. شاخص POD در ارتفاع بالا نسبت به این شاخص در ارتفاع پایین عملکرد بهتری داشت. دلیل این اختلاف را می‌توان کوهستانی بودن منطقه و وجود ناهمواری در حوضه مورد مطالعه دانست و اینکه در ارتفاعات بالا موانع برای دریافت اطلاعات از سطح زمین کم‌تر است درحالی‌که در نقاط پست‌تر موانع اطراف نقطه مورد نظر، از دریافت اطلاعات صحیح جلوگیری می‌کند.

نتیجه‌گیری

انواع مدل‌های عددی در زمینه پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی اخیراً توسط مراکز تحقیقاتی مطرح دنیا، توسعه یافته است. هر کدام از مدل‌های عددی پیش‌بینی با توجه به ساختار مدل، معادلات به‌کاررفته و چگونگی حل آن‌ها

- 1367–1381.
8. Lazoglou G, Zittis G, Anagnostopoulou C, Hadjinicolaou P, and Lelieveld J. 2020. Bias correction of RCM precipitation by TIN-copula method: A case study for historical and future simulations in Cyprus. *Climate*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/CLI8070085>
 9. Lenderink G, Buishand A, and Van Deursen W. 2007. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(3): 1145–1159.
 10. Javanmard Ghassab M, and Delavar S. M. 2018. Medium-Term Forecast Evaluation of TIGGE Numerical Weather Prediction Models for Karun Basin. *Iran-Water Resources Research*. 14(3): 1–14.
 11. Medina H, and Tian D. I. 2020. Comparison of probabilistic post-processing approaches for improving numerical weather prediction-based daily and weekly reference evapotranspiration forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences*. 24(2): 1011–1030.
 12. Mendez M, Maathuis B, Hein-Griggs D, and Alvarado-Gamboa L. F. 2020. Performance evaluation of bias correction methods for climate change monthly precipitation projections over Costa Rica. *Water*. 12(2): 482.
 13. Rätty O, Räisänen J, and Ylhäisi J. S. 2014. Evaluation of delta change and bias correction methods for future daily precipitation: intermodel cross-validation using ENSEMBLES simulations. *Climate Dynamics*. 42(9): 2287–2303.
 14. Shiru M. S, and Park I. 2020. Comparison of ensembles projections of rainfall from four bias correction methods over nigeria. *Water (Switzerland)*. 12(11): 1–16.
 15. Su X, Yuan H, Zhu Y, Luo Y, and Wang Y. 2014. Evaluation of TIGGE ensemble predictions of Northern Hemisphere summer precipitation during 2008–2012. *Journal of Geophysical Research*. 119(12): 7292–7310.
 16. Tao Y, Duan Q, Ye A, Gong W, Di Z, Xiao M, and Hsu K. 2014. An evaluation of post-processed TIGGE multimodel ensemble precipitation forecast in the Huai river basin. *Journal of Hydrology*. 519: 2890–2905.
 17. Taraphdar S, Mukhopadhyay P, Leung L.R, and Landu K. 2016. Prediction skill of tropical synoptic scale transients from ECMWF and NCEP Ensemble Prediction Systems. *Mathematics of Climate and Weather Forecasting*, 2(1): 26–42.
 18. Teutschbein C, and Seibert J. 2012. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of اما تصحیحات فاکتور EZ، در ایستگاه‌هایی با ارتفاع متفاوت، اختلاف زیادی داشت و نسبت به تغییر ارتفاع حساس بود. فاکتور STB در دو ایستگاه موفق به تصحیح ۹۰ درصدی پیش‌بینی‌ها شد. فاکتور Delta در همه ایستگاه‌ها دقت کافی داشت و تصحیحات را به خوبی انجام داد؛ بنابراین بهتر است در مطالعات پیش‌بینی سیل از این فاکتور استفاده شود. نتایج این پژوهش به مطالعات هیدرولوژیکی و تصمیم‌گیری مدیران بخش بحران -اینکه بتوانند در زمان مناسب تصمیم مناسب را بگیرند- و همچنین برنامه‌ریزی در بخش مدیریت منابع آب و آبخیزداری کمک شایانی می‌کند.
- ### منابع
۱. امینی س، عزیزیان ا، و دانش کارآراسته پ. ۱۳۹۹. بهبود عملکرد سامانه‌های پیش‌بینی بارش جهانی در اقلیم‌های مختلف ایران با روش تصحیح اریبی نگاشت چندک. *تحقیقات آب‌و خاک ایران*. ۵۱(۹): ۲۲۷۶–۲۲۹۱.
 ۲. ساعدی ع، ثقفیان ب، و معظمی ص. ۱۳۹۸. تحلیل عدم قطعیت پیش‌بینی سیل با پیش‌بینی گروهی بارش هفت مدل عددی برای سیل گلستان در بهار ۱۳۹۸. ۱۶(۱): ۳۴۷–۳۵۹.
 3. Abdolmanafi A, Saghafian B, and Aminyavari S. 2021. Evaluation of global ensemble prediction models for forecasting medium to heavy precipitations. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 133(1): 15–26.
 4. Aminyavari S, Saghafian B, and Delavar M. 2019. Evaluation of TIGGE Ensemble Forecasts of Precipitation in Distinct Climate Regions in Iran. *Advances in Atmospheric Sciences*. 35(4): 457–468.
 5. Bhatti H.A, Rientjes T, Haile A.T, Habib E, and Verhoef W. 2016. Evaluation of bias correction method for satellite-based rainfall data. *Sensors (Switzerland)*. 16(6): 1–16.
 6. Gumindoga W, Rientjes T, H. M. Tamiru Haile A, Makurira H, and Reggiani P. 2019. Performance of bias-correction schemes for CMORPH rainfall estimates in the Zambezi River basin. *Hydrology and Earth System Sciences*. 23(7): 2915–2938.
 7. Lafon T, Dadson S, Buys G, and Prudhomme C. 2013. Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: A comparison of methods. *International Journal of Climatology*. 33(6):

- different methods. *Journal of Hydrology*. 456: 12–29.
19. Themeßl M. J. Gobiet A. and Heinrich G. 2012. Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change*. 112(2): 449-468.
20. Thiemiig V. Rojas R. Zambrano-Bigiarini M. and De Roo A. 2013. Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the Volta and Baro-Akobo Basin. *Journal of Hydrology*. 499: 324-338.
21. Voisin N. Schaake J. C. and Lettenmaier D. P. 2010. Calibration and downscaling methods for quantitative ensemble precipitation forecasts. *Weather and Forecasting*. 25(6): 1603-1627. <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222367.1>
22. Wood A. W. and Schaake J. C. 2008. Correcting errors in streamflow forecast ensemble mean and spread. *Journal of Hydrometeorology*. 9(1): 132-148.

